

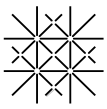
Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel
Forschungsgruppe Hydrogeologie
Angewandte und Umweltgeologie

Abschlussbericht

Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen & Definition Tiefengrundwasser

Hydrogeologische Grundlagen

Basel, 31 Oktober 2024



Abschlussbericht

Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen & Definition Tiefengrundwasser – Hydrogeologische Grundlagen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Ort, Datum

Basel, 31.10.2024

Projekt

Antwort Motion Jauslin

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

Angewandte und Umweltgeologie (AUG)
Forschungsgruppe Hydrogeologie
Departement Umweltwissenschaft

Autoren

PD. Dr. Jannis Epting
MSc Erdw. ETH Michel A. Walde
Prof. Dr. Oliver S. Schilling

Begleitung BAFU

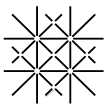
Dr. Marc Schürch
Dr. Stefanie Wirth

Hinweis

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

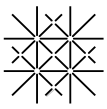
Berichtsnummer

Baugrundarchiv (BGA), BGA-Schweiz-78
<https://doi.org/10.5451/unibas-ep96756>



Inhalt

1 Zusammenfassung	3
2 Auftrag	5
3 Ausgangslage & Zielsetzung	6
3.1 Definition Geothermische Tiefenbereiche / Temperaturen	6
3.2 Gesetzliche Grundlagen zur thermischen Nutzung von Grundwasser	7
3.3 Themenbereich 1: Referenztemperaturen	10
3.4 Themenbereich 2: Definition Tiefengrundwasser	14
3.5 Themenbereich 3: Nutzbarkeit Tiefengrundwasser	15
4 Recherche, Auswertungen & Konzepte	17
4.1 Recherche gesetzliche Rahmenbedingungen	17
4.2 Erweiterung der Datengrundlagen	19
4.3 Definitionen & Konzepte Referenztemperaturen	21
4.4 Abgrenzung Tiefengrundwasser und oberflächennahe Grundwasservorkommen	37
4.5 Ergiebigkeit & Nutzbarkeit	41
5 Fazit	45
5.1 Referenztemperaturen und Abgrenzung oberflächennaher vs. tiefer Grundwasservorkommen	45
5.2 Nutzbarkeit von Grundwasservorkommen	48
6 Ausblick & Empfehlungen	49
Referenzen	53
Anhang A: Datengrundlage	57
Anhang B: Grundlagen swisstopo	59
Anhang C: Grundlagen nagra	61
Anhang D: Auswirkungen von Klimaänderungen auf Grundwasserressourcen	66
Anhang E: Regionale Fließsysteme	67



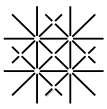
1 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, (1) eine praxistaugliche Definition für eine Grundwassertemperatur zu finden, welche als Referenztemperatur für die Festlegung der erlaubten Temperaturveränderungen bei thermischen Nutzungen des Grundwassers dienen kann, (2) eine praxistaugliche Abgrenzung zwischen oberflächennaher und tiefer Grundwasservorkommen zu erarbeiten, (3) sowie zu eruieren, unter welchen Gegebenheiten ein Tiefengrundwasser ein für Trinkwasserzwecke nicht nutzbares Grundwasservorkommen darstellt.

Basierend auf einer neuen Kompilation an Untergrundtemperaturdaten («Swiss Geotemperature Compilation»), die im Rahmen dieser Studie erarbeitet wurde, zeigte sich, dass für oberflächennahe Grundwasserressourcen (bis ca. 25 m) in anthropogen wenig bzw. unbeeinflussten Grundwasserleitern jährliche Mittelwerte der bodennahen Lufttemperatur die «natürliche» Grundwassertemperatur darstellen und als Referenztemperatur herangezogen werden können. Für anthropogen wenig bzw. unbeeinflusstes, mitteltiefes Grundwasser (25-2'000 m) überlagert sich der Einfluss vom basalen Wärmestrom mit einem, durch advective Grundwasserströme in die Tiefe transportierten, oberflächlichen Temperatursignal, wodurch ein Abschätzen von Referenztemperaturen grundsätzlich zusätzlicher standortspezifischer Daten zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen bedarf. Für die generell anthropogen unbeeinflussten, sehr tiefen (> 2'000 m) Grundwasservorkommen kann als erste Näherung für unbeeinflusste Grundwassertemperaturen eine Kombination aus regionalen geothermischen Tiefengradienten und des Wärmestroms als Grundlage zur Definition der Referenztemperatur dienen.

In urbanen Gebieten werden aufgrund der starken anthropogenen Nutzung und anderweitigen Beeinflussung des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern bereits heute, in Vergleich zu einem natürlichen Zustand, erhöhte Grundwassertemperaturen beobachtet. Dasselbe ist der Fall für bodennahe Lufttemperaturen, welche aufgrund der starken Siedlungsdichte, Versiegelung der Oberfläche, Wärmestrahlung der Gebäude und anderweitigen Nutzungen gegenüber bodennahen Lufttemperaturen in ländlichen Regionen signifikant erhöht sind. Eine Definition von Referenztemperaturen basierend auf der in-situ gemessenen mittleren bodennahen Lufttemperaturen in urbanen Regionen wird deshalb der Definition von «natürlichen» Grundwassertemperaturen nicht gerecht. Für urbane Räume muss daher, zur Ermittlung einer potentiellen «natürlichen» Grundwassertemperatur, die bodennahe Lufttemperatur einer ländlichen Station in der Nähe der urbanen Region als Referenz herangezogen werden.

Aufgrund der komplexen und vielseitigen Nutzung des Untergrunds ist in urbanen Gebieten zudem zu berücksichtigen, dass es nach thermischen Eingriffen in den Untergrund eine gewisse Zeit dauert (Retardationseffekt) bis sich ein neuer thermischer Gleichgewichtszustand (Memory, bzw. Memory-Effekt) einstellt. Für ein nachhaltiges Wärmemanagement urbaner Grundwasserleiter, welches diese Retardations- und Memory-Effekte angemessen berücksichtigt, werden hochauflösende Temperaturmessnetze und thermo-hydraulische Modelle (THM) benötigt.

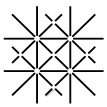


Differenzierte Betrachtungsweisen bedarf es auch in der Nähe von Fließgewässern (Berücksichtigung von Fluss-Grundwasserinteraktionen), bei Karst- und Kluftgrundwasserleitern (Quantifizierung von heterogenen, schnellen und langsamen Fließkomponenten und regionalen Grundwasserzirkulationssystemen) sowie wenn Grundwasser für die Trinkwassergewinnung künstlich angereichert wird (Differenzierung Grundwasserneubildungsprozesse).

Der Klimawandel wird aufgrund der erwarteten weiteren Erhöhung bodennaher Lufttemperaturen dazu führen, dass sich auch die Grundwassertemperaturen generell erhöhen werden. Daneben wird der Klimawandel aber auch die Grundwasserneubildung beeinflussen. Da beide Effekte für die verschiedenen Regionen der Schweiz sehr unterschiedlich ausfallen können, ist in Bezug auf den Effekt des Klimawandels eine differenzierte Betrachtungsweise nötig.

Im Hinblick auf eine Evaluation der Nutzbarkeit von Tiefengrundwasser (GSchV Anh. 4 Ziff. 111: Trinkwasserqualität und ausreichende Menge) stellen wir, basierend auf einer Literatur und Gesetzestextanalyse sowie unter Berücksichtigung geltender Schutzbestimmungen, ein erstes mögliches Evaluationskonzept vor. Das Konzept fusst auf Nutzbarkeitsparametern (Ergiebigkeit, Temperaturen und hydrochemische Hintergrundwerte [v.a. Mineralisation]) und erlaubt eine erste Unterscheidung zwischen nutzbarem und nicht nutzbarem Tiefengrundwasser für unterschiedliche Nutzungsarten (Trink-, Mineral-, Thermal-, Badewasser bis hin zu nicht nutzbar).

Aufgrund der generell knappen und unvollständigen Datenlage müssen für Tiefengrundwasser, sowohl bei bestehenden als auch bei zukünftigen Grundwassernutzungen, neben zwingend zu erhebenden in-situ-Grundwassertemperaturen als Referenz vor der Wärmenutzung in jedem Fall auch Tracer- und Geoindikator-basierte Untersuchungen durchgeführt werden.



2 Auftrag

Im August 2023 erteilte die Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) der Angewandten und Umweltgeologie (AUG) in der Forschungsgruppe Hydrogeologie des Departementes Umweltwissenschaften (DUW) der Universität Basel den Auftrag zur Zusammenstellung hydrogeologischer Grundlagen für die Bewertung des thermischen Ist-Zustandes und der thermischen Umweltauswirkungen unterirdischer Nutzungen auf die Grundwasserressourcen.

Die Zusammenstellung soll als Grundlage für notwendige Anpassungen der Gewässerschutzverordnung und der Vollzugshilfe dienen.

Folgende Themenbereiche werden bearbeitet:

1. Literaturrecherche und Zusammenstellung einfacher und praxistauglicher Methoden für die Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen (Definition & Berechnung)
2. Literaturrecherche und Zusammenstellung einfacher und praxistauglicher Methoden für die Herleitung einer Definition für Tiefengrundwasser
3. Überprüfen der Annahme der Motion Jauslin¹, dass Tiefengrundwasser = für die Trinkwasserversorgung nicht nutzbares Grundwasser ist

Ende November 2003 wurde dem BAFU ein Zwischenbericht zugesandt, welcher den damaligen Stand der Arbeiten (M1.1., M2.1, M3.1) zusammenfasste. Es folgten ein BAFU interner Review mit Anpassungs- und Ergänzungsvorschlägen sowie ein Review durch Mitglieder des Fachausschusses zur Bearbeitung der Motion Jauslin, welche in diesem Abschlussbericht berücksichtigt werden.

	M MA Kat A		2023						2024	
	M MA Kat B		Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb
Bestandsaufnahme bestehender gesetzlicher Rahmenbedingungen Themenbereiche 1 & 2 (Regeln/Kenntnisse/Beurteilungsverfahren) national & international								M0		
1 Definition «natürliche» Grundwassertemperatur										
Literaturrecherche & Zusammenstellung Grundlagendaten (systematische Aufzeichnungen Temperaturdaten, Luft Untergrund/Grundwasser)								M1.1		
Prüfung Übertragbarkeit (tiefenabhängige Temperaturen, Typ Grundwasserleiter, urban/rural, etc.)										M1.2
2 Definition Tiefengrundwasser										
Literaturrecherche & Zusammenstellung Grundlagendaten (tiefenabhängige Temperaturen, Typ Grundwasserleiter, Grundwasserchemismus, Tiefengrundwasserzirkulation, etc.)								M2.1		
Prüfung Anwendung (Typ & Tiefe Grundwasserleiter, etc.)										M1.2
3 Tiefengrundwasser = nicht nutzbares Grundwasser für die Trinkwasserversorgung										
Diskussion auf Grundlage Resultate Themenbereiche 1 & 2								M3.1		M3.2
Auswertung & Dokumentation										
Zusammenfassung & Interpretation (Bericht)										MX

¹ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20223702>

3 Ausgangslage & Zielsetzung

Die aktuelle 3°C-Regel zur Bewertung thermischer Auswirkungen von Untergundnutzungen auf das Grundwasser erschwert differenzierte Betrachtungen und Entwicklungsmöglichkeiten von thermischen Nutzungen des Untergrunds. Eine zeitgemässe thermische Bewirtschaftung unterirdischer Ressourcen, auch vor dem Hintergrund des Grundwasserschutzes und der Klimaerwärmung, bedarf für die Geothermie angepasste Rahmenbedingungen. Daher wird die 3°C-Regel zunehmend in Frage gestellt und mit der am 09.03.2023 auch durch die zweite Kammer angenommenen Motion Jauslin zur Überarbeitung an den Bundesrat in Auftrag gegeben.

3.1 Definition Geothermische Tiefenbereiche / Temperaturen

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie (Erdwärme) unterhalb der Erdoberfläche. Diese resultiert zum grössten Teil aus dem Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente in der Erdkruste.

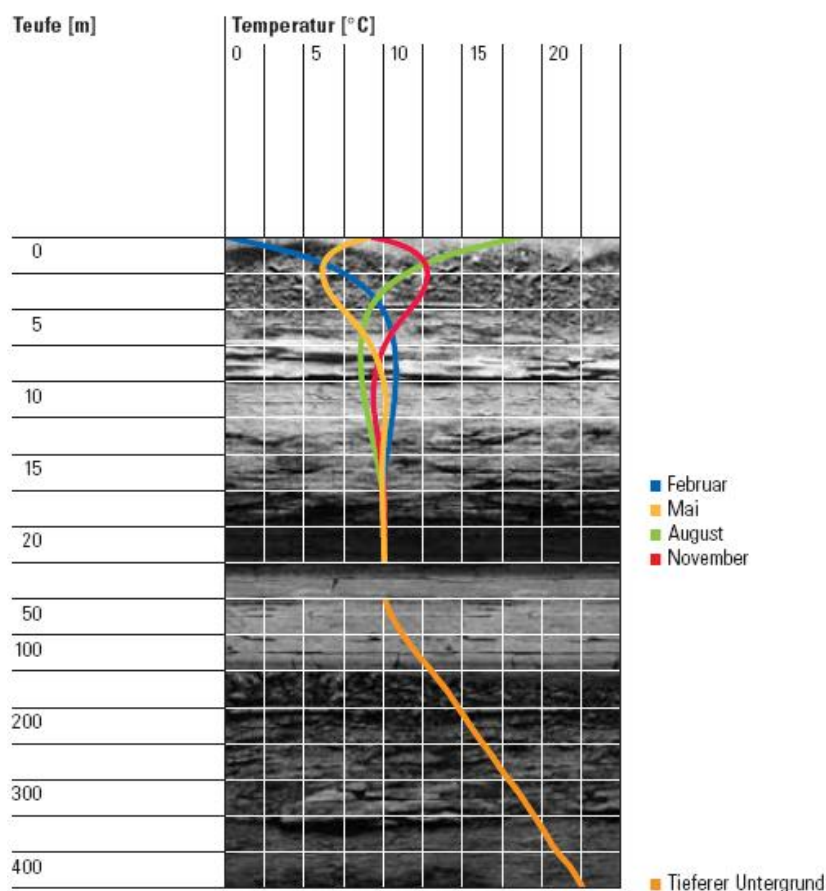
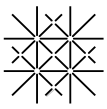


Abb. 1 Temperaturprofil Untergrund².

² https://www.wwa-wm.bayern.de/grundwasser_boden/geothermie/was_ist_geothermie/index.htm



Von der Erdoberfläche bis in eine Tiefe von ca. 15 m wird der Wärmehaushalt des Untergrundes über Sickerwasser und die Infiltration von Oberflächengewässern noch wesentlich von den Schwankungen der Lufttemperaturen beeinflusst. Darunter befindet sich eine Zone, welche in homogenen oder nur schwach heterogenen Grundwasserleitern unabhängig von jahreszeitlichen Temperaturschwankungen ist und typischerweise der mittleren, bodennahen Lufttemperatur am Standort entspricht. Der Wärmehaushalt unterhalb dieser Zone, in welcher unter anderem die Tiefengrundwasserleiter liegen, ist signifikant durch den basalen Wärmestrom beeinflusst. In Abhängigkeit der Standortverhältnisse steigt die Temperatur im Schweizer Untergrund im Durchschnitt um 3°C pro 100 m zunehmender Tiefe (**Abb. 1**).

Komplizierter gestaltet sich die Situation insbesondere in Karst- und stark heterogenen Kluftgrundwasserleitern, denn Grundwasserströme mit vergleichsweise kurzen Verweilzeiten, wie sie typisch sind für Karst- und Kluftgrundwasserleiter, können Oberflächentemperatursignale selbst bis in grosse Tiefen von bis zu mehreren hundert Metern transportieren. Auch ist zwischen verschiedenen Wärmetransportprozessen zu unterscheiden, denn neben dem advektivem Transport von Wärme durch fließendes Grundwasser (welcher sich in Advektion und hydrodynamische Dispersion aufteilt und den Wärmetransport in Lockergesteinen dominiert), sind auch der konduktive Transport sowie die Wärmekapazität des Festgesteins und des Wassers von Relevanz. Dabei kann besonders in wenig permeablen Festgesteinsgrundwasserleitern der konduktive Wärmetransportprozess dominieren.

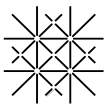
3.2 Gesetzliche Grundlagen zur thermischen Nutzung von Grundwasser

Beim Vergleich der internationalen rechtlichen Regelungen zur thermischen Nutzung des Grundwassers liegt ein wichtiges Augenmerk auf der quantitativen Regelung der zulässigen Erhöhung oder Abnahme der Grundwassertemperatur um einige Grad gegenüber einem «natürlichen Zustand» der Grundwassertemperaturen ohne anthropogenen Einfluss (Haehnlein et al., 2010). Ein «natürlicher Zustand» ist als Referenz jedoch in der Regel gesetzlich nicht klar definiert.

Ein weiterer Aspekt der Analyse bezieht sich auf die gesetzlichen Vorgaben zum Schutz der Grundwasserqualität, denn diese sollen garantieren, dass jegliche Nutzung von Grundwasser, inklusive thermischer Nutzung, die Qualität des Grundwassers und Untergrunds nicht bzw. nur innerhalb eines strikten gesetzlichen Rahmens beeinträchtigen.

Grundwassertemperaturen & thermische Nutzung – Quantitative Aspekte (Status quo Schweiz)

Auf Bundesebene ist die Wärmenutzung aus dem Untergrund nur über das Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 1991 (GSchG (1991), SR 814.20) und die Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV (1998), SR 814.201) geregelt. Unbestimmte Rechtsbegriffe aus diesen beiden Erlassen sind in der *Wegleitung Grundwasserschutz* (BUWAL, 2004) und der *Vollzugshilfe Wärmenutzung aus Boden und Untergrund* (BAFU, 2009) konkretisiert.



Die Gesetzgebung zum Schutz der Gewässer liegt im Verantwortungsbereich des Bundes, Präzisierung der bundesrechtlichen Vorgaben finden im Rahmen von kantonalen Gesetzen/Vollzugshilfen statt. Soweit der Gewässerschutz nicht betroffen ist, ist die Nutzung der Gewässer und des Untergrunds generell hingegen im Zuständigkeitsbereich der Kantone und wird durch Gesetze und Verordnungen auf kantonaler Ebene geregelt.

Aktuell vorgeschrieben ist eine maximal zulässige Änderungen der Grundwassertemperatur von 3°C in 100 m Abstrom des thermischen Eingriffs (GSchV (1998) und Wegleitung Grundwasserschutz) gegenüber der natürlichen Temperatur des Grundwassers. Die maximale Temperaturveränderung auf 3°C ist identisch mit der maximal zulässigen Temperaturveränderung in Oberflächengewässern ausserhalb der Forellenregion bei Wärme- und Kühlnutzungen und soll so zum Schutz der Oberflächengewässer vor übermässiger Erwärmung durch allfällige Exfiltration von Grundwasser beitragen. Sie entspricht dem Vorsorgeprinzip, um gemäss Artikel 3 GSchG nachteilige Einwirkungen auf Gewässer zu vermeiden. Darunter fallen auch nachteilige Veränderungen der Grundwasserchemie oder -biologie durch zu starke Temperaturveränderungen (siehe unten). Der spezifische Wert von 3°C für Grundwasser ist jedoch noch nicht durch wissenschaftliche Studien belegt und lediglich durch die (wissenschaftlich gut belegte) Regelung für Oberflächengewässer begründet.

Für die Bewilligung von Wärme- und Kältenutzungen im Untergrund unterscheidet das Gewässerschutzrecht zwischen Grundwasserschutzzonen und -arealen (keine Nutzungen zulässig), den besonders gefährdeten Bereichen (insbesondere Gewässerschutzbereich A_w (Nutzungen nur mit einer Gewässerschutzbewilligung nach Art. 19 Abs. 2 GSchG zulässig) und den übrigen Bereichen (Nutzungen ohne Gewässerschutzbewilligung nach Art. 19 Abs. 2 GSchG zulässig).

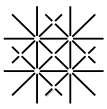
Es gilt auch zu berücksichtigen, dass nach Art. 43 GSchG (1991) einem Grundwasservorkommen langfristig nicht mehr Wasser entnommen werden darf, als ihm zufließt.

Zudem steht die Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten des BAFU aus dem Jahre 1998³ zur Verfügung. Die Koordination zwischen der Raumplanung im Untergrund und dem Schutz des Tiefengrundwassers ist in der Gesetzgebung allerdings noch nicht umgesetzt.

Grundwasserqualität & Biozönose – Qualitative Aspekte (Status quo Schweiz)

Nach GSchV (Anhang 1, Abschnitt 2: Ökologische Ziele für unterirdische Gewässer) soll die Biozönose unterirdischer Gewässer (a) naturnah und standortgerecht sein; und (b) typisch sein für nicht oder nur schwach belastete Gewässer. Zudem soll die Grundwasserqualität so beschaffen sein, dass (a) die Temperaturverhältnisse naturnah sind; (b) im Wasser keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten sind; und (c) andere Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch menschliche Tätigkeit

³ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uv-umwelt-vollzug/wegleitung_zur_umsetzungdesgrundwasserschutzesbeiuertagebauten.pdf.download.pdf/wegleitung_zur_umsetzungdesgrundwasserschutzesbeiuertagebauten.pdf



ins Wasser gelangen können (i) in der Biozönose und in der unbelebten Materie des Grundwasserleiters nicht angereichert werden; (ii) im Grundwasser im Bereich der natürlichen Konzentrationen liegen, wenn sie dort natürlicherweise vorkommen; (iii) im Grundwasser nicht vorhanden sind, wenn sie dort natürlicherweise nicht vorkommen; und (iv) keine nachteiligen Einwirkungen auf die Nutzung des Grundwassers haben.

Aspekte Trinkwasserqualität (Status quo Schweiz)

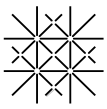
Das Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) legt die gesetzlichen Bestimmungen im Zusammenhang mit der Trinkwasserqualität fest. Diese Bestimmungen sind in der Verordnung des Eidgenössischen Departements des Innern (EDI) über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV)⁴ festgehalten.

Trinkwasser muss hinsichtlich Geruch, Geschmack und Aussehen unauffällig sein und darf hinsichtlich Art und Konzentration der darin enthaltenen Mikroorganismen, Parasiten sowie Kontaminanten keine Gesundheitsgefährdung darstellen (Art. 3 Anforderungen an Trinkwasser; TBDV). Trinkwasser muss die Mindestanforderungen nach den Anhängen 1–3 erfüllen (TBDV).

Bzgl. Tiefengrundwässer sind gemäss Anhang 4 Ziffer 111 GSchV die Grundwässer nutzbar, welche die Anforderungen an die Lebensmittelgesetzgebung, nötigenfalls nach Anwendung einfacher Aufbereitungsmethoden, erfüllen und die in einer Menge vorhanden sind, dass eine Nutzung in Betracht gezogen werden kann. Wenn eine aufwändige Aufbereitung notwendig ist, kann das entsprechende Grundwasservorkommen nicht einem Gewässerschutzbereich A_v zugeteilt werden und es fällt in die übrigen Bereiche. Dies bedeutet auch, dass Tiefengrundwasser nur dann als nutzbar im Sinne der GSchV gelten kann, wenn es mindestens im selben Umfang erneuert wird, wie es für die Trinkwassernutzung entnommen wird, da andernfalls eine Nutzung aufgrund von Art. 43 Abs. 1 GSchG nicht zulässig ist. Allerdings ist gesetzlich nicht festgehalten, ab welcher Ergiebigkeit ein Tiefengrundwasser als ergiebig genug für eine Nutzung gilt. Tiefengrundwasser hat ausserdem den Vorteil, dass es in der Regel frei ist von künstlichen, sprich anthropogenen, Mikroverunreinigungen (Burger, 2016).

Möglichkeiten, um Tiefengrundwasser und andere Grundwässer, die in ihrem ursprünglichen Zustand nicht als nutzbar gelten würden, nutzbar machen zu können, sind in der Liste der Verfahren zur Aufbereitung von Trinkwasser (TBDV, Anhang 4) definiert und basieren z.B. auf dem Mischen von zwei oder mehreren Wässern zur Verdünnung und Reduktion gewisser Stoffkonzentrationen. Auf diese Weise kann Tiefengrundwasser, das als z.B. nicht nutzbar im Sinne der TBDV eingestuft wird, in nutzbares Trinkwasser aufbereitet werden, sofern die Verunreinigungen geogener und nicht anthropogener Natur sind.

⁴ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/153/de>



Status quo in der Schweiz

Ein Ziel dieser Studie war es, die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz und in den Kantonen mit der Gesetzgebung in anderen Ländern zu vergleichen.

3.3 Themenbereich 1: Referenztemperaturen

Oberflächennahes Grundwasser

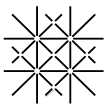
Der Wärmehaushalt von oberflächennahem Grundwasser wird massgeblich von der Atmosphären-temperatur, der Erwärmung des Bodens durch Sonneneinstrahlung sowie durch Zufluss von Grund- und Sickerwasser beeinflusst (Abb. 1). Natürlicherweise entspricht die Temperatur des unbeeinflussten oberflächennahen Grundwassers der mittleren Jahrestemperatur der Luft in Bodennähe (= 2 m über Boden), wobei die Wassertemperatur in der Regel bis zu einer Tiefe von ca. 15 m zeitverzögert und gedämpft dem Verlauf der bodennahen Lufttemperatur folgt. Längere Verweilzeiten und zunehmende Tiefen innerhalb des Grundwasserleiters führen zu grösseren Zeitverzögerungen und Dämpfungen, wobei tiefreichende Grundwasserzirkulation in Karst- und Kluftgrundwasserleitern die Temperatur des Grundwassers auch bis in mehrere hundert Meter Tiefe deutlich beeinflussen können. Ab einer Tiefe von ca. 15 m schwankt die Temperatur von oberflächennahem Grundwasser kaum und entspricht typischerweise dem langjährigen Jahresmittel der lokalen Lufttemperatur.

Für ein Verständnis über das Zustandekommen der standortspezifischen Grundwassertemperaturen und einer darauf aufbauenden Festlegung der Tiefen der verschiedenen Temperaturbereiche, bedarf es einer differenzierten Betrachtung der geologischen Standortbedingungen und relevanten hydrogeologischen Prozesse, einschliesslich der Prozesse der Grundwasserneubildung, direkter anthropogener Einflüsse sowie möglicher positiver und negativer Rückkopplungen (Epting et al., 2020b). So sind diffuse Grundwasserzuflüsse aus angrenzenden Hanglagen zu Grundwasserleitern in den Talebenen oft durch vergleichsweise lange Aufenthaltszeiten in den jeweiligen Grundwasserleitern gekennzeichnet, und dies wiederum resultiert in oft verhältnismässigen stabilen Grundwassertemperaturen. In der Nähe von Flüssen hingegen werden die Grundwasserneubildung und entsprechend auch das Grundwassertemperaturregime von kurzfristigen Veränderungen und den Prozessen der Fluss-Grundwasser Interaktion dominiert, was oft zu verhältnismässig starken Schwankungen der Grundwassertemperaturen führt.

Die Definition von neuen Leitlinien für die thermische Bewirtschaftung von oberflächennahen Grundwasserressourcen erfordern entsprechend eine Berücksichtigung der verschiedenen, standortspezifischen Grundwasserneubildungsprozesse sowie einer breiten Analyse über das Zustandekommen des thermischen «Ist-Zustandes», da dieser sowohl von natürlichen wie auch anthropogenen Prozessen stark beeinflusst werden kann (Epting, 2017).

Tiefengrundwasser

Allgemein sind die Temperaturen von Grundwasser im mitteltiefen (25 – 2'000 m) und tiefen (> 2'000 m) Untergrund der Schweiz nur wenig bekannt und insbesondere nicht flächendeckend erforscht.



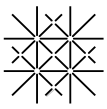
Auch sind die regionalen Grundwasserzirkulationssysteme, die die Grundwassertemperaturen neben dem geogenen Wärmefluss beeinflussen können, ohne dem Erheben von zusätzlichen Daten nur auf sehr groben räumlichen und zeitlichen Skalen abschätzbar. Die knappe Datenlage stellt dementsprechend sowohl die geothermische Prospektion wie auch die Identifizierung von Referenztemperaturen vor grosse Herausforderungen.

Aufgrund der generell als stabil zu erwartenden thermischen Bedingungen in Tiefengrundwasserleitern bietet es sich allerdings an, für bestehende und zukünftige Nutzungen von Tiefengrundwasser die jeweilig vorherrschenden Grundwassertemperaturen vor der energetischen oder thermischen Nutzung als Referenztemperatur heranzuziehen. Die Messungen des Tiefengrundwassers müssen allerdings für eine Situation ohne anthropogene Einflüsse, wie z. B. existierende unterirdische Nutzungen (Geothermie, Tunnels etc.), repräsentativ sein, um als «natürlich» gelten zu können. Neben einer tiefenabhängigen Eruiierung solcher Referenztemperaturen müssen aber in jedem spezifischen Fall auch Grundwasserverweilzeiten, Grundwasserneubildung, sowie Grundwasserdurchmischungsprozesse berücksichtigt werden. Aufgrund der vergleichswisen grossen Trägheit des Grundwasserflussregimes in tiefen Grundwasserleitern können nur weiterführende Analysen Aufschluss über eine mögliche mittelfristige Variation der Temperaturen durch bestehende und neue Nutzungen einerseits, aber auch über mögliche natürliche Temperaturschwankungen andererseits von tiefen Grundwässern geben (z.B. Maréchal et al. (1999); Peiffer et al. (2013); Schilling et al. (2013); Schilling et al. (2023); Spycher et al. (2014); Vuataz (1983); Vuataz et al. (1993)).

Urbane Gebiete

Durch anthropogene Aktivitäten werden die lokalen Grundwasserressourcen in urbanen Gegenden stärker beeinflusst als in nicht-urbanen, ländlichen Gegenden. Dies dürfte schon seit Beginn der Urbanisierung, frühestens seit Ende Spätmittelalter/Beginn der Frühen Neuzeit, aber spätestens seit der industriellen Revolution und dem Beginn des intensivierten Städtewachstums um 1850, der Fall gewesen sein. In urbanen Gegenden herrschen entsprechend generell erhöhte Grundwassertemperaturen und es kann ein Trend zu einer weiteren Erhöhung beobachtet werden (z.B. in Basel-Stadt, Epting and Huggenberger (2013)). Die räumliche und zeitliche Lokalisierung und die Grössenordnung der Veränderungen lassen sich in der Regel allerdings nicht ohne tiefergehende Analysen der lokal-relevanten, urbanen Prozesse abschätzen, da für breitere, flächendeckende Analysen nicht genügend Daten vorliegen und erhebliche Unsicherheiten bestehen.

In urbanen Regionen ist allerdings eine Abschätzung «natürlicher» Grundwassertemperaturen basierend auf der in-situ gemessenen, mittleren bodennahen Lufttemperatur nicht möglich, da auch die bodennahen Lufttemperaturen aufgrund der starken Siedlungsdichte, Versiegelung der Oberfläche und Wärmestrahlung der Gebäude und anderweitigen Nutzungen gegenüber bodennahen Lufttemperaturen in ländlichen Regionen signifikant erhöht sind. Ermittelt man beispielsweise für Basel-Stadt die potentiell «natürliche» Grundwassertemperatur basierend auf den bodennahen Lufttemperaturen der angrenzend ländlichen Regionen sowie unter Berücksichtigung weiterer natürlicher Randbedingungen wie natürlich infiltrierende Fliessgewässer, so wären Grundwassertemperaturen von etwa



10 bis 11°C zu erwarten. Auswertungen in den stark versiegelten, dicht besiedelten sowie industriell und gewerblich intensiv genutzten Stadtgebieten von Basel-Stadt zeigen aber, dass das Grundwasser bereits um 6 bis 8°C über dieser potentiell natürlichen Temperatur liegt (Epting and Huggenberger, 2014). Der Effekt dieses lokalen anthropogenen Wärmeeintrags in den Untergrund ist in urbanen Gegenden oft noch grösser als die zu erwartende Erwärmung des Untergrundes und des Grundwassers allein durch den globalen Klimawandel (Epting and Huggenberger, 2013).

Thermischer Einfluss von anthropogenen Untergrundstrukturen

Grossflächige Eingriffe in den Untergrund, wie z.B. Tunnelbauwerke oder Tiefgaragen, führen zu nicht zu vernachlässigbaren, hydraulischen und thermischen Beeinflussungen des Untergrundes. Während der hydraulische Einfluss bis vor Kurzem vor allem im Zusammenhang mit dem Grundwasserschutz betrachtet wurde, werden bei neuen Bauvorhaben deswegen zunehmend auch thermische Einflüsse und der Wärmeaustausch mit dem Untergrund betrachtet (z.B. Becker and Epting (2021); Epting et al. (2020a)).

Temperaturerhöhungen im Abstrom von Untergrundstrukturen sind unter anderem massgebend von der Grundwasserfliessgeschwindigkeit abhängig. So kann ein thermischer Einfluss bei hohen Grundwasserfliessgeschwindigkeiten sehr weit in den Abstrom reichen, während bei niedrigen Grundwasserfliessgeschwindigkeiten der Einfluss lokal sehr begrenzt sein kann (Epting et al., 2017). Bei der Beurteilung des thermischen Einflusses von grossflächigen Einbauten in das Grundwasser sollte neben der Temperatur auch der effektive Energieeintrag als massgebende Grösse Berücksichtigung finden.

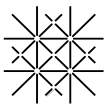
Thermische Beeinflussung von Untergrundressourcen durch verschiedene Nutzungen

Bei der geothermischen Energienutzung unterscheidet man aus technischen Gründen im Allgemeinen zwischen verschiedenen Tiefen. Dabei sind die Definitionen schweizweit nicht einheitlich und die Kantone haben für die geothermische Nutzung jeweils eigene Definitionen von *oberflächennah*, *mitteltief* und *tief*. Geothermie Schweiz unterscheidet beispielsweise zwischen oberflächennaher (< 500 m), mitteltiefer (500 – 3'000 m) und tiefer (> 3'000 m) Geothermie⁵.

Unabhängig von der exakten Definition der Tiefe umfasst die Nutzung der tiefen Geothermie technische geothermische Systeme wie petrothermale und hydrothermale Systeme (Nakatsuka, 1999) sowie in der mitteltiefen Geothermie die Nutzung von Grundwasser aus tieferen Aquiferen (z.B. Geothermie Anlage in Riehen, Basel-Stadt).

Bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie unterscheidet man zwischen geschlossenen und offenen Systemen. Bei geschlossenen Systemen, v.a. Erdwärmesonden (EWS; vgl. Florides and Kalogirou (2007); Sanner et al. (2003)), zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit (z.B. ein Glykol-Wasser-

⁵ <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/geothermie-uebersicht/>



Gemisch) in einem geschlossenen Kreislauf, und die Wärmeenergie der Wärmeträgerflüssigkeit wird mittels einer Wärmepumpe gewonnen. Offene geothermische Systeme nutzen die geothermische Energie des Grundwassers mit Hilfe von GWHP⁶-Systemen. Solche Systeme bestehen aus mindestens einem Förderbrunnen zur Grundwasserentnahme und einem Rückgabebunnen, bei welchem das Grundwasser nach Gewinnung der Wärmeenergie durch eine Wärmepumpe wieder in den Grundwasserleiter eingeleitet wird. GWHP-Systeme werden hauptsächlich von grösseren (>50 kW) industriellen Energieverbrauchern zum Kühlen und, weniger häufig, zum Wärmen betrieben. Die Nutzung des Grundwassers durch GWHP-Systeme hat einen direkteren Einfluss auf den Wärmehaushalt des Grundwasserleiters als die Nutzung durch EWS-Systeme.

Eine weitere thermische Anwendung stellt die temporäre Wärmespeicherung dar (ATES⁷ und BTES⁸, siehe u. a. Bridger and Allen (2010); Bauer et al. (2013)); hierbei kann beispielsweise Überschusswärme oder Wärme aus «power-to-heat»-Anwendungen saisonal im Untergrund gespeichert und während der Heizperioden genutzt werden (z.B. Pilotprojekt Geospeicher Forsthaus Bern).

Zudem können Systeme zur künstlichen Grundwasseranreicherung einen thermischen Einfluss auf den Wärmehaushalt von Grundwasserleitern haben. So werden z.B. im Raum Basel verschiedene Grundwasseranreicherungssysteme für die Trinkwasserversorgung betrieben. In den Lange Erlen (Kanton Basel-Stadt) und im Hardwald (Kanton Basel-Landschaft) wird Rheinwasser, und in der Anreicherungsanlage im Unteren Birstal in Aesch (Kanton Basel-Landschaft) Wasser der Birs, zur künstlichen Grundwasseranreicherung versickert. Neben saisonalen Temperaturschwankungen des aus den Oberflächengewässern bezogenen Anreicherungswassers muss auch der Einfluss der Klimaerwärmung auf die Oberflächengewässertemperaturen im Hinblick auf die Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen Berücksichtigung finden (u.a. Epting et al. (2023); Epting et al. (2022)).

Auswirkungen von Klimaänderungen auf Grundwasserressourcen

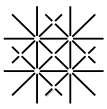
Der Klimawandel wird sowohl quantitative als auch qualitative Auswirkungen auf Grundwasservorkommen haben. Diese Auswirkungen unterscheiden sich für Grundwasservorkommen im Fels- und Lockergestein, urban oder ländlich geprägten Standorten sowie den vorherrschenden Prozessen der Grundwasserneubildung (Epting et al., 2020b).

Für ein Verständnis der Entwicklung zukünftiger Grundwassertemperaturen bedarf es einer differenzierten Betrachtung der geologischen Standortbedingungen und relevanten hydrogeologischen Prozesse, einschliesslich der Prozesse der Grundwasserneubildung, direkter anthropogener Einflüsse sowie möglicher positiver und negativer Rückkopplungen. Diese Grundlagen sind wesentlich, um die Reaktion von Grundwasservorkommen auf anthropogene Veränderungen und Einflüsse des Klimawandels zu verstehen.

⁶ Ground Water Heat Pump (Grundwasserwärmepumpe)

⁷ Aquifer Thermal Energy Storage (Thermische Energiespeicherung in Aquiferen)

⁸ Borehole Thermal Energy Storage (Thermische Energiespeicherung in Bohrungen)



Einerseits ist eine Kenntnis der charakteristischen Eigenschaften von Grundwasservorkommen notwendig, einschliesslich räumlicher Dimensionen und Grundwassererneuerungsraten. Andererseits ermöglicht die Bestimmung repräsentativer Schlüsselparameter (Aquifergeometrien, Speichereigenschaften, Grundwassererneuerungsraten und -verweilzeiten, etc.) sowie eine Kenntnis der Grundwasserneubildungsprozesse und der Temperaturprägung einen Vergleich aber auch Prognosen über die Sensitivität einzelner Grundwasservorkommen in Bezug auf den Klimawandel.

Anhang D fasst wesentliche Resultate des Hydro-CH2018 Zusatzmoduls «Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen» (Epting et al., 2020b) zusammen. Dabei ist ein Vergleich der charakteristischen hydraulischen und thermischen Randbedingungen verschiedener repräsentativer Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen im Mittelland, dem Jura und dem Alpenraum wesentliche Grundlage für die Ableitung der Übertragbarkeit auf Schweizer Grundwasservorkommen im Allgemeinen.

Ziel

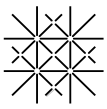
Im Rahmen der Studie werden auf Grundlage der verfügbaren Daten die Tiefenlagen und Temperaturen verschiedener Grundwasservorkommen in der Schweiz analysiert und ein Konzept für die Definition von «natürlichen» Grundwassertemperaturen vorgestellt.

Da eine Definition von «natürlichen» Grundwassertemperaturen für urbane Regionen aufgrund der bereits anthropogen erhöhten bodennahen Lufttemperaturen nicht auf den lokalen Lufttemperaturmessungen basieren kann, müssen für urbane Regionen die bodennahen Lufttemperaturen angrenzender repräsentativer (vergleichbare hydrogeologische Settings, vergleichbares lokales Klima, etc.) ländlicher Regionen herbeigezogen werden.

Ziel der Bearbeitung dieses Themenbereichs ist es entsprechend, **eine praxistaugliche Methodik zur Definition der natürlichen Grundwassertemperaturen für verschiedene Settings** aufzuzeigen, sodass damit gesetzlich relevante **Referenztemperaturen** festgelegt werden können.

3.4 Themenbereich 2: Definition Tiefengrundwasser

In der Schweiz ist der Begriff «unterirdische Gewässer» (Art. 4 Bst. b GSchG), welcher dreidimensional den Grundwasserleiter zusammenfasst, oben begrenzt durch die Deckschicht und unten sowie seitlich durch den Grundwasserstauer (maximal bis zur Unterkante des Stauers; grundsätzlich aber nur soweit in den Stauer hinein, wie es zum Schutz des Grundwassers erforderlich ist), gesetzlich festgelegt. In der Schweiz existiert derzeit allerdings keine rechtliche Unterscheidung zwischen oberflächennahen und tiefen «unterirdischen Gewässern», und somit keine klare rechtliche Unterscheidung zwischen oberflächennahem Grundwasser und Tiefengrundwasser. Im Gegensatz zur Schweiz kennt



die EU in ihrer Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beispielsweise eine gesetzlich bindende Abgrenzung und Beschreibung aller Grundwasservorkommen, einschliesslich der Tiefengrundwässer⁹.

Zur Konkretisierung des Schutzes und zur Anpassung und Anwendung der bestehenden Schutzkonzepte sowohl auf oberflächennahe wie auch auf Tiefengrundwasser, wurde bereits mehrfach vorgeschlagen, auch in der Schweiz angepasste Schutzkonzepte zu entwickeln und bestehende Vorschriften und Entscheidungshilfen (Richtlinien, Wegleitungen, Vollzugshilfen) den Verhältnissen des Tiefengrundwassers anzupassen (siehe z.B. Waber et al. (2015) und Burger (2016)).

Es gilt dabei zu beachten, dass die Kriterien für den Gewässerschutzbereich A₀ überall dieselben sind, sie gelten für Tiefengrundwasser im gleichen Masse wie für oberflächennahe Grundwasservorkommen. Ebenso gilt dies für die Vorschriften bezüglich Übernutzung und Verbindung/Vermischung verschiedener Grundwässer.

Eine Definition von Tiefengrundwasser könnte als Grundlage dienen, um einen Rechtsrahmen vorzubereiten, der zum Ziel hat, Tiefengrundwässer in Abhängigkeit ihrer räumlichen Lage und Qualität differenziert zu schützen und Nutzungs-Priorisierung planerisch konkretisiert und nachvollziehbar umzusetzen (siehe auch Themenbereich 3, Kapitel 3.3).

Gegenwärtig fehlen allerdings flächendeckende Kenntnisse über den tiefen geologischen Untergrund und die vorhandenen Ressourcen, einschliesslich der tiefen Grundwasservorkommen (Waber et al., 2015), was das Ausarbeiten einer Definition, die allen Verhältnissen in der Schweiz gerecht wird, erschwert. Entsprechend sind parallel dazu Strategien zur gebietsweisen Erkundung und zur Nutzung bzw. zum Schutz der Ressourcen im tiefen geologischen Untergrund zu entwickeln.

Ziel

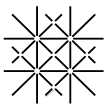
Im Rahmen der Studie werden auf Grundlage der verfügbaren Daten die Tiefenlagen und Temperaturen verschiedener Grundwasservorkommen in der Schweiz analysiert.

Ziel dieses Themenbereichs ist es, eine einfache Methodik zur **Abgrenzung oberflächennaher und tiefer Grundwasserressourcen** zu erarbeiten.

3.5 Themenbereich 3: Nutzbarkeit Tiefengrundwasser

In der Schweiz wird, rechtlich gesehen, nicht zwischen verschiedenartig nutzbaren Grundwasservorkommen (bspw. zwischen Thermal-, Heil-, Kühl-, Mineral- oder Badewasser) unterschieden. Eine rechtliche Unterscheidung gibt es zwar im Bereich der Qualitätsvorgaben und der erlaubten Aufbereitungsverfahren für verschiedenartige Nutzungen, diese Unterscheidung greift allerdings erst nach der Entnahme von Grundwasser. Dementsprechend gibt es rechtlich gesehen keine Differenzierung in der Schutzwürdigkeit von oberflächennahen und tiefen Grundwasserressourcen. Für eine

⁹ https://info.bml.gv.at/dam/jcr:27ccoaea-3e4b-4dd2-aod9-e627c29097de/Lage_und_Abgrenzung_von_Grundwasserkoerpern.pdf



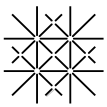
gesetzliche Konkretisierung der Nutzung von Tiefengrundwasser für geothermische Zwecke stellen sich daher folgende Fragen (verändert und ergänzt nach Waber et al. (2015)):

- Wird das für Trinkwasserzwecke geeignete Tiefengrundwasser vor einer Beeinträchtigung durch thermische Nutzungen durch die bestehenden, an oberflächennahen Grundwasservorkommen angepassten Gesetze ausreichend geschützt, und wenn ja: wie?
- Sollte eine generelle gesetzliche Grundlage für qualitätsbezogene Nutzungspriorisierungen (Qualität gut → Trinkwassernutzung; Qualität ungenügend → geothermische Nutzung) von Tiefengrundwasser geschaffen werden? Beispielsweise eine Kategorisierung, wie von Burger (2016) vorgeschlagen, die nach Qualität und Ergiebigkeit Tiefengrundwasser als nutzbar für Trinkwasser, Mineralwasser, Thermalwasser, industrielles Brauchwasser, landwirtschaftliches Brauchwasser oder für geothermische Zwecke einteilt.
- Wäre es möglich, für Tiefengrundwasser, welches sich nach bestehender Rechtsprechung nicht für Trinkwasserzwecke eignet, geltende Schutzbestimmungen so anzupassen, dass eine erweiterte thermische Nutzung erlaubt werden könnte, ohne dabei nicht verantwortbare Beeinträchtigungen der Ressource und des tiefen Untergrunds in Kauf nehmen zu müssen?

Ziel

Ziel der Bearbeitung dieses Themenbereichs ist es, die verschiedenen verfügbaren Kriterien zur Kategorisierung für Tiefengrundwasser aufzulisten (Themenbereich 2) und sie mit den geltenden Schutzbestimmungen sowie dem Konzept von Nutzbarkeitsparametern zu überlagern (Themenbereich 3).

Darauf basierend soll ein Konzept für die Unterscheidung von nutzbarem und nicht nutzbarem Tiefengrundwasser für die verschiedenen Nutzungsarten geprüft und, falls angemessen, erarbeitet werden (Stichwort: Definition verschiedener Nutzbarkeitsparameter; z.B. Skala von nutzbar als Trinkwasser über Mineral- /Thermal- / Badewasser bis hin zu rein geothermischen Nutzungen).



4 Recherche, Auswertungen & Konzepte

4.1 Recherche gesetzliche Rahmenbedingungen

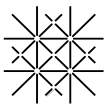
Dieses Kapitel umfasst eine Bestandesaufnahme bestehender gesetzlicher Rahmenbedingungen (Regeln/Kenntnisse/Beurteilungsverfahren), welche für die thermische Bewirtschaftung des Untergrundes gegenwärtig Verwendung finden. Die Recherche zu den gesetzlichen internationalen Rahmenbedingungen wurde vor allem Haehnlein et al. (2010) entnommen.

Zu den in der Schweiz vorherrschenden nationalen Gesetzen kommen Einführungsgesetze bzw. -verordnungen zum Gewässerschutzgesetz auf kantonaler Ebene hinzu. Hier haben wir uns zu einem Grossteil auf folgende Recherche von EnergieSchweiz in Zusammenarbeit mit den Gewässerschutzbehörden der Kantone gestützt: «Bewilligungsverfahren Grundwasserwärmenutzung in den Kantonen - Übersicht über die Bewilligungsverfahren für Grundwasserwärmenutzungen in den Kantonen» (energieschweiz, 2017). Diese Zusammenstellung bietet einen guten Überblick, aber es gibt auch Unklarheiten, die bei einer neuen Erhebung berücksichtigt werden sollten. So sollte unter anderem präzisiert werden, (1) ob es sich um geothermische Nutzungen mit Wiederversickerung handelt; (2) ob sich die aufgeführten ΔT -Werte auf die Entnahmetemperatur oder die natürliche Grundwassertemperatur in 100 m Abstrom beziehen und (3) ob die Kantone die Auswirkungen der Gesamtheit der Nutzungen auf das Grundwasser in irgendeiner Weise berücksichtigen.

International

Ziel der Studie von Haehnlein et al. (2010) war es, einen umfassenden Überblick über den aktuellen internationalen Rechtsstand zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie zu geben. Dazu wurde eine internationale Umfrage mittels eines Fragebogens durchgeführt, der an mehr als 60 Länder weltweit verschickt wurde. In dem Fragebogen wurden Informationen über die entsprechenden nationalen Gesetzgebungen, Temperaturgrenzen und Mindestabstände für GSHP- und GWHP-Systeme (siehe Kapitel 3.3) abgefragt. Die Antworten auf die Umfrage zeigten ein äusserst heterogenes Ergebnis. Nationale und rechtsverbindliche Regelungen gibt es bisher nur in wenigen Ländern wie Dänemark oder Schweden. Alle bestehenden Vorschriften zeigen eine grosse Bandbreite bei den Temperaturgrenzwerten für Grundwasser. Die grösste Uneinheitlichkeit wurde bei der zulässigen Temperaturänderung festgestellt, die von 3 °C in der Schweiz bis zu 11 °C in Frankreich reicht (Tab. 1). In den meisten Ländern gibt es jedoch keine rechtsverbindlichen Vorschriften oder gar Leitlinien.

Teilweise sind die Daten dieser Studie nicht mehr aktuell. Dies verdeutlicht, dass auch andere Länder derzeit nach Lösungen suchen, um die thermische Nutzung des Untergrundes zu regeln. So gilt in Frankreich für «géothermie de minime importance» aktuell ein Grenzwert von 4 °C in einer Distanz von 200 m mit maximaler Einleittemperatur von 32 °C. Die Schwellenwerte in Österreich und in Deutschland sind nicht bindend, die Kompetenz liegt jeweils bei den Bundesländern für welche z.T. unterschiedliche Regeln existieren. Auch in Grossbritannien existieren unterschiedliche Regeln für die verschiedenen Länder (England, Wales, Schottland, Nordirland).



Country	Temperature difference [\pm K]	Temperature maximum [$^{\circ}$ C]	Temperature minimum [$^{\circ}$ C]
Austria	6 ^a	20 ^a	5 ^a
Denmark	-	25 ^a	2 ^a
France	11 ^a	-	-
Germany	6 ^b	20 ^b	5 ^b
Great Britain	10 ^b	25 ^b	-
Liechtenstein	-3/+1.5 ^a	-	-
Netherlands	-	25 ^a	5 ^a
Switzerland	3 ^a	-	-

^a Legally binding.

^b Recommended.

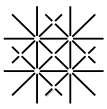
Tab. 1 Internationale Schwellenwerte der Grundwassertemperatur für offene geothermische Systeme (Haehnlein et al., 2010).

Kantone

Im Folgenden werden die wesentlichen Resultate zusammengefasst, welche im Auftrag der Recherche von EnergieSchweiz (energieschweiz, 2017) zusammengetragen worden sind.

In den meisten Kantonen bedarf es einer Konzession für Grundwasserentnahmen, welche teilweise von der Entnahmerate abhängig gemacht wird (LU, ZG). Auch ist die Zuständigkeit der jeweiligen Behörde (Kanton/Gemeinde) teilweise abhängig von der Entnahmemenge (BE, LU). Gesuche für Grundwasserwärmenutzungen müssen je nach Kanton entweder beim Kanton oder der Gemeinde eingereicht werden. In einzelnen Kantonen werden obere und/oder untere Grenzwerte bezüglich Entnahmerate definiert, welche auch die Konzessionspflicht beeinflussen (siehe oben). So werden z.B. in einigen Kantonen für Wärmenutzungen Mindestgrössen (50 - 150 kW) vorgegeben, welche oft auch mit Entnahmeraten gekoppelt sind. Im Kanton NW ist die thermische Nutzung über eine zulässige Temperaturdifferenz gegenüber der Entnahmetemperatur des Grundwassers begrenzt (meist 4 $^{\circ}$ C).

Bei der Auslegung der zulässigen Temperaturspannung (ΔT) wird im Bewilligungsverfahren gelegentlich unterschieden, ob die Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken erfolgt. In einigen Kantonen ist eine Wärmeentnahme aus dem Grundwasser in der Regel kein Problem und ein Wärmeeintrag in das Grundwasser nur in sehr eingeschränktem Umfang zulässig (je nach Ort ist ein Wärmeeintrag gar nicht mehr zulässig; ZH). Zudem werden bei geplanten Nutzungen, welche mit einem Wärmeeintrag einhergehen weitergehende hydrogeologische Abklärungen verlangt (z.B. Kanton SG und VS). Im Kanton UR wird grundsätzlich beim Wärmeentzug des Pumpwassers ein ΔT von - 4 $^{\circ}$ C und beim Wärmeeintrag ein ΔT von + 3 $^{\circ}$ C vorgegeben. Auch im Kanton NW werden bei einem Wärmeentzug aus dem Grundwasser z.T. höhere Temperaturdifferenzen akzeptiert, wobei solche Nutzungen im Kanton bisher eher selten sind. In den Kantonen ZG, SH, AG und NE sind die Konzessionsgebühren bei einem Wärmeeintrag in das Grundwasser höher. Im Kanton SO darf unabhängig von der Nutzungsart ein ΔT von 4 $^{\circ}$ C nicht überschritten werden. In Basel-Stadt darf ΔT , je nach Rückgabeort (Oberflächengewässer oder Grundwasser) unterschiedlich sein. Für die Rückgabe in das Grundwasser sind ΔT von + 3 $^{\circ}$ C üblich, für Heizzwecke werden hingegen auch ΔT von - 5 $^{\circ}$ C bewilligt (Die Grundwassertemperaturen in BS sind anthropogen erhöht, siehe auch Epting et al. (2013) und Epting and Huggenberger (2013)). Im Kanton TG ist grundsätzlich kein Wärmeeintrag in Grundwasservorkommen, welche der Trinkwasserversorgung dienen, möglich.



Einzelne Kantone formulieren weitere Vorgaben / Richtlinien, für welche hydrogeologische Parameter abgeklärt werden müssen (z.B. Aquifer Geometrien, Grundwasserfließregime, einschliesslich Grundwasserfließgeschwindigkeiten, -richtung, -bilanzen, Wassertemperatur, Wasserspiegel, hydraulische Durchlässigkeit, Wasserchemie, etc.). Dies umfasst unter anderem die Durchführung von Sondierbohrungen mit Pump- und Versickerungsversuchen (z.B. ZH, UR, SH). Insbesondere bei grösseren Kühlwassernutzungen sind die thermischen Auswirkungen zu modellieren (z.B. BE, SO, BS, BL) und der Nachweis zu erbringen, dass keine bestehenden Anlagen negativ beeinflusst werden (z.B. AG) oder belastete Standorte betroffen sind (z.B. JU). Der Kanton NE verlangt zusätzlich die Errichtung einer Grundwasserbeobachtungsstelle unterhalb des Rückgabebrunnens.

Für die meisten Kantone existieren Grundwasserwärmenutzungskarten, welche zeigen, wo eine Grundwasserwärmenutzung zulässig ist (z.B. ZH, BE, UR, SZ, OW, NW, ZG, SO, BS, SH, SG, GR, AG, TI). Nur für einige Kantone sind die Fassungsstandorte (inkl. Versickerung) auf öffentlich zugänglichen Karten ersichtlich (z.B. ZH, UR, SZ, ZG, SO, SG, GR, AG, TI).

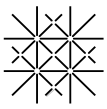
Nur ca. die Hälfte aller Kantone führt eine Statistik darüber, wie viele Grundwasserwärmenutzungen für Heizen und Kühlen jährlich erstellt werden. In einzelnen Kantonen (z.B. ZH, BS, VS, ZG) existieren weiterführende Planungshilfen/Merkblätter/Richtlinien/Wegleitungen/Vollzugshilfen, etc. und Grundwassermodelle, mit welchen auch der Wärmetransport simuliert werden kann.

4.2 Erweiterung der Datengrundlagen

Wichtigste Datengrundlage für die Definition natürlicher Grundwassertemperaturen oder Referenztemperaturen sind Messungen von Grundwassertemperaturen im Untergrund. In [Anhang A](#) werden die verwendeten Datengrundlagen zusammengestellt. [Anhang B & C](#) beinhalten weitergehende Informationen zu einzelnen verwendeten Datengrundlagen der Swisstopo und Nagra. Im Folgenden werden ein kurzer Überblick über die wichtigsten Datengrundlagen und das Vorgehen für die Kompilation der Daten im Rahmen unserer Arbeiten gegeben.

NAQUA-QUANT

Im Rahmen des QUANT-Moduls wird die Menge des Grundwassers in charakteristischen Grundwasservorkommen der Schweiz anhand der Grundwasserstände und Quellabflüsse von der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA aufgezeichnet. Gleichzeitig erfolgt an diesen Messstellen eine kontinuierliche Aufzeichnung der Wassertemperatur, der elektrischen Leitfähigkeit und teilweise der Trübung. Die 91 aktuellen Messstellen des QUANT-Moduls werden jeweils zur Hälfte vom Bund und von den Kantonen bzw. Wasserversorgungen betrieben. Bei 78 Messstellen findet eine kontinuierliche Temperaturmessung statt, für welche der Mittelwerte berechnet und in die neue Datenbank «Swiss Geotemperature Compilation – SGC» (siehe unten) aufgenommen wurden.



Datenbank BDF-Geotherm

Das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) beauftragte das Centre de Recherche en Géothermie (CREGE) in Neuenburg, die hydrochemischen Eigenschaften geothermischer Fluide in der Schweiz zu erfassen. Die Ergebnisse wurden in einer MS Access-Datenbank (BDF-Geotherm) und einem beschreibenden Bericht zusammengefasst (Sonney and Vuataz, 2007). Die Datenbank enthält Temperatur- und hydrochemische Daten von 82 Standorten mit insgesamt 203 analysierten Wasserproben, die teilweise in unterschiedlichen Tiefen gesammelt wurden. 68 dieser Standorte befinden sich in der Schweiz und 65 enthalten Daten aus Brunnen. Einige der Messungen stammen nicht aus Brunnen, sondern aus Stollen, Tunneln, und Quellen.

Ein Defizit der Datenbank BDF-Geotherm besteht darin, dass der Grundwasserleitertyp, aus der die Wasserproben entnommen wurden, nicht angegeben ist. Zwar gibt es ein Datenattribut «Formation», dieses ist aber nicht spezifisch genug, um die Wasseranalysen mit anderen Aquifer-spezifischen Wasseranalysen aus der Literatur zu vergleichen. Zudem wurde die Datenbank seit ihrer Entstehung weder aktualisiert noch ist sie seit der Auflösung des CREGE Instituts öffentlich zugänglich.

Swisstopo-Datenbank

Die Swisstopo führt eine Bohr-Datenbank, die auf dem Geodaten Viewer map.geo.admin.ch verfügbar ist (Layer «Tiefe Bohrungen») und Informationen für 182 Brunnen umfasst (Stand des publizierten Layers: 16.03.2023). Die Daten von 27 dieser Brunnen sind frei, 155 nur eingeschränkt zugänglich. Vorhandene Informationen beziehen sich prinzipiell auf geografische und rechtliche Aspekte. An einzelnen Standorten sind Temperaturdaten mit Tiefenangabe vorhanden. Zusätzlich sind Quellenangaben zu Bohrprofilen und Berichte aufgelistet.

«Thermal Alpine Springs»-Datenbank

Die «Thermal Alpine Springs» Datenbank von (Luijendijk et al., 2020a; b) umfasst thermale Informationen zu 958 thermischen Quellen aus dem Alpenraum, wobei 78 Quellen aus der Schweiz zu finden sind. Zum Teil überschneiden sich diese Informationen mit denen aus BDF-Geotherm und der swisstopo, aber Angaben zu weiteren Standorten sind ebenfalls vorhanden.

Neue Datenbank «Swiss Geotemperature Compilation – SGC»

Für unsere Analyse haben wir die Datenbank «Swiss Geotemperature Compilation–SGC» entwickelt, welche auf einer Zusammenstellung von Informationen aus den obengenannten Quellen sowie den Daten der Nagra und aus einer Arbeit von Vollmayr (1983) basiert ([Abb. 2](#)).

Die Datenbank SGC ist in Form einer Tabelle als CSV-Datei strukturiert. Die Gestaltung ermöglicht es, die Herkunft der Daten nachzuverfolgen und sie durch Informationen aus verschiedenen Quellen zu ergänzen. Aufgrund unterschiedlicher Zielsetzungen der Autoren der Ursprungsdaten weist die

Datenbank Unterschiede in Auflösung und Inhalt auf. In der Analyse stehen die X-, Y-Koordinaten, die Tiefe sowie die Temperaturen im Fokus. Für Zeitreihen wurden Minima-, Maxima- sowie Durchschnittstemperaturwerte und Standardabweichungen berechnet, während für Temperaturprofile die Temperaturen in verschiedenen Tiefen erfasst wurden.

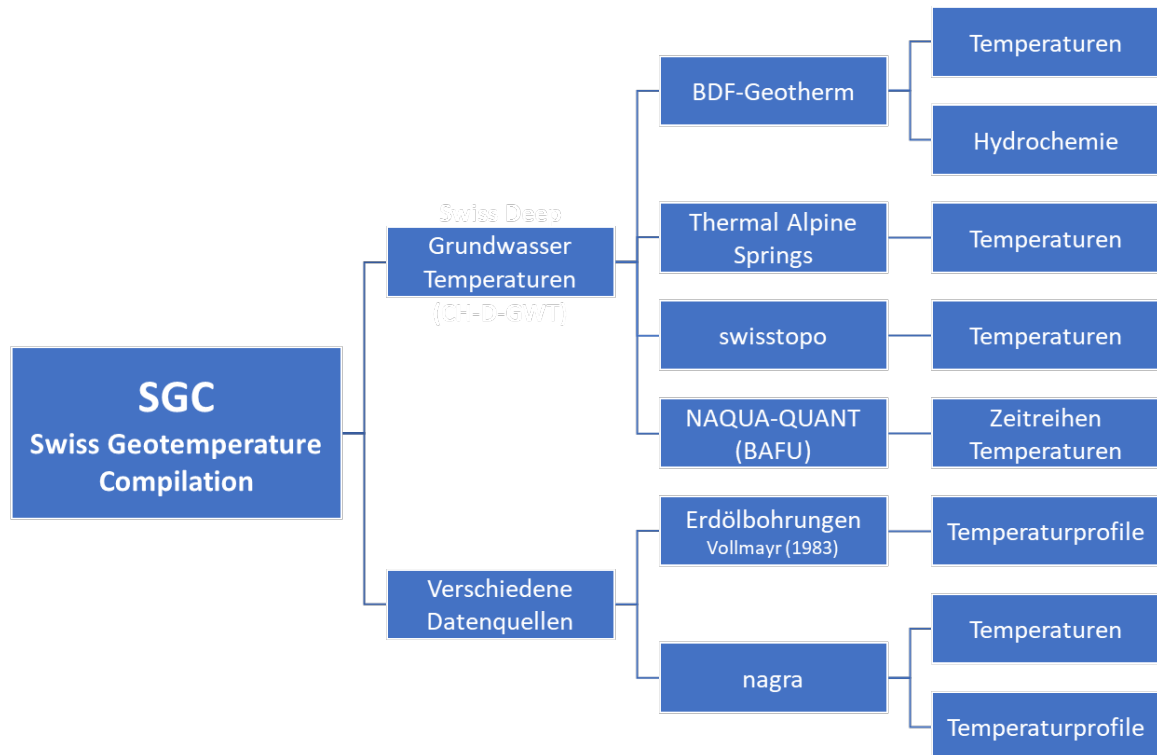


Abb. 2 Zusammenstellung aus unterschiedlichen Datengrundlagen für die Swiss Geotemperature Compilation SGC (siehe auch [Anhang A](#)).

Gegenwärtig sind in SGC für 476 Standorte Temperaturdaten, einschliesslich 84 Standorte mit Variabilität (aus Zeitreihen mit kontinuierlichen Temperaturaufzeichnungen) und 8 Temperaturtiefenprofile, enthalten und werden weiterhin ergänzt. Die Auswertungen und Darstellungen (Diagramme & Karten) der Daten wurden mithilfe von Python durchgeführt. [Abb. 3](#) zeigt maximale aufgezeichnete Grundwassertemperaturen in Bohrlöchern respektive Grundwassermessstellen.

4.3 Definitionen & Konzepte Referenztemperaturen

Im Folgenden werden zuerst mögliche Definitionen von Referenztemperaturen für oberflächennahe Grundwasserressourcen in ländlichen und urbanen Gebieten sowie für Tiefengrundwasserleiter vorgestellt und die Auswirkungen von Klimaänderungen auf diese Referenztemperaturen für verschiedene Settings der Schweiz diskutiert. Anschliessend werden Konzepte vorgestellt, mittels welchen die situationsangepassten Referenztemperaturen praxistauglich eruiert werden können.

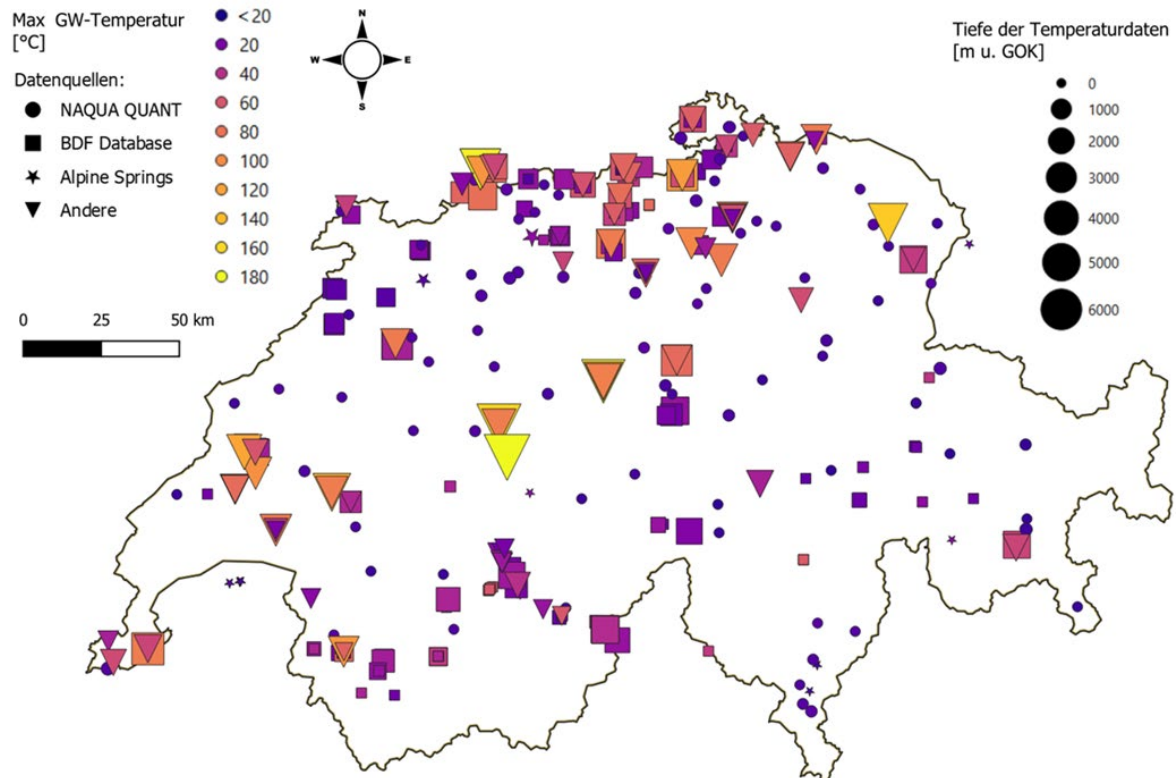


Abb. 3 Übersicht der aktuellen Datengrundlage der Grundwassertemperaturen, dargestellt ist die maximale gemessene Grundwassertemperatur im Bohrloch respektive der Grundwassermessstelle (Datengrundlagen siehe Anhang A).

4.3.1 Definitionen Referenztemperaturen

Oberflächennahe Grundwasserressourcen

Eine Zusammenstellung der oberflächennahen Grundwassertemperaturen, welche im Rahmen von NAQUA-QUANT für die verschiedenen Grundwasserleitertypen (Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz; BAFU, 2009) erhoben werden, ist in [Abb. 4](#) dargestellt. Die bewusste Auswahl dieser Datenquelle begründet sich dadurch, dass diese Messstellen Grundwasser aus Tiefen kleiner als 100 m beproben und diese Temperaturen über längere Zeiträume (mehrere Jahre) gemittelt werden können.

Die Temperaturmittelwerte des Grundwassers in den oberflächennahen Poren/Lockergesteinen liegen tendenziell über jenen in den Karst- und Kluft-Grundwasserleitern. Einen bedeutenden Einfluss hat dabei, dass bis auf wenige Ausnahmen, Lockergesteinsaquifere in Tälern und tiefer gelegenen Regionen zu finden sind. Die bodennahe Lufttemperatur ist in den Talbereichen entsprechend erhöht und beeinflusst entsprechend die Grundwassertemperatur. Zusätzlich sind topografische Senken meist Exfiltrationszonen des Grundwassers (Stichwort: regionale Grundwasserzirkulation; Anhang E), was auch mit einer Wärmezufuhr aus tieferen Bereichen verbunden sein kann.

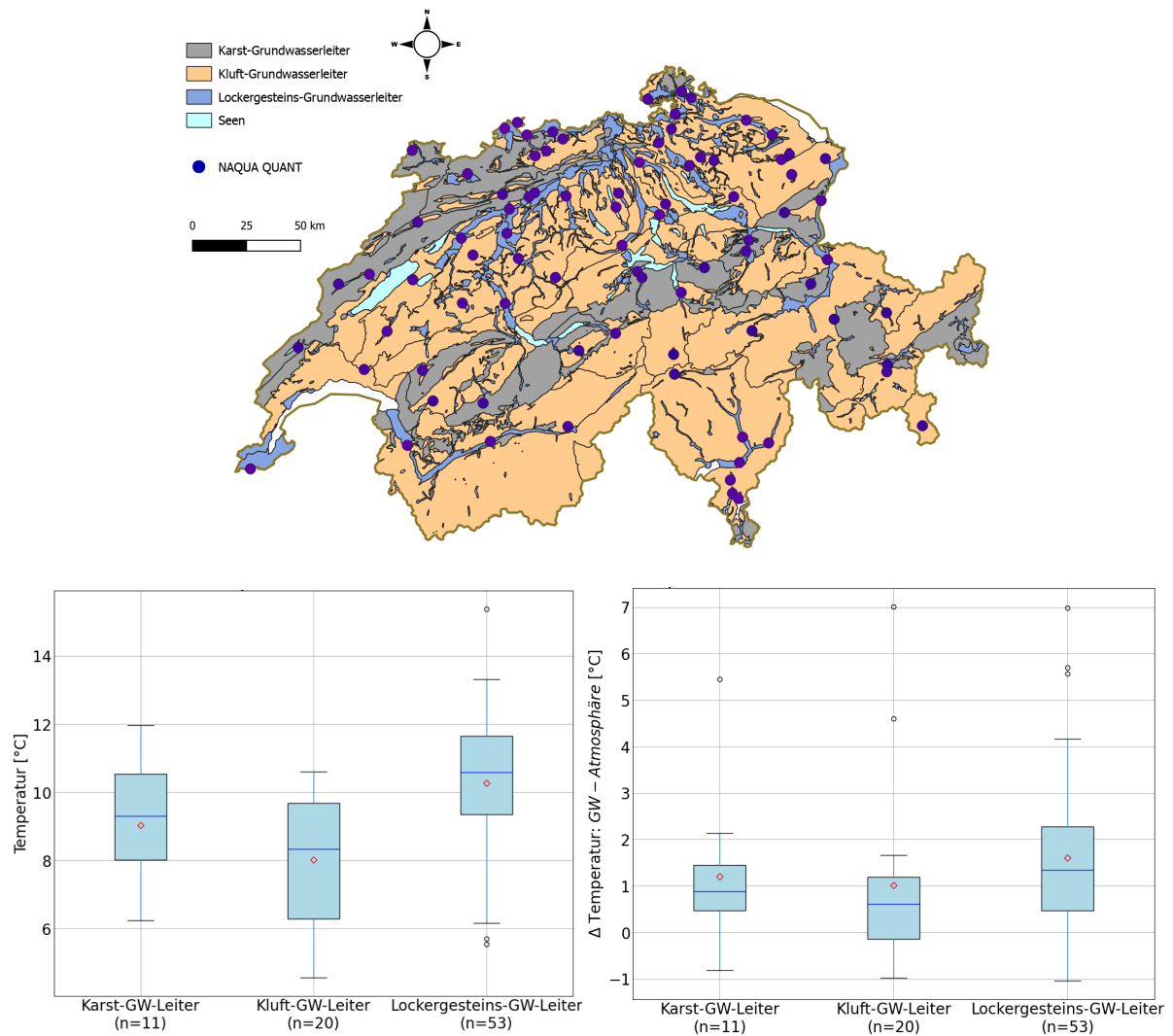


Abb. 4 Oben: Standorte Grundwassertemperaturdaten des Moduls NAQUA-QUANT dargestellt auf der Karte der Grundwasserleitertypen (Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz; BAFU, 2009). Unten links: Gemittelte Grundwassertemperaturen an den NAQUA-QUANT Stationen (bis 82 m Tiefe) gruppiert nach Grundwasserleitertyp¹⁰. Unten rechts: Abweichung zwischen gemittelter Grundwassertemperatur und mittlerer Lufttemperatur gruppiert nach Grundwasserleitertyp. Der arithmetische Mittelwert ist mit rotem Rhombus und der Median mit blauem Balken dargestellt.

Die oberflächennahen Grundwassertemperaturmessungen des Moduls NAQUA-QUANT wurden in Bezug zu den bodennahen Lufttemperaturen in der Schweiz (Klimanormwerte T_{norm} ; 30-jähriges Mittel für den Zeitraum von 1991 bis 2020; [Abb. 5](#) und [Abb. A1 Anhang A](#)) gesetzt. Vergleichsweise geringere Temperaturunterschiede zwischen bodennahen Luft- und Grundwassertemperaturen in

¹⁰ Da diese Analyse den Grundwasserleitertyp nicht in 3-D und die Tiefe berücksichtigt, ist zu berücksichtigen das innerhalb der 82 m Tiefe einzelne Messstellen durchaus auch in anderen Grundwasserleitertypen liegen können.

Karstgrundwasserleitern lassen sich durch atmosphärische Einflüsse und schnelle Fließwege von der Oberfläche in die Tiefe erklären. Größere Temperaturunterschiede in den Kluftgrundwasserleitern könnten durch verschiedene Effekte erklärt werden, wie z.B. den Einfluss von aufsteigendem Tiefengrundwasser, aber auch durch längere Verweilzeiten. Die größere Variabilität der Temperaturen in den Lockergesteinsgrundwasserleitern deutet auf eine standortspezifische Mischung aus Infiltration und Exfiltration von Oberflächenwasser, den Einfluss von Tiefengrundwasser und anthropogener Einflüsse in städtischen Gebieten hin.

In **Abb. 5** ist die Differenz zwischen der am jeweiligen Standort gemessenen Grundwassertemperatur (Datengrundlage SGC) und den lokalen bodennahen Lufttemperaturen (Klimanormwerte T_{norm} ; 30-jähriges Mittel für den Zeitraum von 1991 bis 2020) in Abhängigkeit der Tiefe dargestellt.

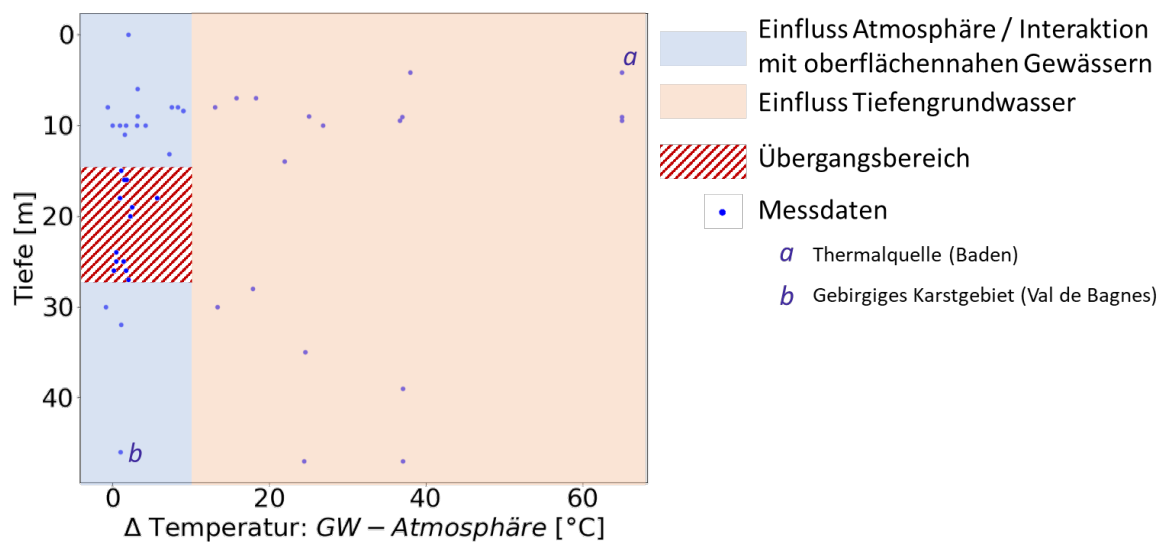
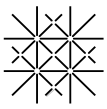


Abb. 5 Differenz zwischen der am jeweiligen Standort gemessenen Grundwassertemperatur (Datengrundlage SGC) und den bodennahen Lufttemperaturen in der Schweiz (Klimanormwerte T_{norm} ; 30-jähriges Mittel für den Zeitraum von 1991 bis 2020) in Abhängigkeit der Tiefe bis 50 m. Beispielhaft sind für die extremsten Ausreisser a und b die konkreten Standorte und Systeme genannt.

In den ersten 5 bis 15 m Tiefe sind teilweise sehr grosse (> 60 °C) Temperaturunterschiede zu beobachten, die nicht auf den Einfluss der bodennahen Lufttemperaturen, sondern wahrscheinlich auf aufsteigendes Tiefengrundwasser (z.B. Thermalquellen) zurückzuführen sind.

Von ca. 15 m bis 25 m Tiefe ist ein nicht klar abgrenzbarer Übergangsbereich zu erkennen; wobei ab größeren Tiefen tendenziell höhere Grundwassertemperaturen beobachtet werden können. Wir interpretieren, dass in diesem Übergangsbereich (**Abb. 1**), Einflüsse von saisonalen schwankenden oberflächennahen Faktoren (anthropogen, Sonneneinstrahlung, Oberflächengewässer, Locker-



gesteinsgrundwasserleiter usw.) und mitteltiefen/tiefen eher stabilen Faktoren (basaler Wärmefluss, tiefe Grundwasserzirkulation) aufeinandertreffen.

Generell gehen wir davon aus, dass Temperaturunterschiede von mehr als 10 °C über der bodennahen Lufttemperatur auf aufsteigendes Tiefengrundwasser (z.B. Thermalquellen) zurückgeführt werden können.

Konklusion

Eine klare tiefenbezogene Abgrenzung charakteristischer Grundwassertemperaturen für die unterschiedlichen Grundwasserleitertypen ist schwierig bis unmöglich.

In Regionen ohne signifikanten Einfluss von Fluss-Grundwasserinteraktionen, Karst und aufstossendes Tiefengrundwasser können für oberflächennahe Grundwasserressourcen (bis ca. 25 m), für anthropogen wenig bzw. unbeeinflusste Grundwasserleiter, jährliche Mittelwerte der bodennahen Lufttemperatur als natürliche Grundwassertemperatur herangezogen werden.

Tiefengrundwasserleiter

Im Rahmen der Studie wurden auf Grundlage der Grundwassertemperaturmessungen (Datengrundlage SGC; Tiefen grösser als 25 m) mittlere geothermische Tiefengradienten berechnet (Gleichung 1) und eine aktuelle Interpolation des Wärmestroms im tieferen Untergrund vorgenommen.

$$\text{Mittlerer Gradient} = \frac{dT}{dz} * 100 = \frac{GW\text{Temperatur} - \text{Klimanormwert}}{\text{Tiefe}} * 100 \quad \text{Gleichung 1}$$

Vorhandene Grundwassertemperaturdaten (Datengrundlage SGC) für Tiefen grösser als 25 m sind in [Abb. 6](#) dargestellt. Die errechnete Trendline aller Daten ergibt folgende Funktion (Gleichung 2):

$$T(z) = 0.0298 * z + 16.62 [^{\circ}\text{C m}^{-1}] \text{ mit } R^2=0.8 \quad \text{Gleichung 2}$$

Als erste Referenz wird auch der geothermische Gradient von 3 °C pro 100 m gezeigt (Gleichung 3). Die entsprechende mittlere Oberflächentemperatur von 7.5 °C wurde auf Basis von Temperaturdaten der letzten Klimanormwerten (T_{norm}) an den jeweiligen Standorten errechnet.

$$T(z) = 0.03 * z + 7.5 [^{\circ}\text{C m}^{-1}] \quad \text{Gleichung 3}$$

Als zweite Referenz wird der errechnete geothermische Gradient für die Bohrung in Basel gezeigt (Gleichung 4).

$$T(z) = 0.03547 * z + 16.5 [^{\circ}\text{C m}^{-1}] \text{ mit } R^2=0.98 \quad \text{Gleichung 4}$$

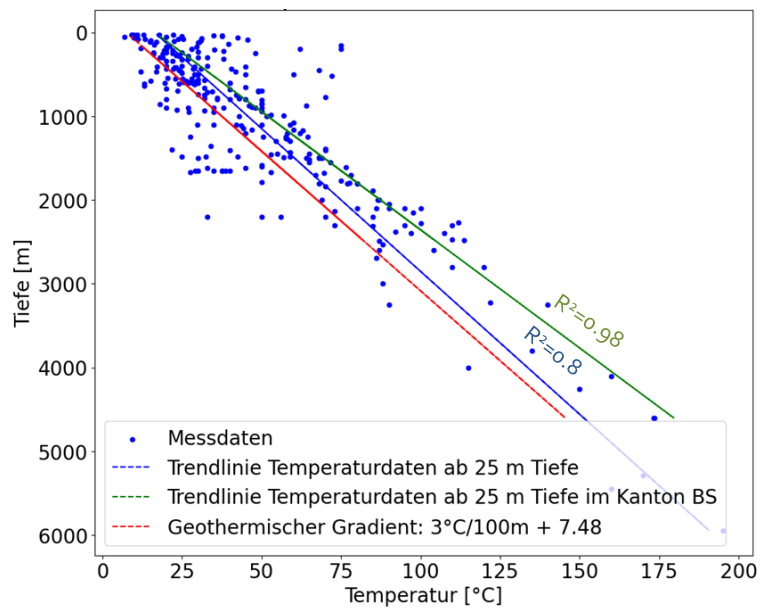


Abb. 6 Darstellung der Grundwassertemperaturdaten in Tiefen ab 25 m und errechnete Trendline (blau). Als Referenz: geothermischer Gradient von 3 °C pro 100 m (rot) und Gradient für die Bohrung in Basel (grün).

Während für oberflächennahe Grundwassertemperaturen die kartierten Grundwasserleitertypen von Nutzen sind (Abb. 4), muss besonders bei Temperaturdaten aus grösserer Tiefe (>200 m) auf die tektonische Grosseinheit Bezug genommen werden. In Abb. 7 sind die dazu gruppierten Einheiten mit den Standorten der Temperaturdaten dargestellt. Die Boxplots stellen die statistische Verteilung mittlerer Temperaturgradienten in Tiefen grösser als 200 m in der jeweiligen grosstrukturellen Einheit dar. Gesamthaft ist eine Streuung der Temperaturgradienten um bis zu einer Grössenordnung zu erkennen, wobei die Mediane im üblichen Bereich zwischen 2 und 4 °C pro 100 m liegen. Temperaturgradienten grösser 4 °C pro 100 m ergeben sich im Oberrheingraben sowie im Tafel- und Faltenjura, wobei die Streuung der Temperaturgradienten im Faltenjura besonders hoch sind. Im alpinen Kristallin sind mehrere Thermalquellen erfasst, bei welchen die Temperaturgradienten besonders hoch sind. Im Molassebecken liegt der Durchschnitt der Temperaturgradienten im Bereich von 3.5 °C pro 100 m, jener in den Alpen Sedimentgesteinen im Bereich von rund 3 °C pro 100 m. Im Bereich des Helvetikums, an der nördlichen Alpenfront, werden höhere Temperaturgradienten beobachtet, wobei die Datenlage für das Penninikum (n=9) und Ostalpin (n=2) für den Vergleich nicht repräsentativ genug ist.

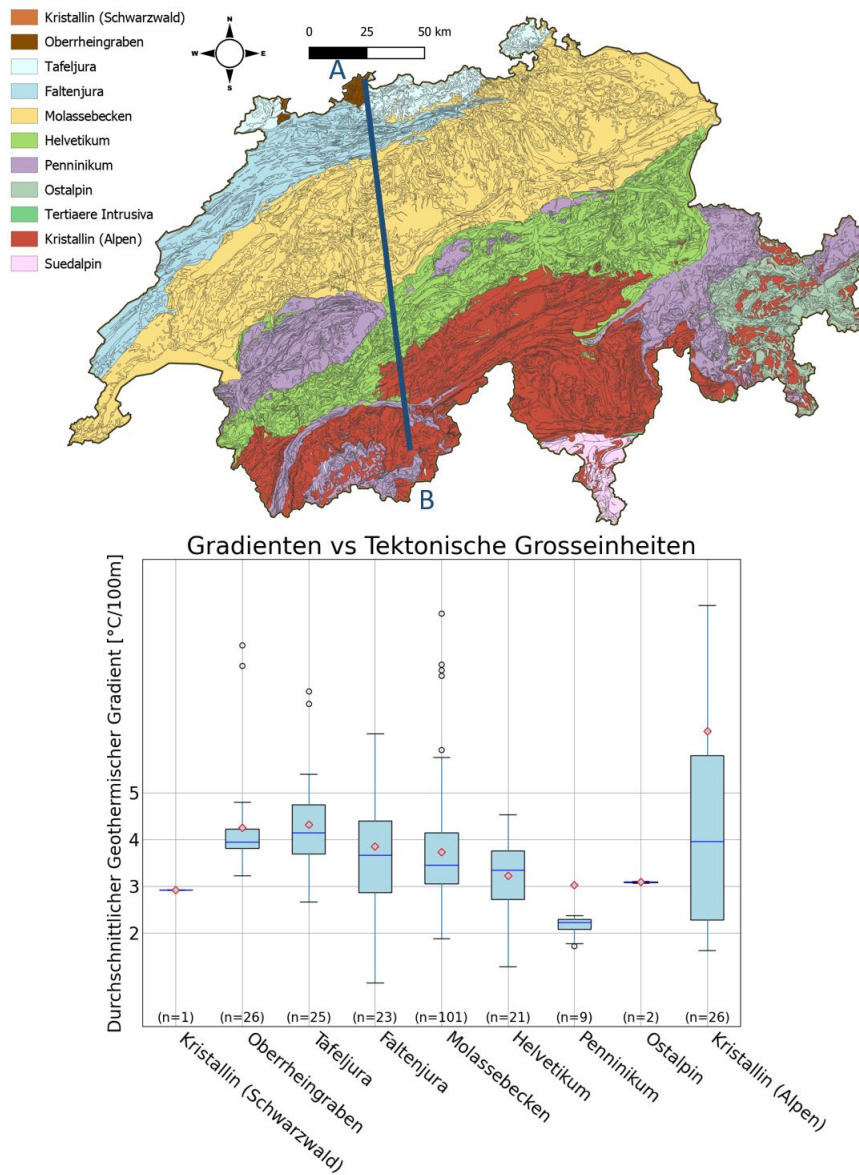


Abb. 7 Oben: tektonische Grosseinheiten (Grundlage: Geologische Karte der Schweiz 1:500'000; Linie: Profilspur [Abb. 9](#)). Unten: Mittlere Temperaturgradienten von 236 Standorten in den verschiedenen tektonischen Grosseinheiten. Der arithmetische Mittelwert ist mit rotem Rhombus und der Median mit blauem Balken dargestellt.

Eine Übersicht des Wärmestroms im tieferen Untergrund ist in [Abb. 8](#) dargestellt. Für die Karte wurden, basierend auf der Interpolation von Medici and Rybach (1995), Wärmestrom-Isolinien der Geothermischen Karte der Schweiz (1982) komplettiert und bis an die Grenzen der Schweiz. In der Schweiz befinden sich Gebiete mit hohem Wärmefluss in den Regionen Basel und im Unteren Aaretal, in der Bodenseeregion sowie beim Jungfraumassiv. Der Wärmestromkarte überlagert sind mittlere Temperaturgradienten (Datengrundlage SGC). Erwartungsgemäss korrelieren die Temperaturgradienten (Datengrundlage SGC) mit dem von Medici and Rybach (1995) abgeleiteten Wärmestrom, da

dieser als Funktion des Temperaturgradienten (damalige Datengrundlage) und konduktiven Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen geologischen Einheiten berechnet wurde (Gleichung 5).

$$\text{Wärmestrom } (q) = \frac{dT}{dz} * K \quad \text{wo } K = \text{konduktive Wärmeleitfähigkeit} \quad \text{Gleichung 5}$$

Abb. 9 zeigt ein schematisches topografisches Längsprofil zwischen Basel und dem Wallis und fasst verschiedene thermische Parameter für Tiefengrundwasser zusammen. Darüber hinaus werden die tektonischen Grosseinheiten in Zusammenhang mit schematisch dargestellten regionalen, Topographie-induzierten Grundwasserfliesspfaden dargestellt. Auf der Grundlage der Temperaturdaten und allgemeiner Wärmetransportkonzepte kann eine potentielle Isotherme um 40 °C interpretiert werden. Dieser Übergang dient zur Illustration der verschiedenen thermischen Einflussfaktoren, einschliesslich des geothermischen Tiefengradienten, der bodennahen Lufttemperaturen und der topographiebedingten Grundwasserfliesspfade.

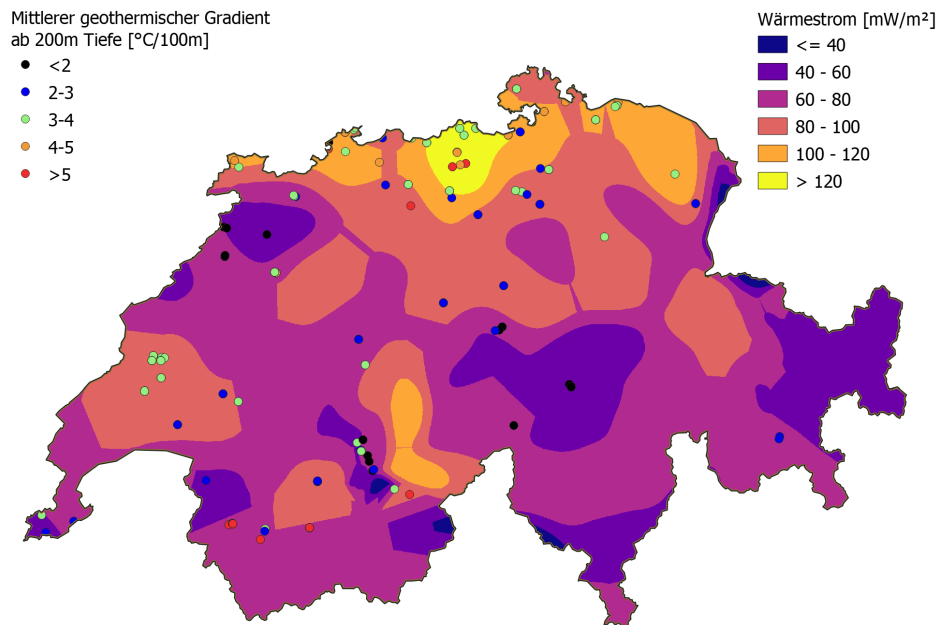


Abb. 8 Wärmestrom (verändert nach Geothermische Karte der Schweiz 1:500000; swisstopo, SGPK)

Die Topografie hat einen deutlichen Einfluss auf lokale geothermische Gradienten, womit auch der davon abgeleitete basale Wärmestrom lokal stark beeinflusst wird. Zur Herleitung lokaler Referenztemperaturen ist es daher wichtig, den Beobachtungsmassstab entsprechend der Fragestellung zu wählen.

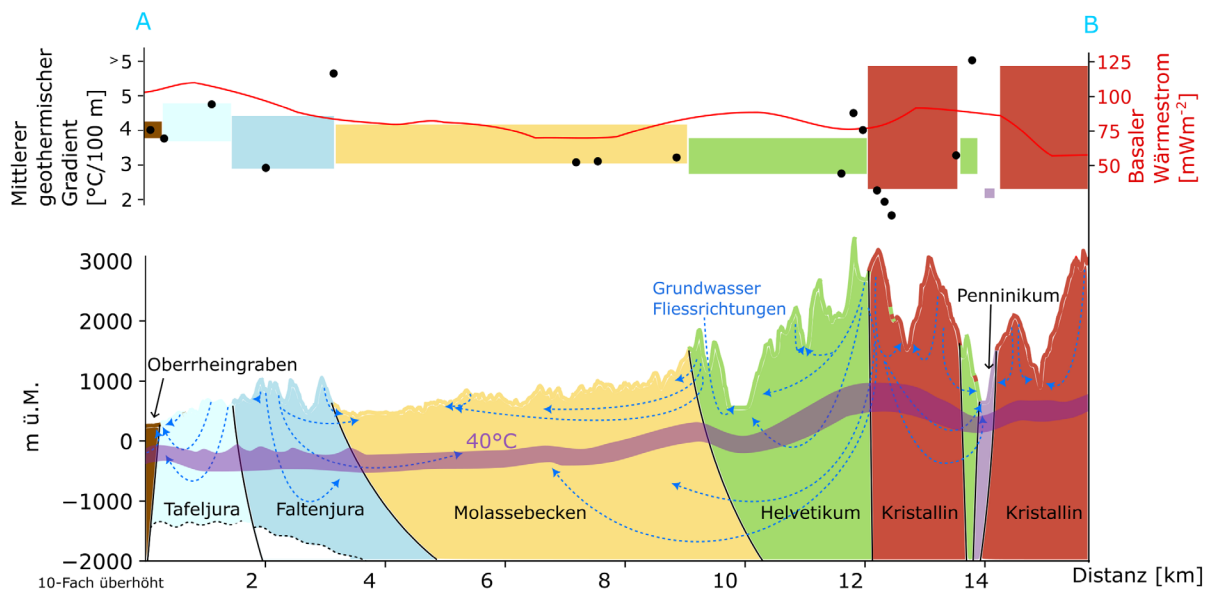


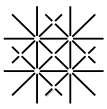
Abb. 9 Verschiedene thermische Parameter entlang eines schematischen topografischen Längsprofils zwischen Basel und dem Wallis im Zusammenhang mit den tektonischen Grosseinheiten. Oben: Mittlerer geothermischer Tiefengradient (berechnet aus Temperatur-Tiefenverhältnissen aus SGC, schwarze Punkte stellen existierende Messungen im Abstand bis 15 km vom Profil dar) sowie Verlauf des interpolierten basalen Wärmestroms (rote Linie); Die Dimension der Rechtecke für die entsprechende grosstektonische Einheiten beschreiben die statistische Verteilung der Datengrundlagen vom 1. bis 3. Quartil (**Abb. 7**) in der Schweiz. Unten: Schematisch dargestellte regionale, Topographie-induzierte Grundwasserfließspfade und interpretierte 40 °C-Isotherme (Profilspur **Abb. 7**).

Konklusion

Eine klare tiefenbezogene Abgrenzung charakteristischer Grundwassertemperaturen für unterschiedliche tektonische Grosseinheiten ist schwierig bis unmöglich.

Basierend auf den vorhandenen Daten kann für **Grundwasserleiter mit Tiefen geringer als 2'000 m keine einfache Faustregel für eine Abschätzung der Referenztemperatur vorgenommen werden**, da sich hier der Einfluss von geothermischen Tiefengradienten mit Grundwasserfließeffekten zu überlagern scheinen. Entsprechend müssen für solche Tiefengrundwässer grundsätzlich **direkte Temperaturmessungen und standortspezifische Daten zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen** erhoben und zusammengeführt werden.

Für **Grundwasserleiter ab einer Tiefe von 2'000 m** kann als erste Näherung von unbeeinflussten bzw. natürlichen Grundwassertemperaturen eine Kombination aus **regionalen geothermischen Tiefengradienten und des Wärmestroms** als Grundlage für die Definition von Referenztemperaturen dienen. Aufgrund der grossen Unsicherheiten sollte diese Referenztemperatur allerdings ebenfalls nur als erste Näherung betrachtet werden. **Grundsätzlich sollte auch bei Grundwasservorkommen ab einer Tiefe von 2'000 m in jedem Fall, sowohl für bestehende wie auch für zukünftige Nutzungen, Grundwassertemperaturen vor der Wärmenutzung gemessen und mit standortspezifisch**



erhobenen Daten zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen zusammengeführt werden.

Urbane Gebiete

Das thermische Grundwasserregime in urbanen Gebieten ist aufgrund der bereits lang andauernden anthropogenen Aktivität schon sehr stark gestört und die Grundwassertemperatur im Vergleich zu den eigentlich zu erwartenden «natürlichen» Grundwassertemperaturen massiv erhöht. Hinzu kommt, dass sich eine eigentlich «natürliche» Grundwassertemperatur, wie sie sich alleine durch die mittlere bodennahe Lufttemperatur und Interaktionen mit natürlichen Fließgewässern oder tieferen Grundwasserleitern ableiten liessen, nicht mehr basierend auf den in-situ gemessenen bodennahen Lufttemperaturen berechnen lässt, da dieselbe in urbanen Regionen ebenfalls aufgrund anthropogener Aktivitäten teilweise massiv erhöht ist.

Entsprechend wird hier eine von Epting and Huggenberger (2013) entwickelte Methodik für die Ableitung der «natürlichen» Grundwassertemperaturen unter potentiell natürlichen Bedingungen, ohne anthropogene Aktivitäten und unter Berücksichtigung von bodennahen Lufttemperaturen angrenzender, repräsentativer (vergleichbare hydrogeologische Settings, vergleichbares lokales Klima, etc.) ländlichen Regionen, vorgestellt und zu den momentan beobachtbaren urbanen Grundwassertemperaturen in Kontext gestellt. Wir illustrieren die Anwendbarkeit der Methodik am Beispiel der Stadt Basel. Berechnete Unterschiede zwischen dem simulierten thermischen Zustand des Aquifers unter Basel-Stadt im Winter 2010 und der potentiell «natürlichen» Grundwassertemperaturverteilung sind in [Abb. 10](#) dargestellt.

Neben der Tatsache, dass Grundwassertemperaturen in urbanen Gebieten durch die bereits Jahrhunderte lang menschliche Aktivität signifikant erhöht sind, sollte wegen der hohen Dichte an baulichen und anderen Aktivitäten in urbanen Gebieten zusätzlich noch berücksichtigt werden, dass es verhältnismässig viel Zeit braucht, bis sich nach baulichen Eingriffen und neuen thermischen Nutzungen im Untergrund ein neuer hydraulischer und thermischer Zustand im Grundwasserwärmeregime einstellt. In Epting and Huggenberger (2013) wurde beispielsweise mit einem Modellierungsansatz für ausgewählte Standorte in Basel gezeigt, dass ausgehend von reellen Anfangstemperaturen des Grundwassers im Jahr 2010 selbst in Abwesenheit von anthropogenen Einflüssen (keine urbanen Strukturen, thermischen Grundwassernutzungen, etc.) die Grundwassertemperaturen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich abnehmen und sich erst nach ca. 12 Jahren ein neuer Gleichgewichtszustand (im Beispiel in [Abb. 10](#) bei 11.5°C) einstellt. Nach Erreichen des neuen Gleichgewichts steigen die simulierten Grundwassertemperaturen entsprechend dem positiven Trend der Klimaerwärmung, der aus der Atmosphäre und dem infiltrierenden Fluss übertragen wird ([Abb. 11](#)). Die Methodik erlaubt für den untersuchten Grundwasserleiter nach thermischen Eingriffen im Untergrund Zeitskalen für den thermischen Retardationseffekt und Memory-Effekt abzuleiten, dies auch vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung.

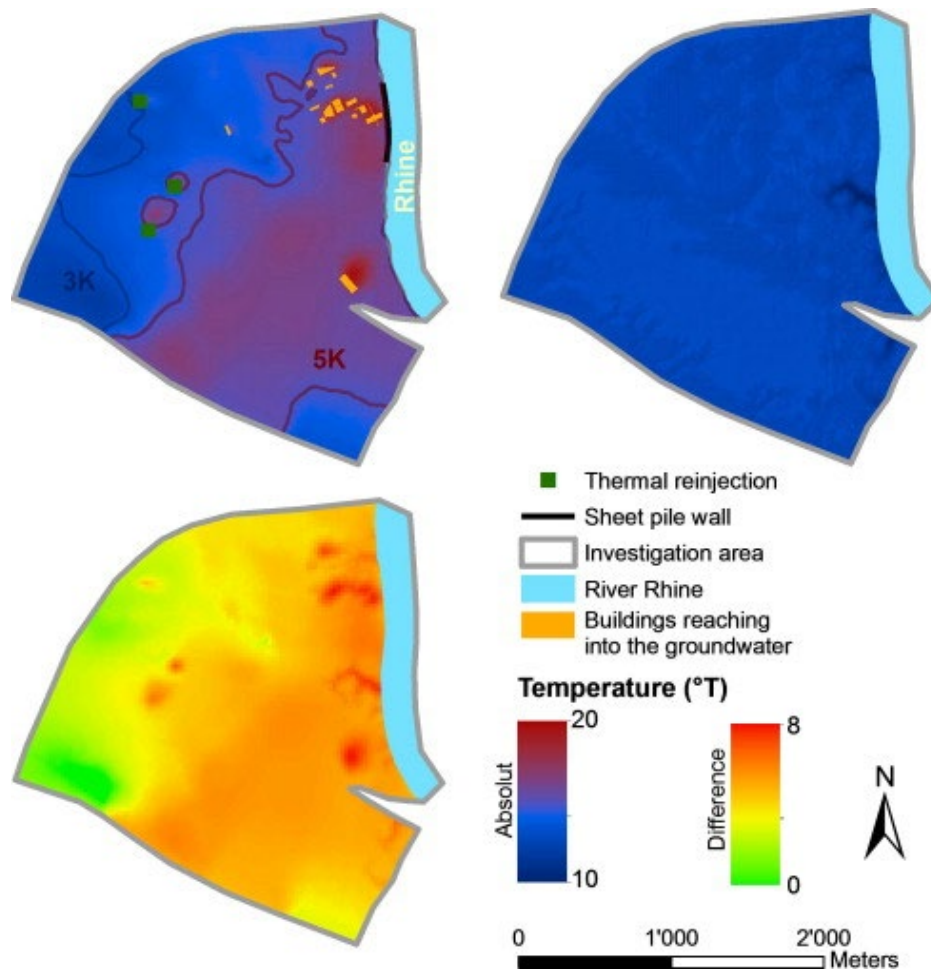
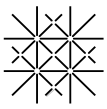


Abb. 10 Oben links: Simulierte Verteilung der Grundwassertemperaturen, die den reellen thermischen Zustand des Aquifers im Winter 2010 für NW Basel zeigt. Oben rechts: Die berechnete «potentielle» natürliche Temperaturverteilung. Unten links: Berechnete Temperaturunterschiede zwischen der Situation im Winter 2010 und der theoretisch «natürlichen» Temperaturverteilung (Epting and Huggenberger (2013))

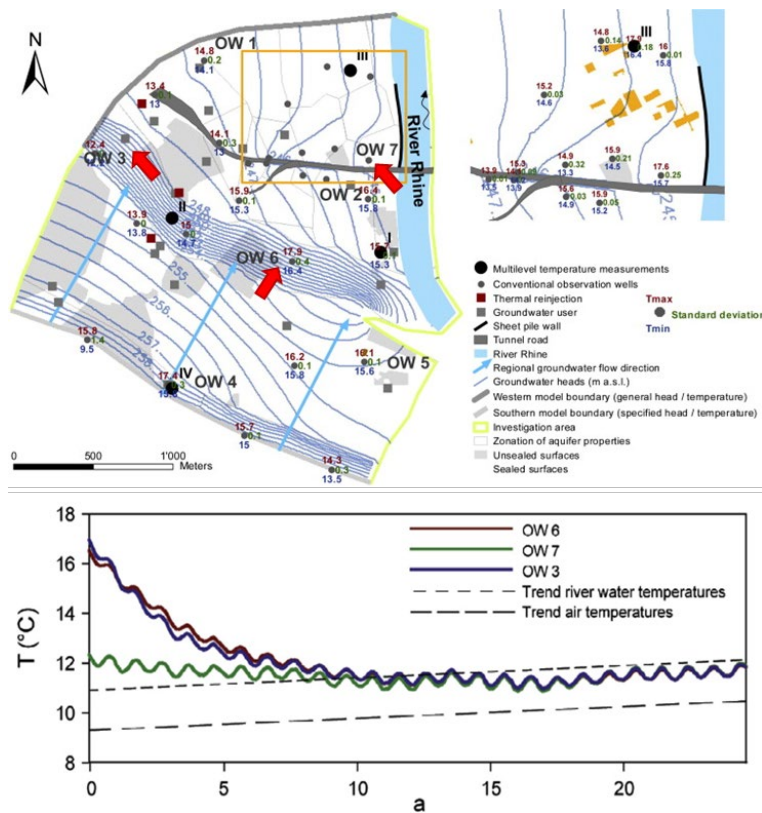


Abb. 11 Oben: Statistik Grundwassertemperaturen NW Basel und Industrieareal St. Johann (oben rechts), einschliesslich Oberflächenversiegelung, Grundwassernutzer, Grundwassergleichen, tief reichende Untergrundstrukturen (Autobahntunnel Nordtangente und Tiefbauten Novartis Campus). Unten: Memory-Effekt des Untergrundes eines Grundwasservorkommens; Standorte siehe rote Pfeile auf Karte (Epting and Huggenberger (2013)).

Konklusion

In urbanen Gebieten werden in oberflächennahen Grundwasserleitern aufgrund der starken Versiegelung, den vielen Untergrundbauwerken und der vielen verschiedenen anthropogenen Aktivitäten erhöhte Grundwassertemperaturen beobachtet. Da auch die bodennahen Lufttemperaturen in urbanen Gegenden aufgrund anthropogener Effekte erhöht sind, kann eine «natürliche» Grundwassertemperatur nicht durch diese lokalen Temperaturmessungen, sondern nur noch basierend auf bodennahen Lufttemperaturmessungen aus angrenzenden, repräsentativen (vergleichbare hydrogeologische Settings, vergleichbares lokales Klima, etc.) ländlichen Regionen abgeleitet werden. **Referenztemperaturen** für urbane Gegenden sollten dementsprechend vorsichtig definiert werden und sich idealerweise auch an einem **nachhaltigen Wärmemanagement** des urbanen Untergrundes orientieren.

Aufgrund der grossen Komplexität ist dafür allerdings nicht nur ein **hochaufgelöstes Temperaturmessnetz im Untergrund** nötig, sondern auch **hochaufgelöste thermisch-hydraulische Modelle (THM)**, welche es in Kombination ermöglichen, ein entsprechendes Management zu realisieren.

Nach thermischen Eingriffen in den Untergrund dauert es zudem eine gewisse Zeit (**Retardationseffekt**), bis sich ein neuer thermischer Gleichgewichtszustand einstellt (**Memory-Effekt**). Auch diese beiden Aspekte lässt sich nach unserer Erfahrung lediglich durch THM ausreichend berücksichtigen.

Auswirkungen von Klimaänderungen auf Grundwasserressourcen

Der Einfluss des Klimawandels auf die Quantität der verschiedenen Schweizer Grundwasservorkommen ist in **Abb. 12** zusammengefasst (BAFU, 2014). Die stärksten negativen Auswirkungen sind bei alpinen Quellen aus Kluft- und Lockergesteinen sowie in den Karstgebieten des Juras zu erwarten.

	Grundwasser (Lockergestein)			Quellen						Seen
	grosse Talschotter		Decken- oder Hangschotter	Kluft- und Lockergestein				Karst		
	oG	mG		grosses Einzugsgebiet		kleines Einzugsgebiet		oG	mG	
			oG	mG	oG	mG				
Jura	-		+	+		+		++		-
Mittelland	++	+	+	+	-	+		-		+
Alpen		++	+		+	++	+	-	+	-
Tessin	++	+	+	+	-	+		+		+

oG: Einzugsgebiet nicht vergletschert mG: Einzugsgebiet teilweise vergletschert

Bedeutung der Ressource für die Wassergewinnung ++ Hauptwassergewinnung + wichtige Wassergewinnung - untergeordnete, bzw. keine Bedeutung für Wassergewinnung ☒ nicht vorhanden	Erwartete mengenmässige Auswirkungen der Klimaänderung: ☒ negative, für die Wasserversorgung signifikante Auswirkungen zu erwarten (und Hauptwassergewinnungsart) ☒ negative, für die Wasserversorgung weniger relevante Auswirkungen zu erwarten ☒ negative Auswirkungen möglich ☒ negative Auswirkungen unwahrscheinlich
--	---

Abb. 12 Einfluss Klimaerwärmung auf die Quantität verschiedener Grundwasservorkommen (BAFU, 2014).

Abweichungen der bodennahen Lufttemperatur von der Normperiode 1981-2010 sind in **Abb. 13** exemplarisch für RCP8.5 und das Jahresmittel 2060 dargestellt (NCCS, 2018). Die stärksten Temperaturänderungen sind im südlichen Wallis und entlang des Alpenrheins in Graubünden zu erwarten.

Die in **Abb. 12** und **Abb. 13** dargestellten Beispiele zeigen, dass je nach Region der Schweiz in Zukunft mit sehr unterschiedlichen Anstiegen der bodennahen Lufttemperatur zu rechnen und dass je nach Aquifertyp und Region der Schweiz auch ein unterschiedlicher Effekt des Klimawandels auf die Grundwasserquantität zu erwarten ist. Diese heterogenen Effekte werden heterogene Auswirkungen auf die zugrundeliegenden Grundwassertemperaturen haben und je nach Region die natürlichen zu erwartenden Grundwassertemperaturen unterschiedlich beeinflussen.

Konklusion:

Die Klimaerwärmung wird sich auf die Grundwasserneubildung auswirken und die Grundwassertemperaturen erhöhen. **Die Auswirkungen werden in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie in ländlichen und städtischen Gebieten unterschiedlich sein** und je nach Aquifertyp, Lage und Einzugsgebietscharakteristika unterschiedlich ausfallen.

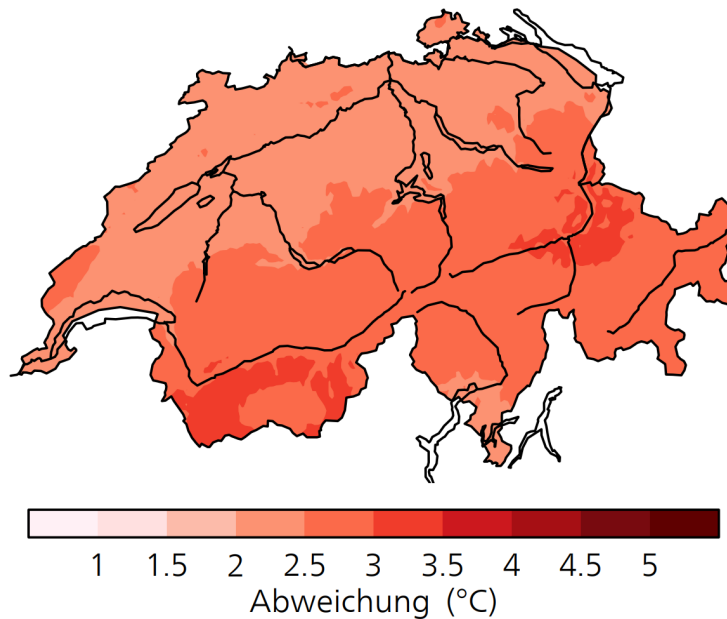


Abb. 13

Temperaturabweichung der Atmosphäre von der Normperiode 1981-2010 für RCP8.5 und das Jahresmittel 2060 (NCCS, 2018).

4.3.2 Konzepte Referenztemperaturen

Im Folgenden wird ein Konzept für die Herleitung von Referenztemperaturen für oberflächennahe Grundwasserressourcen in ländlichen und urbanen Gebieten sowie für Tiefengrundwasserleiter für verschiedene Settings der Schweiz vorgestellt (Abb. 14).

Bei oberflächennahen Grundwasservorkommen sind neben der oberflächennahen Lufttemperatur je nach Standort auch Wechselwirkungen mit Oberflächengewässern, anthropogenen Einflüssen, Karstprozessen sowie aufstossendem Tiefengrundwasser zu berücksichtigen.

In Abhängigkeit des Grundwasserleitertyps und der Tiefe der Grundwasserressource kann für oberflächennahes (< 25 m) Grundwasser die mittlere jährliche bodennahe Lufttemperatur als unbeeinflusste natürliche Temperatur berücksichtigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass bei der Festlegung einer unbeeinflussten natürlichen Referenztemperaturen der Temperaturanstieg abgezogen werden muss, der bereits durch die globale Erwärmung stattgefunden hat. Dabei ist es sinnvoller, sich auf eine Normperiode, welche durch MeteoSchweiz alle 10 Jahre aktualisiert wird (z.B. aktuell 1991-2010), zu beziehen als auf ein bestimmtes Jahr. In Regionen, in welchen die thermischen Regime der oberflächennahen Grundwasservorkommen signifikant durch Interaktionen mit Oberflächengewässern, Karst oder aufstossendem Tiefengrundwasser beeinflusst sind, müssen diese Prozesse mit der vor Ort gemessenen mittleren jährlichen bodennahen Lufttemperatur überlagert betrachtet werden. Der Einsatz von thermisch-hydraulischen Modellen, idealerweise in Form von integrierten thermischen Oberflächen-Grundwasserflussmodellen, stellt hierfür die optimale Methode zur Ermittlung von Referenztemperaturen dar (siehe z.B. Brunner et al. (2017), Epting et al. (2021), Epting et al. (2022); Paniconi and Putti (2015), Schilling et al. (2013)).

Für tieferes (25-2'000 m) sowie für sehr tiefes (> 2'000 m) Grundwasser schlagen wir eine differenzierte, standortspezifische Betrachtung vor, welche neben der in-situ gemessenen Grundwassertemperatur auch Interaktionen mit oberflächennahen Grundwasservorkommen, einschliesslich der Berücksichtigung von Grundwasserneubildungsraten, Grundwasserherkunft und Grundwasserfliesspfaden, sowie den regionalen Wärmestrom und den geothermischen Tiefengradienten berücksichtigt (siehe auch Kapitel 4.3.1; **Abb. 14**). Aufgrund der generell knappen Datenlage für tiefere Grundwasservorkommen müssen die Analysen der Interaktionen mit oberflächennahen Grundwasservorkommen entweder auf bestehenden oder neu zu erhebenden standortspezifischen Messungen von Tracern und Geoindikatoren basieren.

Für urbane oberflächennahe Grundwasserressourcen ist zu berücksichtigen, dass natürliche bodennahe Lufttemperaturen und unbeeinflusste bzw. theoretisch natürliche Grundwassertemperaturen z.T. bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts nicht mehr vorkommen (siehe z.B. Bayer et al. (2016) und darin zitierte Literatur). In vielen dicht besiedelten und versiegelten Gebieten führt dies dazu, dass bereits heute eine weitere Nutzung des Untergrunds zu Kühlzwecken (mit zusätzlichem Wärmeeintrag in das Grundwasser) zumindest bei der momentan noch gültigen 3°C-Regelung unmöglich ist. Es bedeutet aber auch, dass die Nutzung des Untergrunds zu Heizzwecken (mit Kälteeintrag in das Grundwasser) neben der gesetzlich gültigen 3°C-Änderung auch von der Differenz zwischen dem zu warmen urbanen Grundwasser und einer bodennah gemessenen Lufttemperaturen im benachbarten ländlichen Region profitiert. Diese unterschiedliche Auslegung je nach Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken würde zu einer nachhaltigen thermischen Entwicklung und Kühlung urbaner Grundwasserressourcen beitragen und ist in einigen Kantonen bereits gängige Praxis (Kapitel 4.1).

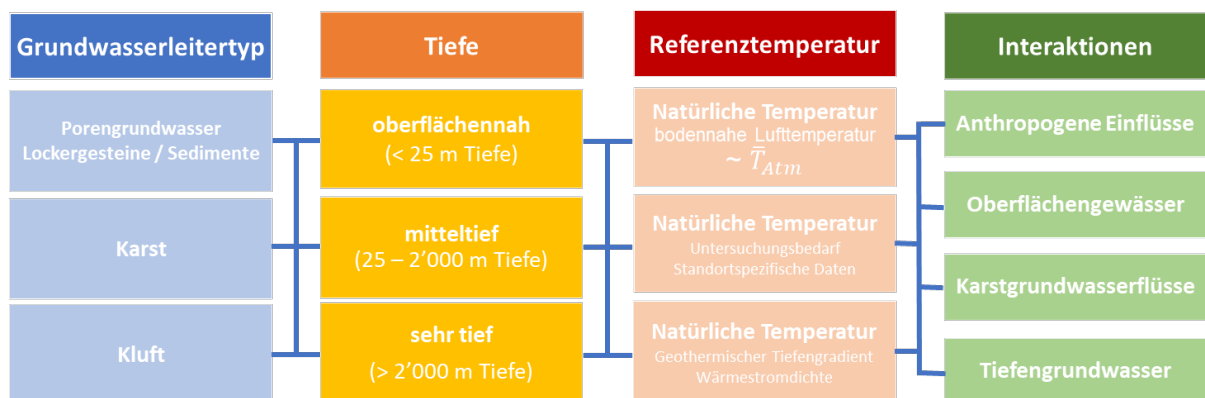
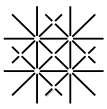


Abb. 14 Konzept Referenztemperatur und natürlicher Grundwassertemperaturen für verschiedene Grundwasserleitertypen und Tiefen sowie in Abhängigkeit standortspezifischer Interaktion mit unterschiedlichen anthropogenen und natürlichen Randbedingungen/Einflussfaktoren.



Konklusion

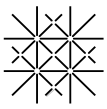
A₁: Für oberflächennahes (< 25 m) Grundwasser in ländlichen Regionen ohne signifikante Fluss-Grundwasserinteraktionen, Karsteinfluss oder aufstossendem Tiefengrundwasser, kann die lokal gemessene, mittlere jährliche bodennahe Lufttemperatur als unbeeinflusste natürliche Temperatur herangezogen werden.

A₂: Für oberflächennahes (< 25 m) Grundwasser in ländlichen Regionen, in welchen Interaktionen mit Oberflächengewässern, Karst oder aufstossendem Tiefengrundwasser einen signifikanten Einfluss auf das thermische Regime haben, muss ein thermisch-hydraulisches Modell (THM) eingesetzt werden, um die thermischen Effekte des Grundwasserfließregimes und der lokal gemessenen, mittleren jährlichen bodennahen Lufttemperatur integral beurteilen zu können.

B: Für mitteltiefes (25-2'000 m) Grundwasser überlagert sich der Einfluss von geothermischen Tiefengradienten mit Grundwasserfließeffekten. Anthropogene Einflüsse sind weitgehend ausgeschlossen, so dass die gemessene Temperatur i.d.R. der natürlichen Grundwassertemperatur entspricht. Will man die natürliche Grundwassertemperatur auf einer gewissen Tiefe und an einem gewissen Standort prognostizieren, bedarf es allerdings grundsätzlich zusätzlicher standortspezifischer Daten zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen.

C: Für tiefes (> 2'000 m) Grundwasser kann als erste Näherung für die Prognose der unbeeinflussten Grundwassertemperaturen eine Kombination aus regionalen geothermischen Tiefengradienten und Wärmestrom als erste Abschätzung dienen. Aufgrund der ausgesprochen knappen Datengrundlage für solche Tiefen bedarf es allerdings für solche Vorhaben immer zusätzlicher Tracer- und Geoindikator-basierter Messungen, welche standortspezifische Informationen zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen liefern können. Die Messungen sollten es dabei erlauben, sowohl die physikalische Umgebung und hydrologischen Verhältnisse, wie auch die biogeochemischen und biologischen Zustände des Standorts zu beschreiben.

D: Bei urbanen Grundwasserleitern kann eine «natürliche» Grundwassertemperatur nicht aus lokal gemessenen oberflächennahen Lufttemperaturen abgeleitet werden, da es komplexe anthropogene Einflüsse nicht nur auf den Untergrund, sondern auch auf die Lufttemperatur gibt. Stattdessen müssen bodennahe Lufttemperaturen aus benachbarten, repräsentativen (vergleichbare hydrogeologische Settings, vergleichbares lokales Klima, etc.) ländlichen Regionen herangezogen werden. Aufgrund der bereits heute oft zu beobachtenden Grundwassererwärmung wäre eine weitere Nutzung des Untergrundes zu Kühlzwecken (mit zusätzlichem Wärmeeintrag) daher in vielen dicht besiedelten und versiegelten Gebieten nicht mehr möglich. Die Nutzung des Untergrundes zu Heizzwecken (Kälteeintrag) hingegen würde es ermöglichen, nicht nur von der gesetzlich zulässigen 3°C-Änderung, sondern auch von der Differenz zwischen dem zu warmen städtischen Grundwasser und den bodennahe gemessenen Lufttemperaturen in der benachbarten ländlichen Region zu profitieren. Diese unterschiedliche Auslegung in Abhängigkeit der Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken würde zu einer nachhaltigen thermischen Entwicklung und Kühlung urbaner Grundwasserressourcen beitragen.



Aufgrund der verhältnismässig grossen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Grundwasservorkommen und -fließregime sollten die oben genannten Vorschläge allerdings nur als erste Abschätzungen genutzt werden. Grundsätzlich sollten in jedem Fall, sowohl für bestehende wie auch für zukünftige thermische Grundwassernutzungen, die jeweilige in-situ gemessenen Grundwassertemperaturen vor der Wärmenutzung als zusätzliche Referenz herangezogen werden. Aufgrund der grossen Komplexität in urbanen Gebieten bedarf es an diesen Standorten zudem hochaufgelöster Temperaturmessnetze im Untergrund sowie thermisch-hydraulischer Modelle (THM), um ein optimales Management der Untergrundressourcen erzielen zu können.

4.4 Abgrenzung Tiefengrundwasser und oberflächennahe Grundwasservorkommen

Für eine Abgrenzung von Tiefengrundwasser und oberflächennahen Grundwasservorkommen wurde von einer Unterscheidung von drei Haupttypen von Grundwasservorkommen nach Burger (2016) ausgegangen (Burger verwendet den im Schweizer Gewässerschutzrecht nicht bekannten Begriff der Grundwasserkörper). Zudem wurde eine weitere Unterscheidung nach Waber et al. (2015) vorgenommen, welche neben der Mineralisation und Temperatur auch Verweilzeit und Fließwege im Untergrund berücksichtigt.

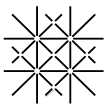
Für das Finden einer verbesserten Abgrenzung zwischen Tiefengrundwasser und oberflächennahen Grundwasservorkommen - und damit ultimativ für eine geeignete gesetzliche Definition von Tiefengrundwasser - wird von einer Unterscheidung von drei Haupttypen von Tiefengrundwasser ausgegangen (Burger (2016)):

1. Porengrundwasser in Sedimentgesteinen (z.B. Sandstein)
2. Kluftgrundwasser in kristallinen Gesteinen oder tektonisierten Zonen
3. Karstgrundwasser in Karbonat- und Evaporit-reichen Gesteinen

Zudem wird als zweite Stufe eine weitere Unterscheidung nach Waber et al. (2015) herangezogen und geprüft, wonach Grundwasser mindestens drei der folgenden vier Bedingungen erfüllen muss, um als Tiefengrundwasser gelten zu können:

1. Mineralisation in tiefliegenden Lithologien
2. Erhöhte Temperatur ($\Delta T > 5 \text{ }^\circ\text{C}$) gegenüber dem benachbarten oberflächennahen Grundwasser
3. Verweilzeit von minimal mehreren Jahrzehnten (z.B. definiert über ein Vorhandensein von noch weniger als $1/4$ des ursprünglich angenommenen atmosphärischen Eintrages von ^3H während der Grundwasserneubildung)
4. Lange Fließwege (km-Skala) im Untergrund

Eine Sichtung bestehender Daten über Vorkommen von Tiefengrundwasser (Waber et al., 2015) zeigte bereits, dass Tiefengrundwasser: (a) im geologischen Untergrund der Schweiz mehrheitlich gering mineralisiert ist ($< 2.5 \text{ g/l}$), (b) in gewissen Lokalisationen bezüglich der Mineralisation Trinkwasserqualität aufweist, (c) in Tiefen bis 2.5 km nachgewiesen ist, (d) an gewissen Lokalisationen heute schon genutzt wird oder ein Nutzungspotential hat und (e) die Exfiltration von Tiefengrundwasser in



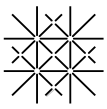
Oberflächengewässer und oberflächennahe (genutzte) Grundwasservorkommen an vielen Stellen bekannt ist.

Um die 4 Punkte nach Waber et al. (2015) für spezifische Fälle abschätzen zu können, muss neben regionalen hydrogeologischen Betrachtungen in der Regel auf hydrochemische Analysen zurückgegriffen werden. Wie umfangreich hydrochemische Analysen sein sollten, um möglichst zuverlässige Rückschlüsse auf die Art des Tiefengrundwassers, dessen Herkunft, dessen Interaktion mit dem Gestein, sowie dessen Verweilzeiten ziehen zu können, zeigt eine Beschreibung gemäss Giggenbach (1991) von zwei kategorisch unterschiedlichen Analysetypen:

- Analyse hydrologischer Tracer: Hydrologische Tracer sind chemisch inerte, über einen langen Zeitraum stabile oder durch klare physikalische Effekte sich verändernde Elemente, Moleküle oder Substanzen, die eine Rückverfolgungsmöglichkeit zurück zu ihren Ausgangskomponenten bieten. Beispiel sind die (Edel)gase und deren Isotope, Wasserisotope sowie geochemische Spurenelemente wie Cl, B, Li, Rb. Mithilfe der Edelgase kann u.a. via Edelgasthermometrie Rückschluss auf die Temperatur und Infiltrationshöhe während der Grundwasserneubildung gezogen werden (Aeschbach-Hertig and Solomon, 2013). Mit radioaktiven Edelgas- und Wasserisotopen (z.B. Ar, Kr, He und H Isotope) wiederum kann Rückschluss über die Verweilzeit eines Wassers gezogen werden (Purtschert, 2008)
- Analyse von Geoindikatoren: Geoindikatoren sind reaktive Elemente, die auf Veränderungen ihrer Umgebung reagieren. Na, K, Mg, Ca, SiO₂ zeigen temperaturabhängige Reaktionen mit Aluminium-Silikaten, die normalerweise das geothermische Reservoir bilden. Ausserdem sind Gase wie H₂, H₂S, O₂, CH₄ und CO₂ in der Regel an temperatur- und druckabhängigen Redoxreaktionen untereinander oder mit Redoxsystemen der Gesteinsphase beteiligt. Wird eine Vielzahl solcher Geoindikatoren gemessen, kann mithilfe der Geothermometrie (z.B. nach Spycher et al. (2014)) Rückschluss auf die Temperatur(en) gezogen werden. Zudem können Interaktionen zwischen verschiedenen Tiefengrundwässern mithilfe der Analyse von Geoindikatoren und hydrologischen Tracern identifiziert werden (z.B. nach Schilling et al. (2023))

In der Schweiz kommen aus lokalgeologischen Gründen noch die wichtigen Parameter Sulfat und Hydrogenkarbonat hinzu (Burger, 2016). Diese Zusammenstellung veranschaulicht, dass für eine Klassierung und Charakterisierung der Tiefengrundwässer eine relativ grosse Anzahl Parameter zu messen ist, wobei mithilfe dieser Parameter allerdings ein sehr tiefgreifendes Bild über das spezifisch gemessene Tiefengrundwasser gewonnen werden kann.

Es gilt zudem hervorzuheben, dass, wie aus den Referenzen zu entnehmen ist, die Schweizer Forschung in diesem Bereich eine Spitzenrolle einnimmt, mehrere Labore von Weltklasse betreibt und in der Schweiz daher ein einzigartig guter Zugang zu solchen Analysemöglichkeiten besteht. Diese Tatsache widerspiegelt sich auch in den Daten, die für die SGC Datenbank (z.B. die Nagra oder die BDF-Geotherm Datensätze) berücksichtigt wurden, da die Grundlagendaten neben den Temperaturdaten oft auch ausgiebige Tracer- und Geoindikatordaten bereitstellen. Im Umfang der hier präsentierten ersten Zusammenstellung allerdings war die detaillierte Aufarbeitung der verfügbaren Tracer und



Geoindikatordaten leider nicht möglich, wird aber für eine fortführende Aufarbeitung und präziserer Differenzierung von oberflächennahen und Tiefengrundwassern (wie weiter unten ebenfalls aufgeführt) empfohlen.

Nordschweiz (Anhang C)

Im Nagra-Bericht (Waber and Traber, 2022) werden für die Nordschweiz Grundwasservorkommen aus neun hydrogeologischen Einheiten bis in Tiefen von mehr als 2'000 m unterhalb der Oberfläche aufgeführt (**Abb. C1 Anhang C**). Fünf dieser Einheiten (Tertiär, Malm, Muschelkalk, Buntsandstein und Kristallin) haben eine regionale Ausdehnung und bilden regionale Grundwasserleiter. Die übrigen vier Einheiten (Hauptrogenstein, Lias, Keuper und Permokarbon) sind aufgrund lithologischer und fazieller Veränderungen über kurze Distanzen für die Grundwasserführung von lokal begrenzter Bedeutung. Die Art der Wasserführung ist sehr variabel und hängt von der lithologischen Ausbildung der hydrogeologischen Einheiten und deren geologischer Entwicklung ab. In den Gesteinen der hydrogeologischen Einheiten Tertiär, Keuper, Buntsandstein und teilweise Muschelkalk sind mehrheitlich Poren-Grundwasserleiter (homogen porös) ausgebildet, während in den Gesteinen der Einheiten Malm, Hauptrogenstein, Lias, Permokarbon, Kristallin und teilweise Muschelkalk Kluft- und Karstgrundwasserleiter (heterogen porös) vorherrschen.

Mittelland (Anhang C)

Für die Molasse-Einheiten (Tertiär **Abb. C1 Anhang C**) werden im Folgenden die, in unterschiedlichem Mass grundwasserleitenden hydrogeologischen Einheiten, unterschieden (Waber and Traber, 2022):

- Obere Süsswassermolasse (OSM): Abfolge fluvioterrestrischer Mergel und Sandsteine
- Obere Meeresmolasse (OMM): Abfolge mariner Sandsteine
- Untere Süsswassermolasse (USM): Abfolge fluvioterrestrischer Mergel und Sandsteine

OSM, OMM und USM sind hydraulisch miteinander verbunden und auch zum Malm-Aquifer im Liegenden besteht eine hydraulische Verbindung, sofern diese nicht durch Bohnerztone des Siderolithikums unterbunden ist.

Die wichtigsten grundwasserleitenden Elemente im Tertiär sind die Sandsteine, welche sowohl als Poren- wie auch als Kluftgrundwasserleiter wirken. Die vertikale hydraulische Durchlässigkeit der gesamten hydrogeologischen Molasse-Einheit ist meist deutlich geringer als die horizontale.

Alpiner Raum

Die Grundwasserleiter im alpinen Raum sind von der tektonisch geprägten Lithologie und Erosion bedeutend beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass sich die Grundwasservorkommen mehrheitlich in Kluft- und Karstgrundwasserleitern finden. In grösseren, durch fluvioglaziale Erosion übertieften und

anschliessend mit Lockergestein wiederaufgefüllten Tälern können allerdings auch mächtige Lockergesteinsgrundwasservorkommen auftreten. Allerdings beschränken sich die Lockergesteine auf sehr engem Raum, während die Kluft- und Karstaquifere flächenmässig dominieren. Die Lockergesteinsaquifere sind vor allem in den urbanisierten Gegenden in den Tälern für die Wassergewinnung von Bedeutung.

Konzept Definition Tiefengrundwasser

In **Abb. 15** wird ein mögliches Konzept für die Definition von Tiefengrundwasser basierend auf den oben vorgestellten Arbeiten und weitergehenden Überlegungen vorgestellt.

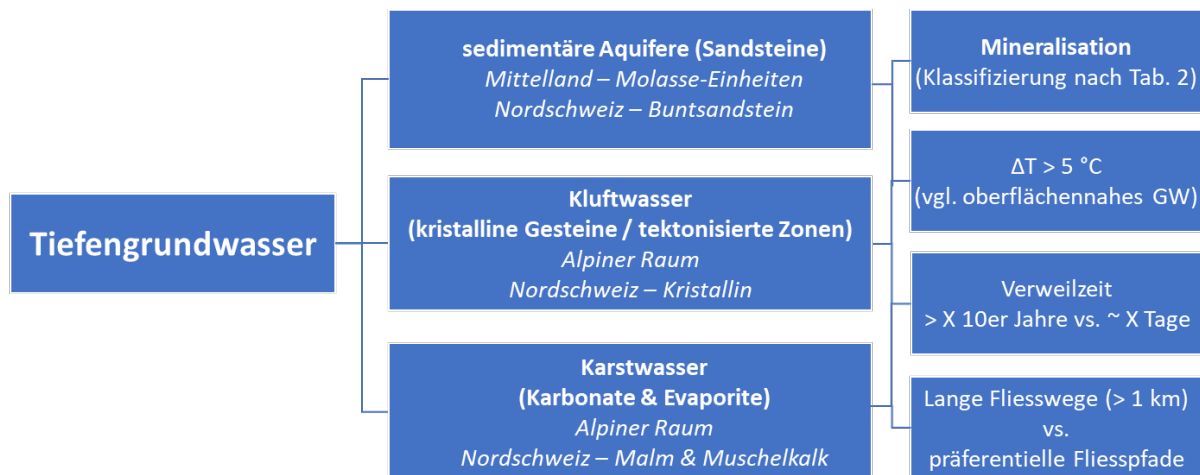
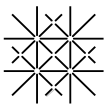


Abb. 15 Konzept für die Definition von Tiefengrundwasser.

Konklusion

In der Schweiz ist die Mineralisierung von Tiefengrundwasser kein Ausschlusskriterium für die Nutzung als Trinkwasser, da es generell schwach mineralisiert ist.

Ein Temperaturunterschied von $< 5 \text{ °C}$ zwischen Tiefengrundwasser und oberflächennahem Grundwasser deutet für tiefes Grundwasser darauf hin, dass weder lange Verweilzeiten noch extrem lange Fliesswege seit der Grundwasserneubildung vorgelegen haben können. Für Grundwasser in oberflächennahen Schichten, welches seinen Ursprung in der Tiefe hat, sich durch langsames Aufsteigen in oberflächennahe Zonen aber abgekühlt und an oberflächennahe Temperaturen (Temperaturunterschied $< 5 \text{ °C}$) angeglichen hat, kann die Temperatur nicht mehr als Unterscheidungsmerkmal für den Ursprung des Wassers dienen. In diesem Falle aber können die leicht erhöhte Mineralisation sowie die Gaszusammensetzung als Hinweis dienen, dass es sich beim oberflächennahen Grundwasser um ein ursprüngliches Tiefengrundwasser handelt. Herrschen Temperaturunterschiede von $> 5 \text{ °C}$ zwischen Tiefengrundwasser und oberflächennahem Grundwasser, so deutet dies auf lange Fliesswege und



lange Verweilzeiten des Tiefengrundwassers hin. Für oberflächennahe Grundwasservorkommen deutet ein grosser Temperaturunterschied im Vergleich zur bodennahen Lufttemperatur hingegen auf das Zuströmen von relativ schnell aufsteigendem Tiefengrundwasser in signifikanten Mengen hin.

Aufgrund der aufgezeigten breiten Streuung an Grundwassertemperaturen sowohl in oberflächennahen wie auch in tiefen Schichten sowie aufgrund der geschilderten Fälle ist klar, dass eine Unterscheidung von oberflächennahem und tiefem Grundwasser alleine auf einer Differenz von 5°C nicht gegeben ist und weitere Parameter berücksichtigt werden müssen.

Im Hinblick auf das Nutzungspotential stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Kenntnis der Grundwasserneubildungsrate, der Grundwasserverweilzeit sowie der Fließpfade. Für die Nutzung von Grundwasser in tiefen Schichten sowie für die Nutzung von Grundwasser in oberflächennahen Schichten bei Hinweisen, dass es sich zumindest teilweise um Tiefengrundwasser handeln könnte, sollten in jedem Fall die Verweilzeiten und Fließwege basierend auf hydrologischen Tracer- und Geoindikatoranalysen ermittelt werden, um das Nutzungspotential inklusive der Grundwasserneubildungsrate zu erschliessen.

4.5 Ergiebigkeit & Nutzbarkeit

Oberflächennahe Grundwasservorkommen

Eine generalisierte Darstellung der Ergiebigkeit der oberflächennahen Grundwasservorkommen in der Schweiz, basierend auf der Karte der Grundwasservorkommen 1:500'000 (Bitterli and al., 2004), die zusätzlich räumlich entsprechend der Verteilung der Grundwasserleitertypen¹¹ generalisiert wurde, ist in **Abb. A2 Anhang A** dargestellt.

Im Rahmen der Erstellung der hydrogeologischen Übersichtskarte¹² wurde die Ergiebigkeit (Grundwasservolumen, welches in einer Grundwasserfassung mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand auf Dauer gewinnbar ist), als qualitative Grösse kartografisch dargestellt, diese Übersichtskarte liefert aber keine mengenmässigen Angaben bezüglich der Grundwasserressourcen. Sie weist lediglich aus, wie Teileinheiten relativ zueinander in Beziehung stehen, d.h. in welchen Einheiten die Grundwasservorkommen in der Regel eine höhere und in welchen eine geringere Ergiebigkeit aufweisen. Die Klassifizierung nach der Ergiebigkeit kann als Ausgangslage für die Berechnung quantitativer Kennwerte dienen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes «Hintergrundwerte in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz»¹³ wurden insgesamt 32 anorganische Parameter wie Hauptinhaltsstoffe und Spurenelemente in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz analysiert. Aus dem Bericht resultieren v.a. Erkenntnisse über die geogene Zusammensetzung von oberflächennahen

¹¹ BAFU (2008): Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern

¹² <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/geodaten/geodaten-hydrogeologie.html>

¹³ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/externe-studien-berichte/20230126_BerichtGeo-oCH.pdf.download.pdf/hintergrundwerte-in-oberflaechennahen-grundwasservorkommen-der-schweiz.pdf

Grundwasservorkommen in der Schweiz. Die Erkenntnisse erlauben eine Identifikation von anthropogen beeinflussten Grundwässern und dienen als Grundlage für eine verbesserte Beurteilung der Grundwasserqualität. Je nach Geologie existieren deutliche Unterschiede in der Gesamtmineralisation sowie den Konzentrationen von Hauptinhaltsstoffen und Spurenelementen. In der Regel sind die ermittelten Hintergrundwerte tief und erfüllen meist die anorganischen Anforderungen an das als Trinkwasser genutzte oder dafür vorgesehene Grundwasser.

Tiefe Grundwasservorkommen

Die verschiedenen verfügbaren Kriterien für die Abgrenzung von Tiefengrundwasser von oberflächennahem Grundwasser wurden in Kapitel 4.4 aufgelistet (Themenbereich 2) und können mit «Nutzbarkeitsparametern» (siehe unten) überlagert werden (Matrix zur Darstellung von Überschneidungen, **Abb. 16**). Im Vordergrund sollte auch die Frage stehen, welche Grenzwerte für Grundwasserinhaltsstoffe (Mineralisierung etc.) nach Ansicht der Wasserversorger derzeit eine Nutzung als Trinkwasser verhindern. Die Analyse von genutzten Tiefengrundwässern erfolgt im Interesse der Nutzer und ist für die Schweiz entsprechend gut dokumentiert (Högl, 1980; Vuataz, 1982).

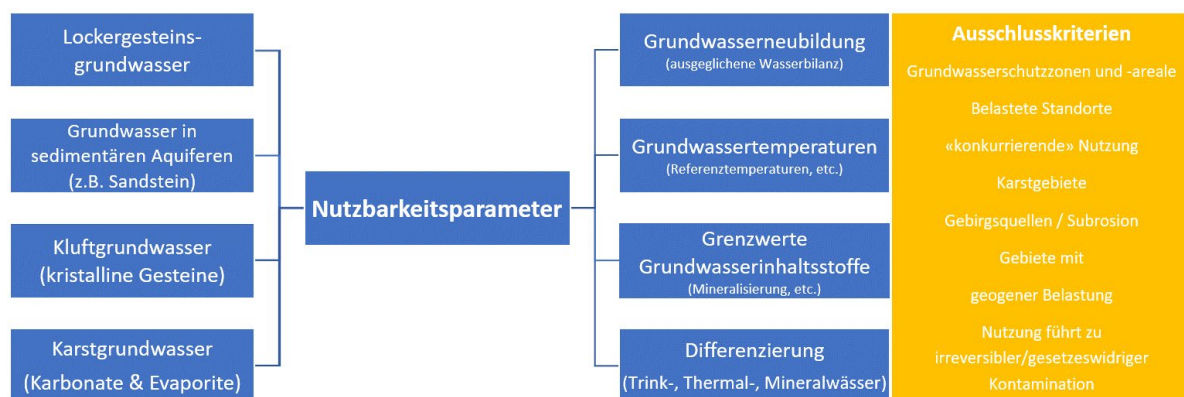
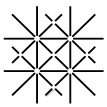


Abb. 16 Zu berücksichtigende Aspekte für die Definition von «Nutzbarkeitsparametern».

Die Eignung von unterschiedlich stark mineralisierten Wässern für bestimmte Nutzungsarten wird in **Tab. 2** dargestellt. Neben dem Salzgehalt können auch Grundwasserinhaltsstoffe wie z.B. Arsen, Fluorid oder Sulfat die Eignung von Tiefengrundwasser bestimmen.

Entsprechend der Analyse von Hintergrundwerten in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz (siehe oben) sollte auch eine systematische Bestandsaufnahme von Hintergrundwerten für tiefe Grundwasservorkommen vorgenommen werden. Eine entsprechende Zusammenstellung der bekannten Tiefengrundwässer in der Schweiz, gegliedert in neun tektonisch definierte Zonen, findet sich in Waber et al. (2015). Darin sind auch deren wichtigste Eigenschaften aufgeführt, soweit bekannt. Daraus lassen sich generelle Nutzungs-Perspektiven für einzelne regionale Tiefengrundwässer



ableiten. Aufgezeigt wird nicht nur, dass die Schweiz eine grosse Vielfalt an Tiefengrundwässern hat, sondern auch, dass die Erforschung dieser Wässer noch grosse Lücken aufweist (Burger, 2016).

Eine Abgrenzung von für Trinkwasserzwecke nutzbarem oder nicht nutzbarem Tiefengrundwasser, unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes und im Zusammenhang mit geothermischen Anwendungen, erfordert aufgrund der GSchV eine Erfassung von Aufenthaltszeiten und Neubildungsraten. Zudem sollten, wie in Kapitel 4.4. dargelegt, für Tiefengrundwässer dazu weitgreifende Analysen der Verweilzeiten, Fließspfade und Mischprozesse vorgenommen werden.

Tab. 2 Tiefenwasserqualität und Nutzungsmöglichkeiten (aus Burger (2016)).

< 2 g/l, gering mineralisiert, Trinkwasser- Qualität (TQ)	2-5 g/l mässig mineralisiert, TQ oder «Brauchwasser»	5-30 g/l stark mineralisiert, «salzig»	3-5% Salzgehalt Salzwasser	> 5% Salzgehalt Salzsole «Brine»	Nutzungsart
+++	+++	++	+ / ∅	∅	Hydrothermale Geothermie
+++ / ++	+++	+++	++	+	Thermalbäder
+++	++ / +	+	∅	+ / ∅	Brauchwasser für Industrie
+++	++	+ / ∅	∅	∅	Brauchwasser Landwirtschaft
+++	++ / +	∅	∅	∅	Mineralwasser

Generelle Beurteilung | general evaluation: +++ = gut geeignet | ideal suitable, ++ = geeignet | suitable, + = bedingt geeignet | conditionally suitable, ∅ = ungeeignet | unsuitable

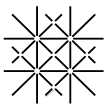
Wenn verunreinigtes Grundwasser thermisch genutzt wird, ohne dass eine zusätzliche Verunreinigung oder eine Verschleppung der Verunreinigung eintritt, ist dies zulässig.

Ausschlusskriterien für die thermische Nutzung

Grundwasserschutzzonen und -areale ($S_1 - S_3$, S_h , S_m): Kreisläufe, die dem Untergrund Wärme entziehen, sind nach Anhang 4 Ziffer 22 und 23 in diesen Zonen nicht zulässig.

Kontamination: Es ist zu unterscheiden, ob es sich um eine bestehende Kontamination (z.B. Altlast) handelt oder ob eine neue Nutzung in einer irreversiblen/gesetzeswidrigen Beeinträchtigung (z.B. beim Bohrvorgang oder beim späteren Betrieb) des Grundwasserleiters resultiert. Bzgl. Nutzungen bei bestehenden Verunreinigungen gelten die numerischen Anforderungen von Anh. 2 Ziff. 22 Abs. 2 nur für das genutzte oder dafür vorgesehene Grundwasser, nicht für das übrige Grundwasser. Für Grundwasser, welches nicht als Trinkwasser genutzt oder dafür vorgesehen ist, gelten die für Trinkwasser definierten Höchstwerte gemäss Verordnung über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlichen Bädern und Duschanlagen (TBDV¹⁴). Diese Verordnung regelt die Aufbereitung, die Bereitstellung

¹⁴ <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/153/de>



und die Qualität von Trinkwasser als Lebensmittel und von Wasser als Gebrauchsgegenstand. Demnach muss Trinkwasser hinsichtlich Geruch, Geschmack und Aussehen unauffällig sein und darf hinsichtlich Art und Konzentration der darin enthaltenen Mikroorganismen, Parasiten sowie Kontaminanten keine Gesundheitsgefährdung darstellen.

Belastete Standorte (inkl. Bauschutt und Inertstoffmaterial): Nutzung ausgeschlossen aufgrund Risikos der Verbindung von Grundwasserstockwerken. Anlagen, die eine Sanierung erschweren sind nicht zulässig.

Standort mit «konkurrierender» Nutzung (z.B. unterirdische Anlagen): Bedarf spezifischer Abklärungen.

Karstgebiete (z.B. Kalk- und Dolomite des Oberen Muschelkalks): Bedarf spezifischer Abklärungen.

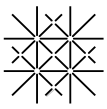
Konklusion

Für oberflächennahe Grundwasservorkommen existieren bereits verschiedene Grundlagen, einschliesslich der Darstellung der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen und einer Zusammenstellung von Hintergrundwerten, um die Ergiebigkeit und Nutzbarkeit von Grundwasserressourcen beurteilen zu können.

Für Tiefengrundwässer ist die Datenlage spärlicher und regional unterschiedlich. Um die Eignung von Tiefengrundwasser für unterschiedliche Nutzungen zu eruieren, können verschiedene Nutzbarkeitsparameter (Ergiebigkeit, Temperaturen, Hintergrundwerte, v.a. Mineralisation), überlagert und bzgl. verschiedener Nutzungsmöglichkeiten (Trink-, Mineral-, Thermal-, Badewasser bis hin zu nicht nutzbar) betrachtet werden¹⁵.

Entsprechend der Analyse von hydrochemischen Hintergrundwerten in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz sollte auch eine Bestandsaufnahme von an Tiefengrundwasser angepassten hydrochemischen Hintergrundwerten für tiefe Grundwasservorkommen vorgenommen werden.

¹⁵ Für die Nutzbarkeit ist eine ausreichende Trinkwasserqualität und -quantität ausschlaggebend (GSchV, Anhang 4 Nr. 111) ggf. auch mit der Anwendung einfacher Aufbereitungsverfahren. Ein wesentlicher Aspekt ist auch die Wirtschaftlichkeit der vorgesehenen Nutzung. Neben der Nutzbarkeit gelten aber auch weitere gewässerschutzrechtliche und v.a. ökologische Aspekte, wie die Erhaltung der Biozönose.



5 Fazit

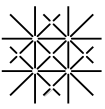
5.1 Referenztemperaturen und Abgrenzung oberflächennaher vs. tiefer Grundwasservorkommen

Mit dem Ziel der praxistauglichen Definition von Referenztemperaturen für eine thermische Nutzung und Abgrenzung von oberflächennahen und tiefen Grundwasservorkommen wurden verfügbare Grundwassertemperaturdaten systematisch ausgewertet, hydrogeologischen Aspekten gegenübergestellt und verschiedene geothermische Tiefenbereiche eingegrenzt. Hierfür wurde auch der Status quo in der Schweiz in Bezug zu internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen und spezifischen Gesetzgebungen auf kantonaler Ebene recherchiert.

Auf Grundlage der verfügbaren Daten konnten bezüglich Temperaturen drei unterschiedliche Tiefenlagen in der Schweiz identifiziert, sowie Konzepte für die Definition von natürlichen Grundwassertemperaturen in verschiedenen Tiefenlagen und Settings als massgebende Grössen für die Ableitung von gesetzlich relevanten Referenztemperaturen erarbeitet werden.

Es zeigte sich, dass eine Definition charakteristischer Grundwassertemperaturen für unterschiedliche Grundwasserleitertypen, unterschiedliche tektonische Grosseinheiten und unterschiedliche Tiefen aufgrund der grossen Heterogenität innerhalb bestimmter Grundwasserleitertypen, Tiefenzonen oder tektonischen Grosseinheiten schwierig bis unmöglich ist.

Temperaturunterschiede von < 5 °C zwischen Tiefengrundwasser und oberflächennahem Grundwasser deuten für tiefe Grundwasservorkommen darauf hin, dass weder lange Verweilzeiten noch extrem lange Fliesswege seit der Grundwasserneubildung vorgelegen haben. Für Grundwasser in oberflächennahen Schichten, welches seinen Ursprung zwar in der Tiefe hat, sich durch langsames Aufsteigen in oberflächennahe Schichten aber abgekühlt und an oberflächennahe Temperaturen angeglichen hat, kann die Temperatur nicht mehr als Unterscheidungsmerkmal für den Ursprung des Wassers dienen. In diesem Falle können neben geologischen Gegebenheiten die erhöhte Mineralisation sowie die Gaszusammensetzung als Hinweis dienen, dass es sich beim oberflächennahen Grundwasser um ein ursprüngliches Tiefengrundwasser handelt. Temperaturunterschiede von > 5 °C zwischen Tiefengrundwasser und oberflächennahem Grundwasser deuten für Grundwasser in tiefen Schichten auf lange Verweilzeiten und lange Fliesspfade hin. Für oberflächennahe Grundwasservorkommen deutet ein grosser Temperaturunterschied im Vergleich zur bodennahen Lufttemperatur hingegen auf das Zuströmen von relativ schnell aufsteigendem Tiefengrundwasser in signifikanten Mengen hin. Eine Unterscheidung von oberflächennahem und tiefem Grundwasser alleine auf einer Differenz von 5 °C ist entsprechend der erwähnten Beispiele sowie der dargelegten grossen Spannweite an Grundwassertemperaturen in der Schweiz nicht gegeben. In jedem Fall sollten entsprechend der Verweilzeiten und Fliesswege basierend auf hydrologischen Tracer- und Geoindikatoranalysen ermittelt werden, um das Nutzungspotential inklusive der Grundwasserneubildungsrate sowohl für oberflächennahes wie auch tieferliegendes Grundwasser erschliessen zu können.



Für anthropogen unbeeinflusste, oberflächennahe Grundwasservorkommen (bis ca. 25 m) in Regionen ohne signifikante Fluss-Grundwasserinteraktionen, Karsteinfluss oder aufstossendem Tiefengrundwasser, können jährliche Mittelwerte der bodennahen Lufttemperatur als «natürliche» Grundwassertemperatur herangezogen werden.

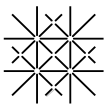
Für anthropogen unbeeinflusste, oberflächennahe Grundwasservorkommen (bis ca. 25 m), die aufgrund von signifikanten Fluss-Grundwasserinteraktionen, Karsteinflüssen oder aufstossendem Tiefengrundwasser ein nicht rein atmosphärisches thermisches Regime haben, müssen neben den lokalen bodennahen Lufttemperaturen die zusätzlich relevanten thermischen Prozesse mit thermisch-hydraulischen Modellen (THM) abgebildet werden.

Für Grundwasservorkommen in Tiefen zwischen 25-2'000 m kann keine einfache Faustregel für eine Abschätzung der natürlich vorherrschenden Grundwassertemperaturen vorgenommen werden, da sich hier der Einfluss von geothermischen Tiefengradienten mit Grundwasserfließeffekten überlagert. Entsprechend müssen für solche Grundwasserleiter grundsätzlich zusätzliche standortspezifische Daten zu Grundwasserneubildung, Grundwasseralter und Grundwassermischungsprozessen erhoben werden, um die natürliche Grundwassertemperatur auf einer bestimmten Tiefe und an einem bestimmten Ort prognostizieren zu können.

Für Grundwasserleiter ab einer Tiefe von 2'000 m kann als erste Näherung für unbeeinflusste, d.h. natürliche Grundwassertemperaturen, eine Kombination aus regionalen geothermischen Tiefengradienten und Wärmestrom als Grundlage dienen. Aufgrund der grossen Unsicherheiten sollten die auf den obigen Vorschlägen basierenden Näherungen allerdings nur als erste Abschätzungen genutzt werden.

Grundsätzlich sollten in jedem Fall, sowohl für bestehende wie auch für zukünftige Nutzungen von Tiefengrundwasser, die jeweilige in-situ gemessenen Grundwassertemperaturen vor der Wärmenutzung als zusätzliche Referenz herangezogen werden. Aufgrund der generell knappen und unvollständigen Datenlage in der Schweiz sollten für Tiefengrundwasser zudem grundsätzlich auch immer Tracer- und Geoindikator-basierte Untersuchungen durchgeführt werden.

In urbanen Gebieten werden in oberflächennahen Grundwasservorkommen bereits heute erhöhte Grundwassertemperaturen beobachtet. Zudem sind auch die bodennahen Lufttemperaturen erhöht. Eine Definition theoretisch «natürlicher» Grundwassertemperaturen ist deshalb nur unter Beizug von bodennahen Lufttemperaturen aus angrenzenden, repräsentativen ländlichen Regionen möglich. Aufgrund der bereits heute zu beobachtenden Grundwassererwärmung wäre eine weitere Nutzung des Untergrundes zu Kühlzwecken (mit zusätzlichem Wärmeeintrag) daher in vielen dicht besiedelten und versiegelten Gebieten nicht mehr möglich. Die Nutzung des Untergrundes zu Heizzwecken (Kälteeintrag) hingegen würde es ermöglichen, nicht nur von der gesetzlich zulässigen 3°C-Änderung, sondern auch von der Differenz zwischen dem zu warmen städtischen Grundwasser und den bodennah gemessenen Lufttemperaturen in der benachbarten ländlichen Region zu profitieren. Diese unterschiedliche Auslegung je nach Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken würde zu



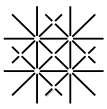
einer nachhaltigen thermischen Entwicklung und Kühlung urbaner Grundwasserressourcen beitragen.

Allerdings ist debattierbar, ob eine theoretisch «natürliche» Grundwassertemperatur den Verhältnissen in dichten urbanen Räumen genügend gerecht wird, dies auch vor dem Hintergrund der bereits seit dem rasanten Städtewachstum ab den 1850er Jahren bestehenden, erhöhten Luft- und Grundwassertemperaturen in diesen Regionen. Für stark urbanisierte Räume könnte eine Referenztemperatur deshalb auch auf einer an die städtischen Bedingungen angepassten Methode basieren, beispielsweise einer lokal gemessenen Grundwassertemperatur. Für saisonale Wärmespeicherungsanwendungen z.B. könnte somit der Freiheitsgrad kurzfristiger Wärmeabgaben in den Grundwasserleiter gelockert werden. Dies unter der Voraussetzung, dass langfristig eine neutrale bestenfalls negative (kühlende) Wärmebilanz eingehalten wird. Aufgrund der grossen Komplexität ist für die Definition angemessener Grundwassertemperaturen und das nachhaltige thermale Management in urbanen Gebieten nach unserer Erfahrung nicht nur ein hochaufgelöstes Temperaturmessnetz im Untergrund nötig, sondern auch hochaufgelöste thermisch-hydraulische Modelle (THM), welche es in Kombination ermöglichen, verschiedene Konzepte für Referenztemperaturen und tatsächlich gemessene Temperaturen einander gegenüberzustellen und ein nachhaltiges Wärmemanagement des urbanen Untergrundes zu realisieren.

Nach thermischen Eingriffen in den Untergrund dauert es zudem eine gewisse Zeit (Retardationseffekt), bis sich ein neuer thermischer Gleichgewichtszustand einstellt (Memory-Effekt). Auch dieser Aspekt, welcher Grundwasserleiter betrifft, lässt sich nach unserer Erfahrung lediglich durch komplexe Modellierung ausreichend berücksichtigen, insbesondere in urbanen Räumen, in welchen diese Effekte aufgrund der Komplexität des Untergrunds noch stärker zu tragen kommen.

In der Nähe von Fliessgewässern ist eine differenzierte Betrachtungsweise erforderlich, da neben der Versickerung von Niederschlagswasser auch versickerndes Oberflächenwasser erheblich zur Temperaturprägung des Grundwassers beitragen kann. Eine differenzierte Betrachtungsweise ist auch dann angezeigt, wenn Grundwasser für die Trinkwassergewinnung künstlich angereichert wird, wie dies in der Region Basel der Fall ist. Auch bei Karstgrundwasserleitern ist eine Kenntnis der Grundwasserneubildungsprozesse und eine Quantifizierung von schnellen und langsamen Fliesskomponenten für die Temperaturprägung des Grundwassers wichtig. Hinzu kommt in den Gebirgsregionen des Juras und der Alpen die Interaktion der Lockergesteins-Grundwasservorkommen mit regionalen Karst- und Kluftsystemen. So können über regionale Grundwasserzirkulationssysteme erwärmte Tiefengrundwässer die Grundwassertemperaturen der oberflächennäheren Grundwasserleiter beeinflussen. Um den Einfluss der bodennahen Lufttemperaturen sowie die verschiedenen Grundwasserneubildungskomponenten und weiteren thermischen Einflüsse solcher Settings quantitativ erfassen zu können, sind entsprechende angepasste Monitoring- und Modellierungsansätze erforderlich (siehe z.B. Epting et al. (2023); Epting et al. (2022)).

Die Klimaveränderung wird sich sowohl auf die bodennahen Lufttemperaturen wie auch auf die Grundwasserneubildung auswirken, und die Grundwassertemperaturen dadurch entsprechend

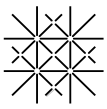


beeinflussen. Die Auswirkungen werden in den verschiedenen Regionen der Schweiz, in Abhängigkeit von Aquifertyp, Lage und Einzugsgebietscharakteristika, sowie je nach ländlicher oder städtischer Ausprägung, sehr unterschiedlich ausfallen.

5.2 Nutzbarkeit von Grundwasservorkommen

Für oberflächennahe Grundwasservorkommen existieren bereits verschiedene Grundlagen, einschliesslich der Darstellung der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen und einer Zusammenstellung von Hintergrundwerten mit welchen die Ergiebigkeit und Nutzbarkeit beurteilt werden können.

Im Hinblick auf die Nutzbarkeit von Tiefengrundwasser wurde, unter Berücksichtigung geltender Schutzbestimmungen, ein erstes Konzept vorgestellt. Das Konzept basiert auf Nutzbarkeitsparametern und erlaubt eine erste Unterscheidung zwischen nutzbarem und nicht nutzbarem Tiefengrundwasser. Für Tiefengrundwasser können verschiedene Nutzbarkeitsparameter (Ergiebigkeit, Temperatur, Hintergrundwerte, v.a. Mineralisation) überlagert und bzgl. verschiedener Nutzungsmöglichkeiten (Trink-, Mineral-, Thermal-, und Badewasser, bis hin zu rein geothermischen Nutzungen) betrachtet werden. Aus der Tiefenlage des Grundwassers kann nicht geschlossen werden, dass es aufgrund seiner Mineralisierung nicht für die Trinkwassernutzung geeignet ist, da viele bekannte Tiefengrundwässer in der Schweiz nur eine tiefe Mineralisierung aufweisen. Hinzu kommt, dass bei Wässern, die aufgrund von rein natürlichen Ursachen nicht trinkwasserqualitätskonform sind, verschiedene Aufbereitungsverfahren wie z.B. das Mischen mit einwandfreiem Wasser erlaubt sind. Im Hinblick auf das Nutzungspotential besteht das grundsätzliche Problem, das die Grundwasserneubildungsrate bekannt sein muss. Diese ist allerdings für Tiefengrundwasser oft nicht ausreichend bekannt. Deshalb muss, bevor eine Nutzung, bei welcher das Grundwasser nach der Nutzung nicht in den Grundwasserleiter zurückgeführt wird, bewilligt werden kann, zwingend die Neubildungsrate bestimmt werden (Einhaltung Art. 43 Abs. 1). Diese Abklärung entscheidet dann auch darüber, ob ein Tiefengrundwasser überhaupt als nutzbar im Sinne von Anh. 4 Ziff. 111 GSchV gelten kann, d.h. zu einem Gewässerschutzbereich A₀ gehört. Hierfür können Tracer- und Geoindikator-basierte Analysen der Neubildungsraten und -zonen, der Aufenthaltszeiten und der Mischungsverhältnisse von Wässern unterschiedlichen Ursprungs, herangezogen werden.



6 Ausblick & Empfehlungen

Aussagekraft Grenzwerte

Neben den aktuell vorgeschriebenen Abklärungen über die Änderungen der Grundwassertemperatur (maximal ± 3 °C in 100 m Abstrom), welche v.a. dem Vorsorgeprinzip entsprechen, wissenschaftlich aber nicht untermauert sind, sollten auch alternative Kriterien oder auch die Entwicklung belastbarer Indikatoren¹⁶/Proxys¹⁷ geprüft werden.

Temperaturschwellenwerte alleine, insbesondere in Lockergesteinsgrundwasserleitern, in welchen der advective Wärmetransport mit dem Grundwasserfließregime dominiert, reichen nicht. Vor allem im Zusammenhang mit Untergrundbauwerken macht es Sinn, auch eine flächenbezogene Quantifizierung von diffusen Wärmeeinträgen vorzunehmen (siehe z.B. Epting et al. (2017)).

Datengrundlagen, Bestandsaufnahme & Monitoring

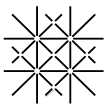
Um eine solide Grundlage für die zukünftige Beurteilung geothermischer Anwendungen zu schaffen, empfehlen wir die folgenden Massnahmen: (i) **Aktualisierung und Weiterentwicklung unserer Datenbank «Swiss Geotemperature Compilation – SGC»** mit aktuellen und nicht öffentlich zugänglichen Bohrlochdaten (z.B. auch Verknüpfung mit bestehenden Datenbanken, z.B. aktuelle Entwicklungen von CH-GNet); (ii) Analyse der Geologie im Bereich der Messung (Stratigraphie, regionaler Wärmefluss, lokale Tektonik, etc.); sowie (iii) Erstellung eines Probenahme- und Bohrlochtestprotokolls, welches den Genehmigungsbehörden auf Kantonsebene und den Betreibern der zukünftigen, vom Bund subventionierten Geothermieprojekten weiterzuleiten ist, damit diese umfassende thermische und hydrochemische sowie Tracer- und Geoindikator-Analysen erhalten.

Laut Heuberger and Morgenthaler (2023) sind gegenwärtig weniger als die Hälfte der Daten aus den Tiefbohrungen in der Schweiz frei zugänglich. Swisstopo und das BFE sollten formelle Vereinbarungen mit den Eigentümern dieser Daten abschliessen, um die darin enthaltenen relevanten thermischen und hydrochemischen Daten zu nutzen. Da Swisstopo dabei ist, seine Bohrlochdatenbank zu konsolidieren und zu harmonisieren, lohnt es sich, die Fertigstellung dieser Datenbank abzuwarten.

Um die Einflüsse der verschiedenen Veränderungen auf Grundwasservorkommen entsprechend zu erfassen und zu bewerten, ist es notwendig, vorhandene Langzeitdatensätze aufzubereiten. Weiterhin ist es notwendig, den Einfluss langfristiger jährlicher, saisonaler und ereignisbedingter (hydrologische Extreme) Entwicklungen der Grundwassertemperaturen für verschiedene Grundwasservorkommen zu bewerten. Dazu gehört auch eine Bewertung des Verlaufs der Grundwassertemperaturen

¹⁶ Indikatoren sind ein Merkmal, welches als (statistisch verwertbares) Zeichen für eine bestimmte Entwicklung, einen eingetretenen Zustand oder Ähnliches dient (Grundwassertemperaturen im Zusammenhang mit physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen).

¹⁷ Proxy ist eine Stellvertreter-Variable oder Ersatzgrösse, durch deren Messung man sich mittelbar Auskunft über eine andere Eigenschaft verschafft, die selbst durch eine Messung nicht zugänglich ist (z.B. in-situ elektrische Leitfähigkeit im Zusammenhang mit Mineralisation des Grundwassers).



für verschiedene Tiefen des Grundwasserleiters. Um die spezifischen Aspekte des Klimawandels und des anthropogenen Wandels zu erfassen, sollten ergänzende Beobachtungsstationen realisiert werden.

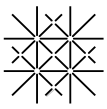
Für die Dokumentation des thermischen Einflusses ist eine kontinuierliche Überwachung der möglichen Risiken erforderlich, die bei geothermischen Anwendungen auftreten können. Geeignete Methoden umfassen (i) Monitoringsysteme zur Erfassung des Referenzzustandes und zur Überwachung des Langzeitverhaltens sowie; (ii) Rückführung geothermisch genutzter Tiefenwässer in den geologischen Untergrund (Stichwort: Regeneration).

Entsprechend der Analyse von hydrochemischen Hintergrundwerten in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz sollte auch eine Bestandsaufnahme von, an Tiefengrundwasser angepassten, hydrochemischen Hintergrundwerten für tiefe Grundwasservorkommen vorgenommen werden. Zudem sollten, aufgrund der diesbezüglich generell knappen und unvollständigen Datenlage in der Schweiz, Tiefengrundwasser-Verweilzeiten und -Fließwege basierend auf hydrologischen Tracer- und Geoindikatoranalysen ermittelt werden, um das Nutzungspotential inklusive der Grundwasserneubildungsrate zu erschliessen.

Grundwasserökosysteme

Viele Grundwasserökosysteme sind unersetzlich. Griebler and Avramov (2015) und Saccò et al. (2024) plädieren dafür, Grundwässer (und damit Aquifere) als wichtige Ökosysteme anzuerkennen. Die Autoren verdeutlichen die Kaskadeneffekte, die ausgelöst würden, wenn das Grundwasser weiterhin verunreinigt und/oder unangemessen genutzt wird. Die biologische Diversität von Grundwasserökosystemen wird durch die Grundwasserneubildung, den Aquifertyp und die Tiefe des Grundwasservorkommens bestimmt. Biozönose Gemeinschaften sind dabei oft vertikal geschichtete (Culver and Pipan, 2014). Es ist durchaus möglich, Proxy-Arten (Barua, 2011) für verschiedene Aquifertypen und Tiefen abzuleiten, um arten- und ökosystemfunktionsbezogene Artenschutzstrategien zu entwickeln (Simberloff, 1998). Dabei wird es schwierig sein, Schlüsselarten auf einer Skala von etwa 10 km zu identifizieren.

In Bezug auf die von der Motion geforderte Differenzierung von Tiefengrundwässern stellt sich die Frage, warum die Trinkwasserqualität das einzige Kriterium für die Nutzbarkeit von Tiefengrundwasser sein soll. Denn bei einer unzulässigen Beeinträchtigung des Gewässers wird nach dem Gesetz nicht unterschieden, ob es als Trinkwasser nutzbar ist oder nicht. Man darf per Gesetz kein Gewässer mehr als innerhalb gewisser Vorgaben beeinträchtigen. Der Grundsatz muss unserer Meinung nach stets für alle Gewässerarten gelten, so auch für tiefe Grundwasservorkommen. Denn auch bei tiefen Grundwasservorkommen besteht die Möglichkeit, dass eine zu hohe thermische Nutzung zu starker Beeinträchtigung der Biozönose führen könnte. Gesetzlich ist dieser Schutz bisher für Tiefengrundwasser in gleichem Masse wie für oberflächennahe Grundwasservorkommen gewährleistet, zum Beispiel durch die Begrenzung des thermischen Einflusses und das 3 °C-Kriterium. Während eine Anpassung des 3 °C-Kriterium in einem Tiefengrundwasserkontext durchaus diskutabel sein darf, gilt es



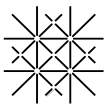
gleichzeitig hervorzuheben, dass gerade Tiefengrundwässer durch ihre verhältnismässig extremen Lebensbedingungen und relativen Entlegenheit oft eine Vielzahl an noch wenig erforschten, endemischen Mikroorganismen beherbergen. Rechtlich gesehen stellt sich daher die Frage, ob die biologische Vielfalt bzw. Einzigartigkeit von Tiefengrundwasservorkommen, bzw. deren ökologische Beeinträchtigung, ein mögliches Ausschlusskriterium für thermische Nutzungen darstellt, bzw. ob eine Nutzung gerade von Tiefengrundwasser mit seiner einzigartigen Biozönose ohne enge Temperatureinschränkung aufgrund der Gesetzgebung zum Naturschutz nicht einer weitergreifenden Gesetzesanpassung als lediglich einer Definition der Nutzbarkeit bzw. der Nicht-Nutzbarkeit im Sinne des Trinkwassers bedürfte.

Im Rahmen des Programms Nationale Grundwasserbeobachtung (NAQUA) werden momentan noch keine biologischen Indikatoren erhoben. Für oberflächennahe Grundwasservorkommen wurde allerdings kürzlich in einer wegweisenden nationalen Studie eine einzigartige Diversität an Makroinvertebraten identifiziert, welche ausreichend Anlass dazu geben würde, das nationale Biodiversitätsmonitoring auch auf Grundwasservorkommen auszudehnen (Schneider et al., 2024). Abgesehen von einigen artenspezifischen Studien, die auf eDNA aus dem Grundwasser basieren, existieren allerdings auch bisher nur wenige Publikationen, die sich mit der Mikrobengemeinschaft dieses Lebensraums befassen (Danielopol et al., 2000; Sohlberg et al., 2015), obwohl sich diese Methode vielleicht am besten für eine biologische Charakterisierung von Grundwasserlebensräumen eignet (Pawlowski et al. (2020); Schilling et al. (2023)). Die Entnahme repräsentativer Proben kann eine Herausforderung darstellen, da einige Grundwasserarten schwer zugänglich sein können, insbesondere, wenn es sich um nicht an die Oberfläche tretende, tiefe Grundwasservorkommen handelt. Allerdings können Trinkwasserbrunnen als guter Zugangspunkt genutzt werden. Oft sind die Dauer und die räumliche Ausdehnung des Wassertransports im Untergrund weniger bekannt, doch die kalte und dunkle Umgebung eignet sich vermutlich ideal, um eDNA länger zu konservieren. Um die erweiterte, d.h. thermische, Nutzbarkeit von Tiefengrundwasser im Sinne der Motion Jauslin eruieren zu können, wird im Hinblick auf die einzigartige Biozönose solcher Lebensräume eine Analyse der vorhandenen Biozönose basierend auf eDNA empfohlen.

Thermische Bewirtschaftung von Untergrundressourcen

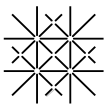
Für ein nachhaltiges Wärmemanagement, v.a. auch des urbanen Untergrundes, bedarf es der Kombination hochaufgelöster Temperaturmessnetze im Untergrund sowie thermisch-hydraulische Modelle (THM). Nur so können angepasste Rahmenbedingungen für die thermische Bewirtschaftung unterirdischer Ressourcen und eine differenzierte Betrachtung verschiedener Nutzungspotentiale in unterschiedlichen städtischen und ländlichen Räumen, in Locker- und Festgesteinen sowie in unterschiedlichen Tiefen erreicht werden. Neben einer lockereren und/oder restriktiveren Genehmigungspraxis sollten rechtliche Aspekte auf der Forderung beruhen, dass Wärme- und Wasserhaushalt (Art. 43 Abs. 1 GSchG) ausgeglichen sind.

Ziel ist die Erarbeitung von Grundlagen für Regelwerke, Planungshilfen und Werkzeuge (z.B. Karten-Layer, Interaktive Tools, Empfehlungen für Monitoringsysteme, etc.) für die Anwendung in der Praxis.



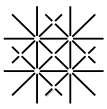
Neben der Verknüpfung mit Potential- und Bedarfsstudien und einer Diskussion im Zusammenhang mit Energierichtplänen soll dabei auch eine Beurteilung thermisch grossräumiger Einflüsse von Bauwerken auf den Untergrund und Grundwasserressourcen¹⁸ adressiert werden.

¹⁸ Nach heutigem Recht müssen bei Bauwerken im Gewässerschutzbereich A_u die Kantone, bzw. bei Bundesprojekten das federführende Amt, eine Bewilligung nach Art. 32 GSchV erteilen.

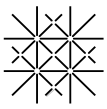


Referenzen

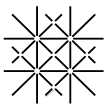
- Aeschbach-Hertig, W. and Solomon, D.K. (2013) The Noble Gases as Geochemical Tracers. Burnard, P. (ed), pp. 81-122, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BAFU 2009 Vollzugshilfe Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU, B. (ed), Umwelt-Vollzug.
- BAFU 2014 Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen, p. 116, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Barua, M. 2011. Mobilizing metaphors: the popular use of keystone, flagship and umbrella species concepts. *Biodiversity and Conservation* 20(7), 1427-1440.
- Bauer, S., Beyer, C., Dethlefsen, F., Dietrich, P., Duttman, R., Ebert, M., Feeser, V., Gorke, U., Kober, R., Kolditz, O., Rabbel, W., Schanz, T., Schafer, D., Wurdemann, H. and Dahmke, A. 2013. Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept. *Environmental Earth Sciences* 70(8), 3935-3943.
- Bayer, P., Rivera, J.A., Schweizer, D., Schärli, U. and Blum, P. 2016. Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. *Geothermics* 64, 289-299.
- Becker, D. and Epting, J. 2021. Thermischer Einfluss urbaner Untergrundstrukturen auf die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt. *Grundwasser*.
- Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K.-U. and Sillanpää, J. 1993 Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. 92-08, N.T.B.N. (ed).
- Biehler, D. and Schneemann, K.-U. 1999 Hydrochemische Charakterisierung von Tiefengrundwässern aus Aquiferen des Muschelkalk, Keuper, Lias und Dogger im Bereich des südwestdeutschen Molassebeckens. Bericht, U.N.I. (ed).
- Bitterli, T. and al., e. 2004. Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES. Bundesamt für Umwelt, Bern Tafel 8.6.
- Bridger, D.W. and Allen, D.M. 2010. Heat transport simulations in a heterogeneous aquifer used for aquifer thermal energy storage (ATES). *Canadian Geotechnical Journal* 47(1), 96-115.
- Brunner, P., Therrien, R., Renard, P., Simmons, C.T. and Franssen, H.J.H. 2017. Advances in understanding river-groundwater interactions. *Rev Geophys* 55(3), 818-854.
- Burger, H. 2016. Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen (Use and protection of deep groundwater in the conflict between opportunities, risks and regulatory requirements). *Swiss Bull. angew. Geol.* 21/1, 69-90.
- BUWAL 2004 Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, W.u.L. (ed), pp. 1-141, Bern.
- CH2018 2018 CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. ClimateServices, N.C.f. (ed), p. 271, Zurich.
- Culver, D.C. and Pipan, T. 2014. Shallow Subterranean Habitats Ecology, Evolution, and Conservation Preface. *Shallow Subterranean Habitats: Ecology, Evolution, and Conservation*, V-VI.
- Danielopol, D.L., Pospisil, P. and Rouch, R. 2000. Biodiversity in groundwater: a large-scale view. *Trends in Ecology & Evolution* 15(6), 223-224.
- energieschweiz 2017 Bewilligungsverfahren Grundwasserwärmenutzung in den Kantonen - Übersicht über die Bewilligungsverfahren für Grundwasserwärmenutzungen in den Kantonen.



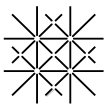
- Epting, J. 2017. Thermal management of urban subsurface resources – Delineation of boundary conditions. *Procedia Engineering*.
- Epting, J., Baralis, M., Kunze, R., Mueller, M.H., Insana, A., Barla, M. and Huggenberger, P. 2020a. Geothermal potential of tunnel infrastructures - development of tools at the city-scale of Basel, Switzerland. *Geothermics* 83.
- Epting, J., Handel, F. and Huggenberger, P. 2013. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(5), 1851-1869.
- Epting, J. and Huggenberger, P. 2013. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies - Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology* 501, 193-204.
- Epting, J. and Huggenberger, P. 2014. Energie als Abfall? *Aqua & Gas* (7/8), 34-39.
- Epting, J., Michel, A., Affolter, A. and Huggenberger, P. 2021. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X* 11, 100071.
- Epting, J., Michel, A., Huggenberger, P. and Affolter, A. 2020b. Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "future changes in hydrology", p. 118, Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), 3003 Bern, Switzerland.
- Epting, J., Răman, L.V., Affolter, A., Scheidler, S. and Schilling, O.S. 2023. Climate change adaptation and mitigation measures for alluvial aquifers - Solution approaches based on the thermal exploitation of managed aquifer (MAR) and surface water recharge (MSWR). *Water Research* 238, 119988.
- Epting, J., Răman Vinnå, L., Piccolroaz, S., Affolter, A. and Scheidler, S. 2022. Impacts of climate change on Swiss alluvial aquifers – A quantitative forecast focused on natural and artificial groundwater recharge by surface water infiltration. *Journal of Hydrology X*, 100140.
- Epting, J., Scheidler, S., Affolter, A., Borer, P., Mueller, M.H., Egli, L., Garca-Gil, A. and Huggenberger, P. 2017. The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources – A paradigmatic example. *Science of The Total Environment* 596-597, 87--96.
- Florides, G. and Kalogirou, S. 2007. Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable Energy* 32(15), 2461-2478.
- Giggenbach, W.F. (1991) Chemical techniques in geothermal exploration, UNITAR/UNDP publication, Rome.
- Griebler, C. and Avramov, M. 2015. Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science* 34(1), 355-367.
- GSchG 1991 Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer.
- GSchV 1998 Gewässerschutzverordnung (Stand am 1. Januar 2014). Bundesrat, D.S. (ed).
- Haehnlein, S., Bayer, P. and Blum, P. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14(9), 2611-2625.
- Heuberger, S. and Morgenthaler, J. 2023. Lithium in geothermal brines - Status report on the current situation in Switzerland and in neighbouring countries, p. 43, ETH Zurich.
- Högl, O. (1980) Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz, Verlag P. Haupt Bern.
- Huggenberger, P., Epting, J. and Scheidler, S. 2013. Concepts for the sustainable management of multi-scale flow systems: the groundwater system within the Laufen Basin, Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 69(2), 645-661.
- Luijendijk, E., Winter, T., Köhler, S., Ferguson, G., von Hagke, C. and Scibek, J. 2020a. Compiled data of flow-rate, temperature, hydrochemistry and isotope data for thermal springs in the Alps. PANGAEA.



- Luijendijk, E., Winter, T., Köhler, S., Ferguson, G., von Hagke, C. and Scibek, J. 2020b. Using Thermal Springs to Quantify Deep Groundwater Flow and Its Thermal Footprint in the Alps and a Comparison With North American Orogens. *Geophysical Research Letters* 47(22).
- Maréchal, J.C., Perrochet, P. and Tacher, L. 1999. Long-term simulations of thermal and hydraulic characteristics in a mountain massif: The Mont Blanc case study, French and Italian Alps. *Hydrogeology Journal* 7(4), 341-354.
- Medici, F. and Rybach, L. (1995) Geothermal map of Switzerland 1995 : (heat flow density), Schweizerische Geophysikalische Kommission / Commission Suisse de géophysique Zürich, Zürich.
- Nagra 1985 Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr. 85-01, N.P.N. (ed).
- Nagra 2002 Project Opalinuston: Syntheses of geoscientific investigation results.
- Nakatsuka, K. 1999. Field characterization for HDR/HWR: a review. *Geothermics* 28(4), 519-531.
- NCCS 2018 CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services, p. 24, Zurich.
- Paniconi, C. and Putti, M. 2015. Physically based modeling in catchment hydrology at 50: Survey and outlook. *Water Resour Res* 51(9), 7090-7129.
- Pawlowski, J., Apothéloz-Perret-Gentil, L., Mächler, E. and Altermatt, F. 2020 Anwendung von eDNA-Methoden in biologischen Untersuchungen und bei der biologischen Bewertung von aquatischen Ökosystemen. . . Umwelt-Wissen Nr. 2010: 77 S. Umwelt, B.f. (ed), Bern.
- Peiffer, L., Wanner, C., Spycher, N., Sonnenthal, E. and Kennedy, B.M. 2013. Multicomponent vs. Classical Geothermometry: An Evaluation using Reactive Transport Modeling. *Procedia Earth and Planetary Science* 7, 665-668.
- Purtschert, R. (2008) *Timescales and Tracers*, Blackwell Publishing Ltd.
- Saccò, M., Mammola, S., Altermatt, F., Alther, R., Bolpagni, R., Brancelj, A., Brankovits, D., Fišer, C., Gerovasileiou, V., Griebler, C., Guareschi, S., Hose, G.C., Korbel, K., Lictévout, E., Malard, F., Martínez, A., Niemiller, M.L., Robertson, A., Tanalgo, K.C., Bichuette, M.E., Borko, Š., Brad, T., Campbell, M.A., Cardoso, P., Celico, F., Cooper, S.J.B., Culver, D., Di Lorenzo, T., Galassi, D.M.P., Guzik, M.T., Hartland, A., Humphreys, W.F., Ferreira, R.L., Lunghi, E., Nizzoli, D., Perina, G., Raghavan, R., Richards, Z., Reboleira, A.S.P.S., Rohde, M.M., Fernández, D.S., Schmidt, S.I., van der Heyde, M., Weaver, L., White, N.E., Zagmajster, M., Hogg, I., Ruhi, A., Gagnon, M.M., Allentoft, M.E. and Reinecke, R. 2024. Groundwater is a hidden global keystone ecosystem. *Global Change Biology* 30(1), e17066.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D. and Rybach, L. 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 32(4-6), 579-588.
- Scheidler, S., Anders, B., Regli, C., Bolay, S. and Huggenberger, P. 2019. Geothermal use of an Alpine aquifer-Davos pilot study. *Grundwasser* 24(4), 277-286.
- Scheidler, S., Huggenberger, P., Dresmann, H., Auckenthaler, A. and Epting, J. 2021. Regional groundwater flow and karst evolution-theoretical approach and example from Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 80(5).
- Schilling, O., Sheldon, H.A., Reid, L.B. and Corbel, S. 2013. Hydrothermal models of the Perth metropolitan area, Western Australia: implications for geothermal energy. *Hydrogeology Journal* 21(3), 605-621.
- Schilling, O.S., Nagaosa, K., Schilling, T.U., Brennwald, M.S., Sohrin, R., Tomonaga, Y., Brunner, P., Kipfer, R. and Kato, K. 2023. Revisiting Mt Fuji's groundwater origins with helium, vanadium and environmental DNA tracers. *Nature Water* 1(1), 60-73.
- Schmassmann, H. 1990 Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. 88-07, N.T.B.N. (ed).



- Schmassmann, H., Balderer, W., Kanz, W. and Pekdeger, A. 1984 Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. 84-21, N.T.B.N. (ed).
- Schmassmann, H., Kullin, M. and Schnemann, K. 1992 Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. 91-30, N.T.B.N. (ed).
- Schneider, A.S., Knüsel, M., Alther, R. and Altermatt, F. 2024. Grundwasserbiodiversität: Makroinvertebraten in Schweizer Grundwasserökosystemen - Vorkommen, Vielfalt und Biomasse. *Aqua & Gas* 104(3), 16-21.
- Simberloff, D. 1998. Flagships, umbrellas, and keystones: Is single-species management passé in the landscape era? *Biological Conservation* 83(3), 247-257.
- Sohlberg, E., Bomberg, M., Miettinen, H., Nyyssönen, M., Salavirta, H., Vikman, M. and Itävaara, M. 2015. Revealing the unexplored fungal communities in deep groundwater of crystalline bedrock fracture zones in Olkiluoto, Finland. *Front Microbiol* 6.
- Sonney, R. and Vuataz, F.D. 2007. BDFGeotherm: the database of geothermal fluids in Switzerland. *Proc. European Geothermal Congress*.
- Spycher, N., Peiffer, L., Sonnenthal, E., Saldi, G., Reed, M. and Kennedy, B. 2014. Integrated multicomponent solute geothermometry. *Geothermics* 51, 113-123.
- Traber, D., Waber, H.N., Eichinger, L. and Heidinger, M. 2002 Hydrochemie und Isotopen-hydrologie von Tiefengrundwässern in der Region Lägeren – Zürcher Weinland – Hegau. Bericht, U.N.I. (ed).
- Vollmayr, T. 1983. Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der schweiz.
- Vuataz, F.D. 1982. Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. *Matér. Géol. Suisse, Sér. Hydrol.* 29.
- Vuataz, F.D. 1983. Hydrology, Geochemistry and Geothermal Aspects of the Thermal Waters from Switzerland and Adjacent Alpine Regions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 19(1-2), 73-97.
- Vuataz, F.D., Rouiller, J.-D., Dubois, J.-D., Bianchetti, G. and Besson, O. 1993. Programme GÉOTHERMOVAL: résultats d'une prospection des ressources géothermiques du Valais, Suisse. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel* 12, 1-37.
- Waber, H.N., Bissig, P., Huggenberger, P., Meylan, B., Milnes, E., Schürch, M. and Walter, U. 2015. Tiefengrundwasser - Vorkommen, Nutzungspotential und Schutzwürdigkeit. *Aqua & Gas* (4), 10.
- Waber, H.N. and Traber, D. 2022 Die Tiefengrundwässer in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland: Beschaffenheit, Herkunft und unterirdische Verweilzeit. *Nagra* (ed).



Anhang A: Datengrundlage

Datengrundlage	Quelle	Format / Auflösung	Bemerkung
GW-T	BAFU: NAQUA-QUANT	Zeitreihen / Tagesdaten °C	NAQUA-QUANT: Analyse Zusammenhang T-Atmosphäre, Raumkategorie, Haupttypen GW-Leiter, etc.
T-Atmosphäre	www.map.geo.admin.ch MeteoSchweiz	Raster / 1 km x 1 km	Klimanormwerte 1991 – 2020
GW-Vorkommen / GW-Leitertypen	www.map.geo.admin.ch BAFU	Polygon	Zusammenhang Haupttypen GW-Leiter Hydrologischen Atlas der Schweiz
Haupttypen GW-Leiter	Hydrologischer Atlas der Schweiz	Polygon	Karte 8.4: Flussschotter, fluvioglaziale Ablagerungen, Karbonatkarst-Gestein, Molassegestein, kristallines Silikatgestein
Basaler Wärmestrom	www.map.geo.admin.ch SwissTopo	Isolinien mW m ²	Ergänzt und extrapoliert auf Grundlage von Medici & Rybach (1995)
Datenbank Geotherme Fluide	BDF Geotherm Data (Sonney and Vuataz, 2007)	Punktdaten	Beinhalten Temperatur, Tiefe, Hydrochemie inkl. TDS und Isotopen.
Temperatur von Alpinen Quellen	Alpine Springs (Luijendijk et al. 2020ab)	Punktdaten	Beinhalten Temperatur und Tiefe
Bohrungen > 500 m Tiefe von Swisstopo	Swisstopo	Punktdaten	Teilweise Temperaturen vorhanden, komplementieren Temperatur und Tiefe anderer Datengrundlagen
Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz	(Vollmayr, 1983)	Tiefenprofile (analoge Daten)	Temperatur Tiefenprofile, an verschiedenen Tiefen abgelesen und in die Datenbank SGC aufgenommen
T-Atmosphäre RCP 8.5 (Abb. A1)	www.map.geo.admin.ch MeteoSchweiz	Raster °C / 25 m x 25 m	Mittlere Höchstwerte Tagesganges Lufttemperatur Juli, Periode 2070-2099, Szenario RCP 8.5
Gebiete nutzbarer GW-Vorkommen (Abb. A2)	www.map.geo.admin.ch BAFU	Polygon	Auszug digitale Gewässerschutzkarte
Hydrogeologische Karte	www.map.geo.admin.ch BAFU	Polygon	GW-Vorkommen / GW-Vulnerabilität
Ergiebigkeit	BAFU	Polygon	
GW-Regime	BAFU	Polygon	
Versiegelung	www.atlas.bfs.admin.ch/maps BFS	Polygon / Gemeinde	Alternative Raumkategorie?
Bevölkerung und Haushalte	BFS	Raster	Anhang X
GW-T	BAFU: NAQUA-TREND & -SPEZ ¹⁹	Stichtagsmessungen	Dienen hauptsächlich Grundwasserqualität aber beinhalten auch Temperaturwerte. Datensatz in der Auswertung nicht vorhanden.
T-Daten Mittelland	www.map.geo.admin.ch SwissTopo	Raster °C / 25 m x 25 m	Höhe 60, 100 und 150°C-Isotherme; Temperaturen 500, 1'000, 1'500, 2'000, 3'000 und 4'000 m Tiefe; Temperaturen Top Muschelkalk OMM, Oberer Malm
Höhenmodell Felsoberfläche	www.map.geo.admin.ch SwissTopo	Raster m ü.M. / 25 m x 25 m	Molassebecken und grosse Alpentäler (Rhein, Rhône, Aare, Reuss, Linth und Ticino) Potential Evaluation Beckenstrukturen Lockergesteinsgrundwasservorkommen
Mächtigtkeitsmodell Lockergestein	www.map.geo.admin.ch SwissTopo	Raster m / 25 m x 25 m	Molassebecken und grosse Alpentäler (Rhein, Rhône, Aare, Reuss, Linth und Ticino) Potential Evaluation Beckenstrukturen Lockergesteinsgrundwasservorkommen

¹⁹ Im Rahmen von NAQUA TREND und SPEZ wird die Wassertemperatur, wenn möglich, manuell punktuell gemessen (2- bis 4-mal pro Jahr). In NAQUA TREND wird die Grundwassertemperatur zusätzlich kontinuierlich an Förderbrunnen gemessen, welche durch den Pumpbetrieb stark beeinflusst ist und von der Temperatur im Ruhezustand abweichen kann. Nach Rücksprache mit dem BAFU wurde eine Auswertung der Daten für die vorliegenden Untersuchungen deshalb nicht weiterverfolgt.

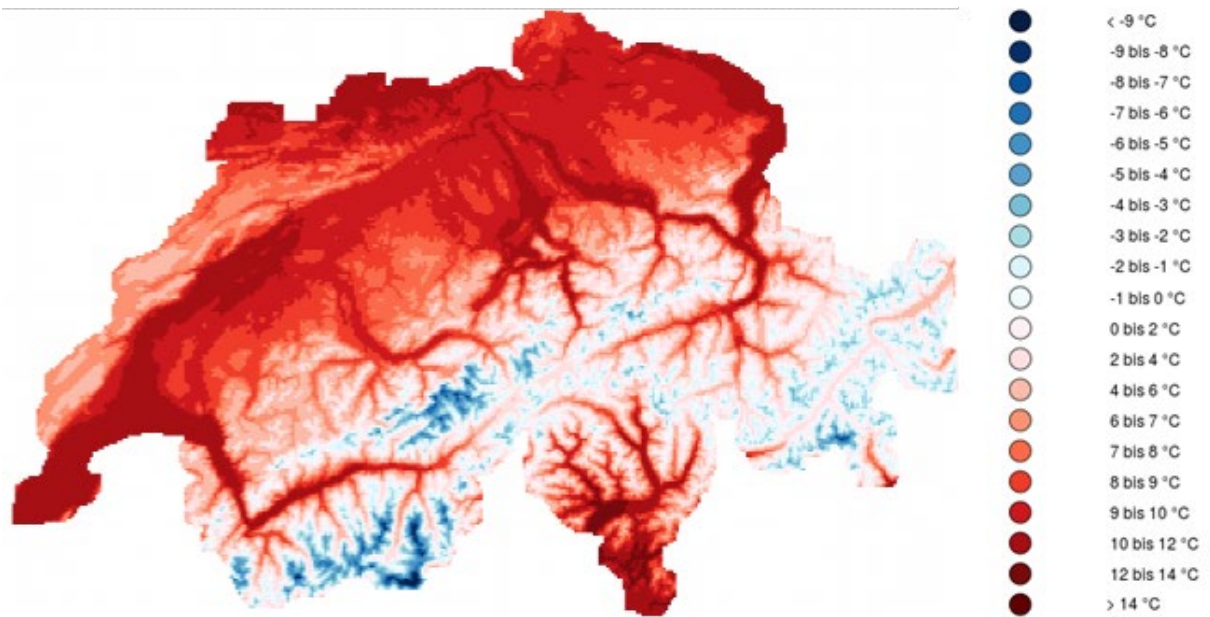
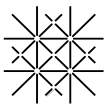


Abb. A1 Jährliche Klimanormwerte Temperatur 1991-2020 (MeteoSwiss).

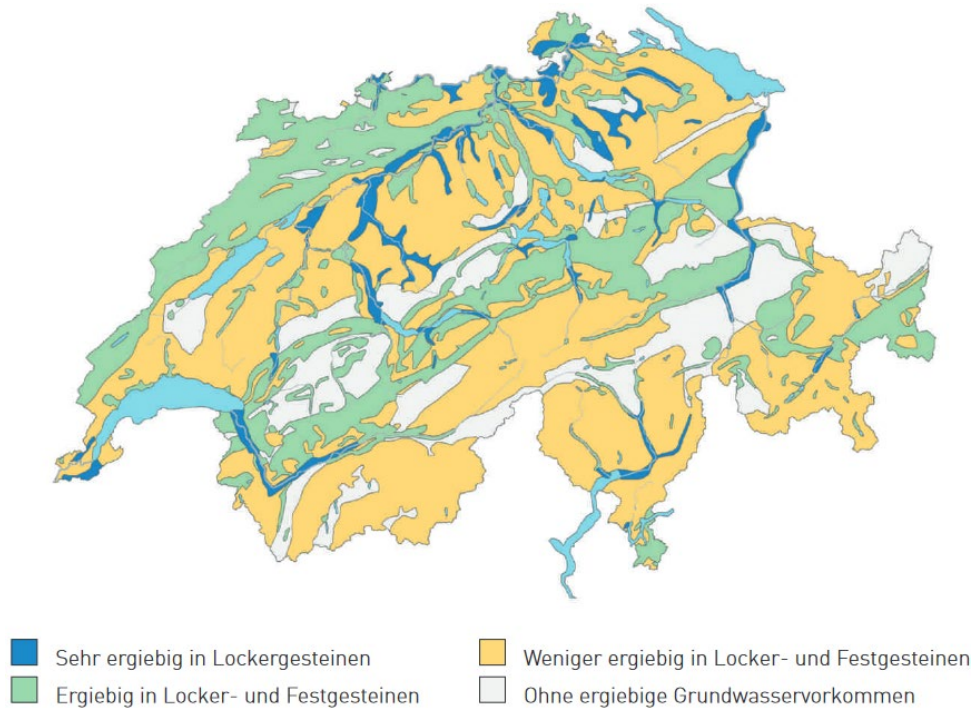
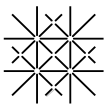


Abb. A2 Übersichtskarte der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen (BAFU).



Anhang B: Grundlagen swisstopo

Grundwasservorkommen 1:500'000 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo)²⁰

Das erste Blatt (GK500-Hydro) stellt die verschiedenen Grundwasservorkommen der Schweiz und deren Ergiebigkeit, das zweite Blatt (GK500-Hydro_Vul) die Empfindlichkeit der Grundwasservorkommen bezüglich möglicher Gefährdungen durch Schadstoffe dar. Das Blatt Grundwasservorkommen zeigt zudem die Art der Grundwasserzirkulation (Karst-, Kluft- und Lockergesteine), die wichtigsten Quell- und Grundwasserfassungen sowie hydrodynamische Angaben zu den Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten.

Höhenmodell der Felsoberfläche (Bundesamt für Landestopografie swisstopo)²¹

Das Höhenmodell der Felsoberfläche ist ein flächendeckendes Modell der Felsoberfläche (bzw. der Basis der Lockergesteine) im Molassebecken, in den grossen Alpentälern (Rhein, Rhône, Aare, Reuss, Linth und Ticino) und in einem Teil des Jura- und Appenzellergebirges. Dieses digitale Höhenmodell besteht aus einem Raster mit einer Maschenweite von 25 m und zeigt die Höhe in m ü.M. 3D-Modelle stellen Vereinfachungen der realen Geologie dar.

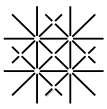
Temperaturmodell des Untergrundes des Schweizer Mittellandes - Höhe der 60, 100 und 150 °C – Isotherme; Temperaturen in 500, 1'000, 1'500, 2'000, 3'000 und 4'000 m Tiefe; Temperaturen Top Muschelkalk OMM, Oberer Malm, einschliesslich Eingangsdaten und Grenze des Modells (Bundesamt für Landestopografie swisstopo)²²

Ein wichtiger Parameter für die Beurteilung des geothermischen Potentials des Schweizer Molassebeckens ist die Temperaturverteilung unter der Erdoberfläche. Diese Karten zeigen die Höhenlinien der 60, 100 und 150°C-Isotherme, die Temperaturverteilung in Tiefen von 500, 1'000, 1'500, 2'000, 3'000 und 4'000 m unter der Erdoberfläche und Temperaturen Top Muschelkalk OMM, Oberer Malm und die Störungen auf der gleichen Höhenlage. Diese gehört zu einer Serie, die die Temperaturverteilung auf ausgewählten Oberflächen zeigt (repräsentierend seismische Markerhorizonte, konstante Tiefen unter der Erdoberfläche oder Isothermen). Die Horizontoberflächen stammen aus dem geologischen 3D-Modell GeoMol15 und dem darauf basierenden GeoMol15-Temperaturmodell, das aus regelmässigen Zellen mit einer Grösse von 1000x1000x100 m besteht. Dieses Temperaturblockmodell ist abgeleitet von einem FE-Methode-Temperaturmodell (Geowatt AG, 2015), das vor allem auf 31 vertikalen Temperaturprofilen und den Horizontoberflächen des Seismischen Atlas des Schweizerischen Molassebeckens (2012) basiert. Die FE-Temperaturmodellierungsmethode nimmt nur den

²⁰ <https://opendata.swiss/en/dataset/hydrogeologische-karte-der-schweiz-grundwasservorkommen-1-500000>

²¹ <https://opendata.swiss/de/dataset/hohenmodell-der-felsoberflaeche>

²² <https://viewer.geomol.ch> oder <https://map.geo.admin.ch>

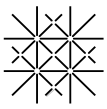


konduktiven Wärmestrom an und berücksichtigt den konvektiven Wärmestrom nicht. Das Modell GeoMol15 und das zugehörige Temperaturmodell stehen zur Online-Ansicht über den GeoMol-Viewer zur Verfügung. Siehe auch die zugehörige Karte «Temperaturmodell - Daten» auf map.geo.admin.ch.

Geothermische Karte der Schweiz 1:500'000 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, SGPK)²³

Die geothermische Karte zeigt die Wärmeenergie, die im Untergrund produziert wird und die durch einen 1 m^2 an der Erdoberfläche fließt. Die Wärme selbst wird grossenteils in der Erdkruste (ca. 30 km mächtig) durch radioaktive Zerfallsprozesse freigestellt. Im Mittel beträgt der Wärmefluss in der Schweiz ca. 90 mW/m^2 . Die Nordschweiz hat die höchsten Werte und der Alpenraum/Jura hat die tiefsten Werte. Abweichungen treten durch zirkulierende Tiefenwasser in durchlässigen Gesteinsschichten auf. Die Wärmefluss-Daten werden aus Temperaturgradient (Mittelwert ca. 30 K/km) und Wärmeleitfähigkeit der Gesteine (Mittelwert ca. 3 W/m/K) berechnet. - Papierkarte: PH. BODMER, 1982. - Bericht mit Aktualisierung: GP-30, F. MEDICI & L. RYBACH, 1995.

²³ <https://opendata.swiss/de/dataset/geothermische-karte-der-schweiz-1-500000>



Anhang C: Grundlagen Nagra

Waber and Traber (2022)

Historie der hydrogeologischen Untersuchungen

Der folgende Abschnitt fasst die Historie der hydrogeologischen Untersuchungen zusammen und führt die relevanten Referenzen auf.

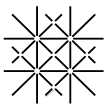
Im Rahmen des Projekts Gewähr 1985 (Nagra, 1985) führte die Nagra in der Nordschweiz ausgedehnte hydrochemische Untersuchungen an oberflächennahen und tiefen, aus Tiefbohrungen entnommenen Grundwässern durch. Eine erste zusammenfassende Beschreibung der erarbeiteten hydrochemischen Daten findet sich in Schmassmann et al. (1984). In den folgenden Jahren wurde die erste hydrochemische Synthese Nordschweiz erarbeitet, welche eine detaillierte Beschreibung der damals beprobten Lokalitäten bezüglich der geologischen und hydrochemischen Verhältnisse beinhaltet. Für die wasserführenden Systeme im Tertiär und Malm findet sich diese in Schmassmann (1990), für diejenigen des Doggers, Lias, Keupers und Muschelkalks in Biehler et al. (1993) und für diejenigen des Buntsandsteins, Perms und Kristallins in Schmassmann et al. (1992).

Hydrogeologische Einheit

Die im Nagra Bericht (Waber and Traber, 2022) definierten hydrogeologischen Einheiten gliedern die Gesteinsabfolge nach hydrogeologischen Gesichtspunkten. Diese Gliederung orientiert sich stark an der Lithostratigraphie und ist in jedem Fall abhängig vom betrachteten Massstab und damit auch projektspezifisch. Hydrogeologische Einheiten können lithostratigraphische Einheiten zusammenfassen oder von diesen abweichenden Begrenzungen im Hangenden und im Liegenden aufweisen. Um die Unterschiede zur aktuellen lithostratigraphischen Gliederung klar erkennbar zu machen, werden in der Regel spezifische Bezeichnungen gewählt (z.B. Keuper-Aquifer), die sich oft an älteren Begriffen orientieren.

Hydrogeologische Einheiten können aufgrund tektonischer Überprägung oder aufgrund von Tiefenlage und Verkarstung eine lokal unterschiedliche Wasserführung aufweisen. Eine hydrogeologische Einheit kann aus einer einzelnen oder einem Komplex von mehreren lithologischen Einheiten bestehen (z.B. die Effinger Schichten).

Das Ziel des Berichts (Waber and Traber, 2022) war die Darstellung der hydrochemischen und isotopehydrogeologischen Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. Eine hydrogeologische Einheit wird hier als Aquifer bezeichnet, wenn aus ihr im Rahmen von tiefen Bohrungen Grundwasser gepumpt werden kann. Dabei kann aber die hydraulische Durchlässigkeit deutlich geringer sein, als dies gemeinhin für die wasserwirtschaftliche Definition eines Aquifers der Fall wäre.



Weitere Themenbereiche, welche behandelt wurden umfassen: Wassertyp & Mineralisation / Herkunft von Mineralisation und Salinität, Herleitung der Infiltrationsbedingungen, chemische Zusammensetzung, klimatische Bedingungen sowie die Herleitung von Grundwasser-Verweilzeiten.

Grundwasserleitende hydrogeologische Einheiten

Grundwasser, welches in die Tiefe infiltriert, erhält seine charakteristische Mineralisation und Isotopenzusammensetzung entlang des Fließwegs durch Wechselwirkung mit den Gesteinen, durch mögliche Mischungen mit anderen Grundwasserkomponenten und, bei langer Verweilzeit im Untergrund, durch den Austausch mit Porenwasser in gering durchlässigen Lithologien. Gelöste Gase können zusätzlich durch einen Zufluss aus grosser Tiefe (Erdkruste, Erdmantel) in das Grundwasser gelangen. Die Interpretation hinsichtlich der Entwicklung eines Grundwassers und dessen möglicher Fließwege muss deshalb im Hinblick auf die geologisch-tektonischen Verhältnisse durchgeführt werden.

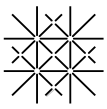
Traditionell werden Grundwasservorkommen in Zusammenhang mit den hydrogeologischen Einheiten beschrieben, in welchen sie auftreten bzw. in welchen die Grundwasserentnahme stattfindet. In den Grundwasseruntersuchungen in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland wurde diese Vorgehensweise auch in früheren Arbeiten angewendet (Biehler et al., 1993; Biehler and Schneemann, 1999; Schmassmann, 1990; Schmassmann et al., 1984; Schmassmann et al., 1992; Traber et al., 2002).

Neben den **Molasse-Einheiten** (Tertiär, siehe oben) wurden dabei jeweils die nachfolgend aufgeführten, in unterschiedlichem Mass grundwasserleitenden hydrogeologischen Einheiten unterschieden (**Abb. C1**):

Der **Malm-Aquifer** ist eine mächtige Abfolge von geklüfteten, teilweise verkarsteten, z.T. massigen, z.T. gebankten Kalken des Oberen Malms (Oberjura). Aufgrund der regionalen Verbreitung, Mächtigkeit und Kontinuität der Malm-Sedimente ist der Malm-Aquifer neben dem Muschelkalk der bedeutendste Tiefenaquifer im süddeutschen Molassebecken und eingeschränkter auch im Molassebecken der Nordschweiz.

Die **Effinger Schichten** bilden aufgrund ihrer mächtigen Mergelabfolgen als hydrogeologische Einheit insgesamt einen Stauer (Aquitard) unter dem Malm-Aquifer. Einschaltungen von geklüfteten Kalkbankabfolgen mit lokal erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten sind dafür verantwortlich, dass aus dieser hydrogeologischen Einheit auch gelegentlich Grundwasserproben entnommen werden können. Die Wasserführung hat aber nur eine lokale Bedeutung. Die vergleichsweise wenigen bekannten Grundwasservorkommen aus Bohrungen werden deshalb zusammen mit dem Malm-Aquifer behandelt.

Der **Hauptrogenstein-Aquifer** bildet als hydrogeologische Einheit im westlichen Tafeljura und im Faltenjura einen Kluft- und teilweise Karst-Aquifer, über dessen Bedeutung als Tiefenaquifer wenig bekannt ist. Zum Hauptrogenstein-Aquifer werden auch die Birnenstorfer Schichten (Basis der



Wildegg-Formation) gezählt, welche im Faltenjura einen gering mächtigen, verkarsteten Aquifer bilden können.

Die hydrogeologische Einheit **Lias** ist in der zentralen Nordschweiz allgemein gering durchlässig. Lokal können im Faltenjura die geklüfteten, z.T. sandigen Kalkabfolgen im Bereich des unteren Lias v.a. oberflächennah eine Wasserführung aufweisen. Im süddeutschen Molassebecken ist der Lias aufgrund unterschiedlicher fazieller Ausbildung vermehrt wasserführend.

Der **Keuper-Aquifer** umfasst als hydrogeologische Einheit alle teils porösen, teils geklüfteten sandigen und dolomitischen wasserführenden Einheiten des ehemals 'Oberen Keupers' und 'Mittleren Keupers' über dem Gipskeuper (für die heutigen stratigraphischen Bezeichnungen).

Der **Muschelkalk-Aquifer** beinhaltet als hydrogeologische Einheit die karbonatischen Abfolgen des Trigonodus-Dolomits und des Hauptmuschelkalks (Plattenkalk und Trochitenkalk) des 'Oberen Muschelkalks'. Es handelt sich um einen kombinierten Poren-/Kluft-Aquifer. Der Muschelkalk-Aquifer bildet – neben den Molasse-Einheiten und dem Malm-Aquifer – den wohl bedeutendsten Tiefenaquifer der Region, aus welchem beispielsweise auch die Thermalwässer von Schinznach-Bad und von Baden/Ennetbaden stammen. Zum Muschelkalk-Aquifer wird auch der in Oberflächennähe oft poröse Dolomit der Anhydritgruppe (oberster Teil des Mittleren Muschelkalks) gezählt.

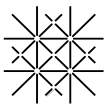
Der **Buntsandstein-Aquifer** umfasst als hydrogeologische Einheit die teils porösen, teils klüftigen Sand- und Siltsteine des ehemals 'Oberen' und 'Mittleren Buntsandsteins' (neu: Dinkelberg-Formation). Im süddeutschen Raum beinhaltet der 'Buntsandstein-Aquifer' auch den 'Unteren Buntsandstein', welcher in der Schweiz nicht vorhanden ist.

Die hydrogeologische Einheit **Permokarbon** besteht aus einer Abfolge von Silt- und Sandsteinen mit lokalen Einschaltungen von Tonsteinen und Kohle. Die Wasserführung ist hauptsächlich an Klüfte und Störungen gebunden. Ungeklüftete oder nicht gestörte Sand- und Siltsteine sind in der Regel diagenetisch stark zementiert und sehr gering durchlässig. Bisher bekannte Grundwasservorkommen beschränken sich mit einer Ausnahme auf die klastischen Abfolgen des Perms.

Die hydrogeologische Einheit **kristallines Grundgebirge** umfasst sämtliche wasserführenden Zonen im Kluftnetzwerk und in den tektonischen, z.T. hydrothermal überprägten Störungszonen in den granitischen und metamorphen Gesteinen des Grundgebirges.

Fünf dieser hydrogeologischen Einheiten (Tertiär, Malm, Muschelkalk, Buntsandstein und kristallines Grundgebirge) weisen eine regionale Ausdehnung auf und bilden regionale Grundwasserleiter. Beim kristallinen Grundgebirge zeigt der oberste Bereich (einige 100 m) in der Regel die grösste Kontinuität. Die restlichen Einheiten (Effinger Schichten, Haupttrogenstein, Lias, Keuper und Permokarbon) sind aufgrund lithologischer und fazieller Veränderungen über kurze Distanzen für die Grundwasserführung eher von lokal begrenzter Bedeutung.

In den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten ist die Art der Wasserführung sehr variabel und hängt von der lithologischen Ausbildung und der geologischen Entwicklung ab. Jedem der Kapitel



über eine hydrogeologische Einheit ist deshalb ein kurzer Abriss über die wichtigsten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse vorangestellt.

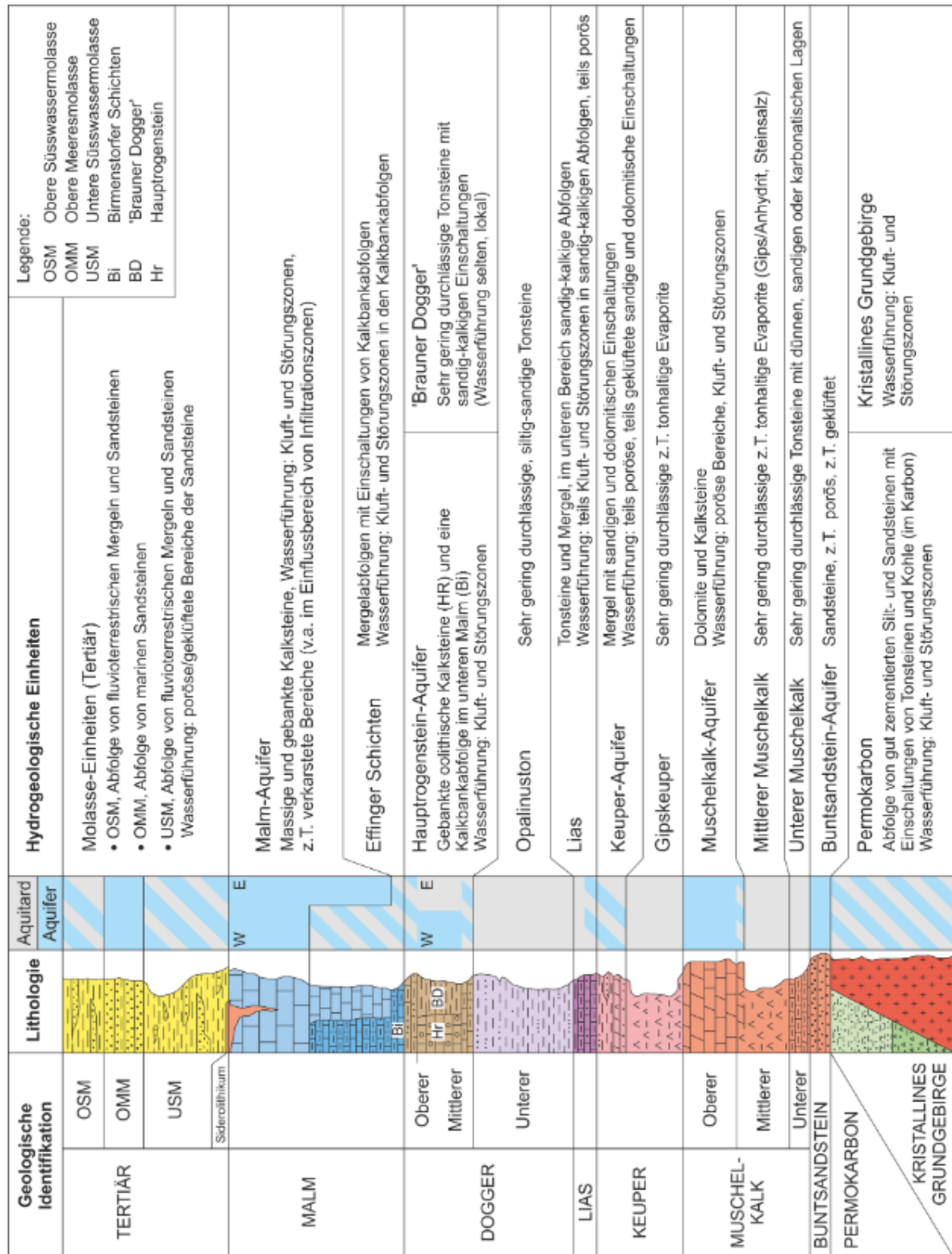
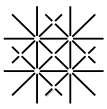


Abb. C1 Vertikaler hydrogeologischer Aufbau (hydrogeologische Einheiten) der Festgesteine der Nordschweiz und des angrenzenden Gebiets in Süddeutschland (Nagra (2002), überarbeitet). Aquifere in den quartären Lockergesteinen sind über allen Festgesteinseinheiten vorhanden (ausgenommen Karbon).



Anhang D: Auswirkungen von Klimaänderungen auf Grundwasserressourcen

Epting et al. (2020b)

Projektziel des Hydro-CH2018 Zusatzmoduls «Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen»²⁴ war eine differenzierte Betrachtung der Einflüsse, welche die Grundwassertemperaturen bestimmen. Eine Auswahl, der im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeiteten Klimaprojektionen (CH2018, 2018), ermöglichte es die Sensitivität von Grundwassertemperaturen in Zusammenhang mit den wesentlichen Grundwasserneubildungsprozessen zu beschreiben.

Für nicht-urbane und ländliche Gebiete wird erwartet, dass der Klimawandel insgesamt einen starken Einfluss auf die Grundwassertemperaturen hat. Hingegen dürften in urbanen Gebieten direkte anthropogene Einflüsse weiterhin dominieren (Huggenberger and Epting, 2011). So resultiert die vermehrte thermische Nutzung des Untergrundes und die Abwärme von Untergrundstrukturen als auch Anpassungsstrategien in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung («positive Rückkopplung») in erhöhten Grundwassertemperaturen. Messdaten für Basel zeigen, dass Grundwassertemperaturen, allein für den Zeitraum von 1993 bis 2016, im Mittel um 3.0 ± 0.7 K stiegen und in stark urbanisierten Gebieten sogar über 18 °C erreichen können. Bei flachgründigen Grundwasservorkommen mit geringer Mächtigkeit, wie z.B. in Davos, ist damit zu rechnen, dass die Temperaturen des Grundwassers stark beeinflusst werden. Dagegen sind Temperaturveränderungen bei tiefgründigen Grundwasserressourcen, wie z.B. in Biel, oder teilweise grossen Flurabständen, wie z.B. Winterthur, nur stark gedämpft und über lange Beobachtungszeiträume zu erwarten. Auswirkungen auf die Grundwassertemperaturen hängen vor allem mit saisonalen Verschiebungen der Grundwasserneubildung zusammen. So geht eine Verlagerung von Niederschlags- und Hochwasserereignissen vom Sommer in die Wintermonate einher mit einer Zunahme der Grundwasserneubildung in vergleichsweise «kühlen Jahreszeiten» („negative Rückkopplung“). Wie schon in vorausgehenden Arbeiten (z.B. CH2014-Impacts (2014)) konnte aufgezeigt werden, dass die Interaktion mit Oberflächengewässern und eine verstärkte Grundwasserneubildung während hoher Wasserführung der Fließgewässer die Temperaturprägung des Grundwassers stark beeinflussen werden.

Mit den Resultaten der Forschungsarbeit konnten Grundlagen geschaffen und Wissenslücken im Zusammenhang mit der Variabilität hydraulischer und thermischer Grundwasserregime Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen geschlossen werden. Adäquate Monitoring-Konzepte und quantitativer Analysemethoden (Modellierung, GIS), erlauben es dabei den Spielraum für lokale Anpassungsstrategien, wie z.B. vermehrte Nutzung der «Abfallwärme» aus urbanen Grundwasserleitern mit gleichzeitig Reduktion erhöhter Grundwassertemperaturen, zielgerichteter und effizienter zu nutzen.

²⁴ file:///C:/Users/epting/Downloads/Zustand-Lockergesteins-Grundwasservorkommen.pdf

Anhang E: Regionale Fließsysteme

Viele Grundwassersysteme bestehen aus multiskaligen Aquifer-Einheiten; die Austauschprozesse und -raten zwischen diesen Grundwasserleitern sind sehr komplex. Dies betrifft v.a. auch die Geometrie und die Skalen der verschiedenen Grundwasserleitereinheiten, welche durch ein ausgeprägtes lokales Relief gekennzeichnet sind, wie auch die Übergangszone zwischen den Jura Gebirgsketten und dem Mittelland.

Eine Analyse der regionalen Fließsysteme, basierend auf dem Konzept der hierarchischen Grundwasserströmungssysteme (Abb. E1), würde es erlauben, den topographisch bedingten, schwerkraftgetriebenen Grundwasserfluss und die Überlagerung mehrerer Strömungssysteme zu betrachten. Dabei bestimmen Topographie und Anisotropie die Geometrie und die Durchdringung der verschiedenen Fließsysteme. Das Fließsystemkonzept zeigte bereits vielversprechende Ergebnisse um Grundwasserströmungssysteme in topographisch und geologisch komplexen Gebieten zu beschreiben (Huggenberger et al., 2013; Scheidler et al., 2019; Scheidler et al., 2021).

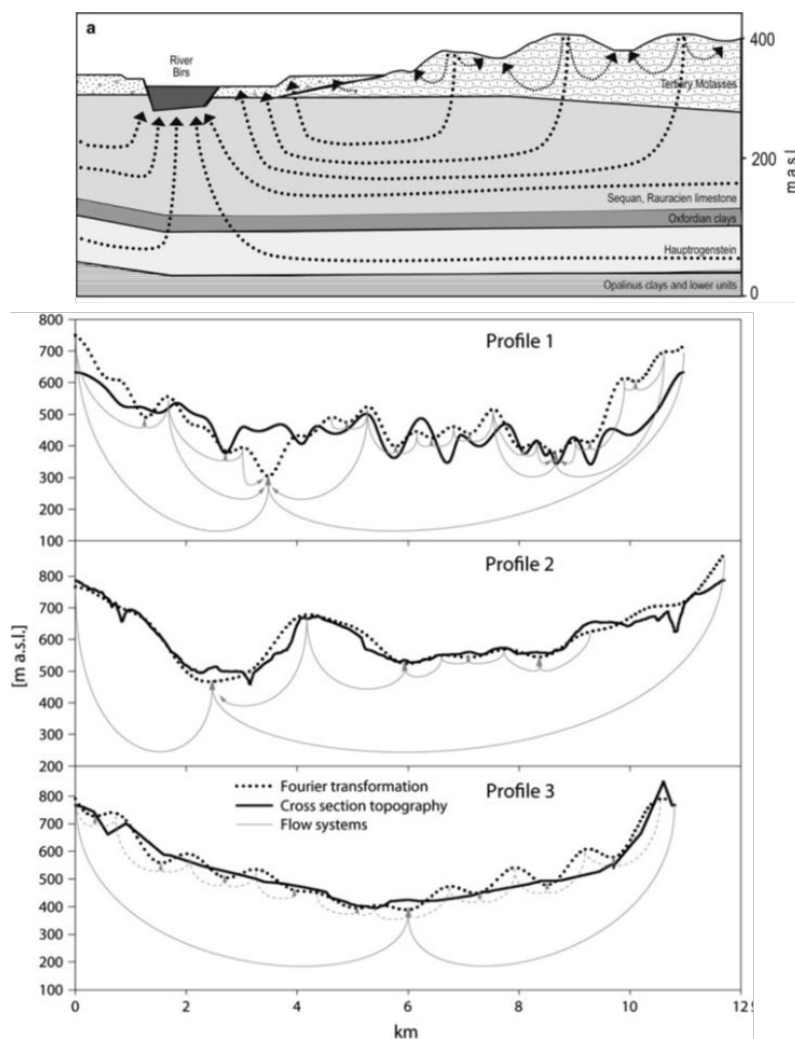


Abb. E1

Schematische Darstellung der regionalen Grundwasserzirkulation und möglicher Konstellationen (Wellenlänge/Eindringtiefe) bei der Ermittlung der jeweiligen Überlagerungsmächtigkeit oder Fourier-Analyse der Topographie als Grundlage für die Abschätzung der räumlichen Skalen des Grundwasserspiegels (Huggenberger et al., 2013).