

# **Ausdehnung von Grundwasservorkommen in der Schweiz und deren geochemische Zu- sammensetzung**



Artesisches Tiefengrundwasser, Passwang-Formation (Dogger), Mont Terri URL (Photo hnw 2010)

Bern, 17.10.2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

## **Impressum**

**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:** WaterGeoChem Consulting, Bern

**Autor:** H. Niklaus Waber

**Begleitung BAFU:** Marc Schürch, Stefanie Wirth, Stephanie Zimmermann

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

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Figurenverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Datengrundlage &amp; Nomenklatur.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Hydrogeologischer Hintergrund .....</b>	<b>5</b>
3.1 Tafeljura (Ausseralpine Plattform, Vorland).....	7
3.2 Faltenjura (Juragebirge).....	7
3.3 Mittelland: Molassebecken und subalpine Molasse .....	9
3.4 Alpennordrand: Helvetikum & Teile der Penninischen Sedimentdecken .....	11
3.4.1 Helvetische Sedimentdecken .....	11
3.4.2 Penninische Sedimentdecken im Norden des Helvetikums.....	13
3.5 Alpenraum: Kristallin des Helvetikums und Penninikum, Ostalpin und Südalpin .....	14
3.5.1 Kristallin des Helvetikums .....	15
3.5.2 Penninikum .....	15
3.5.3 Ostalpin.....	17
3.5.4 Südalpin .....	19
3.5.5 Salassikum .....	19
<b>4 Grundwasser in oberflächennahen Grundwasserleitern .....</b>	<b>21</b>
4.1 Verbreitung von oberflächennahen Grundwasserleitern .....	21
4.2 Grundwasser in Lockergesteinen.....	22
4.2.1 Generelle chemische Charakterisierung .....	22
4.2.2 Redox-Bedingungen .....	23
4.2.3 Metallische Spurenelemente .....	24
4.3 Grundwasser im Festgestein .....	31
4.3.1 Generelle chemische Charakterisierung .....	31
4.3.2 Redox-Bedingungen .....	32
4.3.3 Metallische Spurenelemente .....	34
<b>5 Grundwasser in tiefliegenden Aquiferen (Tiefengrundwässer) .....</b>	<b>47</b>
5.1 Verbreitung tiefliegender Aquifere.....	47
5.1.1 Hydrogeologische Einheiten.....	49
5.2 Chemische Zusammensetzung von Tiefengrundwässern .....	54
5.2.1 Generelle chemische Charakterisierung .....	54
5.2.2 Redox-Bedingungen .....	57
5.2.3 Metallische Spurenelemente .....	59
5.3 Verweilzeit und Erneuerung von Tiefengrundwässern .....	73

<b>6</b>	<b>Heutige Nutzung von Tiefengrundwässern in der Schweiz .....</b>	<b>75</b>
6.1	Trinkwasserversorgung.....	75
6.2	Mineral- & Heilwässer .....	75
6.3	Thermalwässer: Balneologie & Geothermie.....	76
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Schlussfolgerungen .....</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>83</b>

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Klassifikation von Grundwasser aufgrund der Mineralisation. ....	4
Tab. 4-1:	Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19. ....	25
Tab. 4-2:	Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	26
Tab. 4-3:	Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19. ....	27
Tab. 4-4:	Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	28
Tab. 4-5:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19. ....	29
Tab. 4-6:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	30
Tab. 4-7:	Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, Mittelland, Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	36
Tab. 4-8:	Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, Mittelland, Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	37
Tab. 4-9:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, und Mittelland, Daten 2018/19. ....	38
Tab. 4-10:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in oberflächennahem Grundwasser in Festgestein am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19. ....	39
Tab. 4-11:	Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010. ....	40
Tab. 4-12:	Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010. ....	42
Tab. 4-13:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010. ....	44
Tab. 5-1:	Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz. ....	61
Tab. 5-2:	Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten im Mittelland der Schweiz. ....	62
Tab. 5-3:	Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland der Schweiz. ....	63
Tab. 5-4:	Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den	

	Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. ....	64
Tab. 5-5:	Redox-Parameter von Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz. ....	65
Tab. 5-6	Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten im Mittelland der Schweiz. ....	66
Tab. 5-7:	Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland der Schweiz. ....	67
Tab. 5-8:	Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. ....	68
Tab. 5-9:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz. ....	69
Tab. 5-10:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten im Mittelland der Schweiz. ....	70
Tab. 5-11:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland in der Schweiz. ....	71
Tab. 5-12:	Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. ....	72
Tab. 6-1:	Bekannte Lokalitäten von Tiefengrundwässern in der Schweiz, welche als Mineral- und Heilwässer genutzt werden/wurden. ....	78
Tab. 6-2:	Bekannte Lokalitäten von Thermalwässern in der Schweiz. ....	79

## Figurenverzeichnis

Fig. 3-1:	Geotektonische Grossräume, welche für die geographisch-geologische Einteilung der Grundwasserdaten verwendet werden und das geologische Profil entlang der Line A–B zur Veranschaulichung der Tiefenverteilung der einzelnen Einheiten. ....	6
Fig. 3-2:	Beispiele von geologischen Profilen durch den Tafeljura bei Eglisau (links) und den Faltenjura zwischen Aarau und Brugg (rechts). ....	8
Fig. 3-3:	Schematische Verbreitung der vier Molasse-Einheiten OSM, OMM, USM und UMM an der Oberfläche im schweizerischen Molassebecken. ....	10
Fig. 3-4:	Geologisches Profil durch das Helvetikum der Westschweiz. ....	12
Fig. 3-5:	Geologisches Profil durch das Helvetikum am Wellenberg, Kt. Nidwalden. ....	13
Fig. 3-6:	Geologisches Profil durch penninischen Decken im Norden des Helvetikums. ....	14
Fig. 3-7:	Vereinfachtes Schema der Abfolge der Sedimentschichten in den drei Ablagerungsräumen des Penninikums. ....	16

Fig. 3-8:	Vereinfachtes Schema der Abfolge der Sedimentschichten im Ostalpin und Südalpin. ....	18
Fig. 3-9:	Vereinfachter Profilschnitt Preda – Albula zur Illustration der tiefen Ausdehnung von potentiell wasserführenden, mesozoischen Sedimentabfolgen im Ostalpin. ....	19
Fig. 3-10:	Vereinfachter Profilschnitt der europäisch – adriatischen Kontaktzone von Valle d'Ossola über Lago Maggiore nach Italien.....	20
Fig. 4-1:	Vereinfachte geo-tektonische Grossräume, welche für die geographisch-geologische Einteilung der oberflächennahen Grundwasserdaten verwendet werden und die Messstellen der NAQUA-Module TREND und SPEZ. ....	22
Fig. 5-1:	Vorkommen von Tiefengrundwasser mit chemischer Charakterisierung in den geo-tektonischen Grossräumen der Schweiz. ....	48
Fig. 5-2:	Vereinfachter vertikaler hydrogeologischer Aufbau (hydrogeologische Einheiten) der Festgesteine der Nordschweiz.....	52
Fig. 5-3:	Geologische Profile und Tiefenverteilung der Aquifere in den Tiefbohrungen der Nagra in der Nordschweiz von 2019 –2022. ....	53
Fig. 6-1:	Vorkommen von bekannten Mineralwässern und balneologisch genutzten Thermalwässern mit chemischer Charakterisierung in den geo-tektonischen Grossräumen der Schweiz. ....	77

# 1 Einleitung

In der Schweiz ist Grundwasser die wichtigste Ressource für Trinkwasser und trägt rund 80% zur öffentlichen Trinkwasserversorgung bei (Sinreich et al. 2012, BAFU 2019). Vom genutzten Grundwasser kann bis heute die Hälfte ohne weitere Aufbereitung direkt als Trinkwasser verwendet werden. Grundwasser für die Trinkwasserversorgung wird hauptsächlich oberflächennah aus Lockergestein-, Karst- und Kluft-Grundwasserleitern gewonnen. Über die ganze Schweiz wird das nutzbare Grundwasserdargebot dabei für die Lockergestein-Grundwasserleiter ausserhalb von Talsohlen und den Karst- und Kluft-Grundwasserleitern etwa gleich gross geschätzt, während dasjenige in Lockergestein-Grundwasserleitern innerhalb von Talsohlen rund doppelt so hoch sein dürfte (Sinreich et al. 2012).

Grundwasser tritt in der Schweiz in unterschiedlichen Lithologien auf, welche sich meist über geologische Zeiträume als Grundwasserleiter bzw. als Aquifer<sup>1</sup> etabliert haben. Je nach tektonischer Situation befinden sich diese spezifischen Lithologien unterhalb einer möglichen Bodenbedeckung nahe der Oberfläche oder in mehreren hundert bis weit über tausend Meter Tiefe. Grundwasservorkommen erstrecken sich demzufolge im geologischen Untergrund über einen grossen Tiefenbereich. Weder von der wissenschaftlichen noch von der gesetzlichen Seite her beinhaltet der Begriff "*Grundwasser*" eine Information bezüglich der Tiefe des Auftretens von Wasser. Auf der gesetzlichen Ebene wird unter dem Begriff "*Unterirdische Gewässer*" sowohl Grundwasser (einschliesslich Quellwasser), Grundwasserleiter, Grundwasserstauer und Deckschicht zusammengefasst und Schutz und Nutzung geregelt (vgl. Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer, GSchG 1991, SR 814.20). Der Begriff "*Grundwasser*" beinhaltet also sowohl oberflächennahe als auch tiefe Grundwasservorkommen und es existiert in der Schweiz derzeit keine rechtliche Abgrenzung zwischen oberflächennahen und tiefen Grundwasservorkommen. In der Öffentlichkeit wird demgegenüber der Begriff "*Grundwasser*" aber gemeinhin mit nutzbaren, oberflächennahen Grundwasservorkommen in Verbindung gebracht.

In Bezug auf die thermische Nutzung des Untergrunds stellen sich Fragen bezüglich der Auswirkungen von solchen Nutzungen auf das Grundwasser in den unterschiedlichen Tiefenbereichen. Das betrifft einerseits Veränderungen der Mineralisation des Grundwassers (und damit der natürlichen Hintergrundwerte im Grundwasser) und andererseits Veränderungen der Fauna und Mikrofauna in den Grundwasserleitern. Beides kann Auswirkungen auf die Grundwasserqualität und damit die Nutzbarkeit als Trinkwasser haben. Auch mögliche induzierte Wegsamkeiten von der Oberfläche in den Untergrund und Verbindungen zwischen Grundwasserstockwerken führen zu einer Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Grundwasser und dessen Qualität.

Derzeit ist die thermische Nutzung im Grundwasserbereich in der Gewässerschutzverordnung geregelt (GSchV, Anhang 2, Abschnitt 21, Stand 1. Feb., 2023). Darin ist festgehalten: "*Die Temperatur des Grundwassers darf durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3 °C verändert werden; vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Temperaturveränderungen.*" In der Wegleitung zum Grundwasserschutz von 2004 wurde diese Verordnung mit dem Zusatz "*In der unmittelbaren Nachbarschaft des Versickerungsbauwerkes, d.h. in einem Umkreis von max. 100 m darf die Veränderung mehr als 3 °C betragen*" ergänzt.

Im Zusammenhang mit der thermischen Nutzung des Untergrunds (Wärme oder Kälte) stellt sich die Frage, ob diese 3°C-Vorgabe erweitert werden kann, ohne dass dabei irreversible Veränderungen im Grundwasser und Grundwasserleiter und damit der Grundwasserqualität verursacht werden. Zudem erscheint eine weitere Spezifizierung des Begriffs "*Unterirdische Gewässer*"

---

<sup>1</sup> Grundwasserleiter bezeichnet einen Gesteinskörper, welcher Grundwasser leiten kann unabhängig davon ob dieser wassergesättigt ist oder nicht. Grundwasserleiter wird hier für oberflächennahes Grundwasser verwendet. Aquifer bezeichnet einen Gesteinskörper, welcher wassergesättigt ist und wird hier für Tiefengrundwasser verwendet.

(bzw. "Grundwasser" im öffentlich-allgemeinen Verständnis) in oberflächennahe und tiefe Grundwasservorkommen angebracht, da eine solche Nutzung auf die beiden Gruppen von Grundwässern unterschiedliche Auswirkungen haben kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Grundwasserleiter gestaltet sich eine solch verallgemeinerte Unterteilung nicht einfach. So wird Grundwasser in Karst- und Kluft-Aquiferen auch nicht-oberflächennah, aus Tiefen von mehreren 100 m zur Trinkwasserversorgung genutzt (z.B. Muralt 1999). Zudem kann Grundwasser auch in Tiefen von mehr als 1000 m durchaus die Qualität von Trinkwasser und/oder Mineralwasser aufweisen. Die Nutzbarkeit von solchem tiefgelegenen Grundwasser hängt dann von der Ergiebigkeit und Erneuerung eines solchen Grundwasservorkommens ab. Ebenfalls kann Grundwasser, welches Temperatur und Mineralisation in grosser Tiefe aufgenommen hat, an der Oberfläche oder in oberflächennahe Grundwasserleiter austreten und dort genutzt werden (z.B. Thermalwasser).

Ein erster Vorschlag für eine Definition des Begriffs "*Tiefengrundwasser*" wurde von einer Arbeitsgruppe der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie (SGH) gemacht (vgl. Waber et al. 2015). Diese Definition beruht auf vier Kriterien, wobei drei davon erfüllt sein müssen. Die Kriterien sind (1) Mineralisation in tiefliegenden Lithologien, (2) erhöhte Temperatur ( $\Delta T > 5^\circ\text{C}$ ) gegenüber dem benachbarten oberflächennahen Grundwasser, (3) Verweilzeit von minimal mehreren Jahrzehnten und (4) lange Fliesswege im Untergrund (vgl. Waber et al. 2015). In dieser Definition ist die Nutzbarkeit nicht berücksichtigt und die Erarbeitung der vier Kriterien gestaltet sich teilweise schwierig bzw. ist nicht immer praktikabel. Die Definition der SGH wurde später von Burger (2016) aus der Perspektive der Nutzbarkeit ergänzt. Eine Zusammenführung dieser beiden Ansätze ist in Epting et al. (2024) gegeben.

Im Zusammenhang mit einer thermischen Nutzung des Untergrunds und damit der Veränderung des natürlichen Temperaturregimes ist zu beachten, dass Grundwasser seine geogene (d.h. natürliche) Mineralisation durch Reaktionen mit Mineralen und organischen Stoffen im Boden und in den durchflossenen Lithologien erhält. Diese Reaktionen hängen u.a. von der Temperatur ab. Dabei nehmen die Reaktionsraten bei einer Erwärmung des Grundwassers von 0–25°C um rund einen Faktor 10 zu und zwischen 25–55 °C um einen weiteren Faktor 10 (z.B. Stumm & Morgan 1996). Die Lösung von Mineralen durch Grundwasser (wie auch deren Bildung) geht aber nicht unendlich weiter, da Grundwasser mit dem umgebenden Gestein ein thermodynamisches Gleichgewicht anstrebt. Ist dieses Gleichgewicht mit einem bestimmten Mineral oder dem gesamten Mineralbestand einmal erreicht, versiegen weitere Reaktionen, sofern die Bedingungen von Temperatur, Druck und Ionenstärke (Mineralisation) konstant bleiben.

Im vorliegenden Bericht werden aufgrund bestehender Daten einerseits die lateralen und vertikalen Ausdehnungen von Grundwasserleitern kurz zusammengefasst. Andererseits sind für die Grundwässer aus den unterschiedlichen oberflächennahen Grundwasserleitern und den tiefen Aquiferen die bezüglich Temperaturveränderungen wichtigsten chemisch-physikalischen Parameter beschrieben und tabelliert. Die Grundwässer sind dazu in oberflächennahe Grundwässer und Tiefengrundwässer eingeteilt, ohne dass die oben aufgeführten Kriterien für jedes einzelne Vorkommen vollständig geklärt wären. Vielmehr beruht die hier aus praktischen Gründen angewandte Einteilung auch auf der Kenntnis der heutigen Nutzung, der Art der Beprobung (z.B. Quellen, seichte Brunnen und Piezometerbohrungen vs. Tiefbohrungen) und – vor allem für die Tiefengrundwässer – dem Auftreten in bestimmten geologischen Einheiten, der Mineralisation und der Isotopenzusammensetzung.

Die hier tabellierten Daten können zumindest teilweise als Referenzwerte für durch thermische Nutzung des Untergrunds noch unbeeinflusste Grundwässer verwendet werden. Aus diesem Grund sind die Tabellen gleich verfasst, damit bestehende Datenlücken leicht ersichtlich werden.

## 2 Datengrundlage & Nomenklatur

Daten über die chemische Zusammensetzung von oberflächennahem Grundwasser in der Schweiz stammen aus zwei unterschiedlichen Zeitperioden und sind einerseits wegen der besonders für Spurenelemente verbesserten Analytik und andererseits wegen der in den letzten Jahrzehnten zunehmenden durchschnittlichen Jahrestemperatur getrennt behandelt. Die Erhebung der chemischen Daten in mehreren Labors und über eine grosse Zeitspanne hat auch zur Folge, dass die Bestimmungsgrenzen für einzelne Parameter stark variieren (Faktor 2–100). Für die Angabe der Bestimmungsgrenze für einen bestimmten Datensatz wurde deshalb die am häufigsten rapportierte Bestimmungsgrenze verwendet. Aus diesem Grund kann es vorkommen, dass der in den Tabellen angegebene Minimalwert niedriger ist, als die angegebene Bestimmungsgrenze.

Auf Landesebene erfassen die beiden Module TREND und SPEZ der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA den Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Qualität von oberflächennahen Grundwässern. Für die vorliegende Arbeit wurde derselbe NAQUA-Datensatz (Module TREND und SPEZ) wie für die Bestimmung von Hintergrundwerten in oberflächennahen Grundwasservorkommen verwendet (Hauptinhaltsstoffen und Spurenelemente von 2018/2019, Wanner et al. 2023). Diese Datensammlung beinhaltet über 800 Analysen an 327 NAQUA-Messstellen aus Lockergestein-Grundwasserleitern und über 300 Analysen an 188 NAQUA-Messstellen aus Festgestein-Grundwasserleitern.

Daten von oberflächennahen Grundwässern, welche innerhalb anderer Untersuchungsprogrammen meist vor 2000 generiert wurden, beinhalten keine Unterscheidung zwischen Lockergestein- und Festgestein-Grundwasserleitern. Die Mehrheit der Daten ist aber entsprechend den Beschreibungen den Festgestein-Grundwasserleitern zuzuordnen. Zudem sind diese auf den Jura, das Mittelland und die Voralpen fokussiert. Die Regionen Tessin, Graubünden und z.T. Wallis sind unter- oder gar nicht vertreten. Diese Daten stammen vorwiegend aus der Datenbank des AQUITYP-Projekts (Parriaux et al. 1990), bzw. den diesem Projekt zugrunde liegenden Arbeiten (Dubois 1991, Mandia 1991, Basabe-Rodriguez 1992, Dematteis 1995, Hesske 1995, Kilchmann 2001), der Hydrochemischen Datenbank der Nagra (Waber & Traber 2022) und diversen Projekten am Institut für Geologie, Uni Bern. Sie beinhalten 381 Lokalitäten mit der gleichen Anzahl berücksichtigter und qualitätsgeprüfter Analysen.

Chemische Daten von Tiefgrundwässern stammen zum grössten Teil aus der Hydrochemischen Datenbank der Nagra (Waber & Traber 2022) und der BDF-Geotherm Datenbank von Sonney & Vuataz (2008), wobei von Letzterer die Duplikate aus der Hydrochemischen Datenbank der Nagra entfernt wurden. Bei beiden Datensätzen handelt es sich vornehmlich um Grundwasser, welches aus Tiefbohrungen beprobt wurde und an die Oberfläche aufstossende Thermal- und Mineralwässer. Ergänzt wurden diese Daten durch Tiefgrundwässer, welche in Tunneln in den Kristallinmassiven Aiguilles-Rouges, Mont-Blanc, Aar und Gotthard beprobt wurden (Dubois 1991, Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Waber et al. 2017, Stober et al. 2022) und weiteren Daten aus der Westschweiz (Muralt 1999, Pearson et al. 2003, Sonney & Vuataz 2009, Waber & Rufer 2018, Guglielmetti et al. 2022). Der so zusammengestellte Datensatz von Tiefgrundwässern in der Schweiz umfasst 187 Lokalitäten mit 303 berücksichtigten und aus Tiefbohrungen und Thermalquellen und 386 Lokalitäten (Ausflüsse oder Bohrungen) mit 466 berücksichtigten Analysen aus Tunneln und Stollen. Ähnlich wie bei den Daten von oberflächennahen Grundwässern besteht eine starke geographische Gewichtung auf den Tafeljura, den Faltenjura, das Mittelland und hier auch die Kristallinmassive. Die Regionen Voralpen, Tessin und Graubünden sind demgegenüber untervertreten.

Für die folgenden Tabellen wurden nur Daten von chemischen Analysen verwendet, welche bezüglich der Hauptelemente einen vollständigen und qualitätsgeprüften Datensatz haben. Die chemisch-physikalischen Daten von Grundwasser sind dann entsprechend den vereinfachten geo-

tektonischen Regionen in der Schweiz und – wo möglich – entsprechend der Lithostratigraphie unterteilt. Die dazu angewandten geo-tektonischen Grossräume / Kriterien sind in Kapitel 3 aus hydrogeologischer Sichtweise kurz beschrieben. Für die oberflächennahen und für die Trinkwasserversorgung genutzten Grundwasserleiter (Kap. 4) sind diese nochmals vereinfacht.

Die Einteilung der Grundwässer in chemische Typen erfolgte in einem ersten Schritt nach den Kriterien von Jäckli (1970). Diese originale Bezeichnung des chemischen Typs eines Grundwassers führt in vielen Fällen zu langen, unübersichtlichen Termen, welche nur schwer lesbar sind. Zur besseren Übersicht sind deshalb die verschiedenen Untertypen der Originaltypisierung von Jäckli (1970) in Gruppen von "generellen chemischen Typen" zusammengefasst. Dabei werden nur Kationen und Anionen in den Typ aufgenommen, deren Häufigkeit in der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers 30 meq-%<sup>2</sup> überschreitet.

### Mineralisation

Die Mineralisation eines Grundwassers kann als das Total aller gelösten Stoffe in mg/L (*total dissolved solids*, TDS; z.T. auch als "totale Mineralisation" bezeichnet), als Salinität in ‰ oder – weniger häufig – als Chlorinität in ‰ angegeben werden. All diese Begriffe werden auch zur Klassifikation von Grundwasser in Süsswasser, Salzwasser etc. verwendet, wobei es keine global gültige Einteilung gibt und die Begriffe in den verschiedenen Sprachräumen unterschiedlich verwendet werden. Im vorliegenden Bericht wird die in Waber & Traber (2022) angewandte Klassifikation von Grundwasser nach den im Wasser gelösten Stoffen verwendet (Tab. 2-1). Diese Klassifikation ist allein auf die Mineralisation (TDS) abgestützt und enthält keine genetischen oder anderen Implikationen.

Tab. 2-1: Klassifikation von Grundwasser aufgrund der Mineralisation.

TDS ('total dissolved solids') = total gelöste Stoffe; Einheit in Masse pro Masse Wasser wegen der mit zunehmender Mineralisation zunehmenden Abweichung der Wasserdichte von 1.

Mineralisation TDS [g/L bzw. g/kg <sub>H2O</sub> ] <sup>3</sup>	Deutsche Bezeichnung	Englische Bezeichnung
< 1	Süsswasser	Fresh water
1 – 3	Schwach mineralisiertes Wasser	Weakly mineralised water
3 – 10	Stark mineralisiertes Wasser	Highly mineralised water
10 – 35	Salines Wasser	Saline water
35 – 100	Hoch-salines Wasser	Highly saline water
> 100	Sole	Brine

<sup>2</sup> meq-%: Angabe der Konzentration in Prozent milli-Equivalenten, wobei die Konzentration gelöster Stoffe in meq die Konzentration in mg multipliziert mit der Ladung und dividiert durch das Atom- bzw. Molekulargewicht ist.

<sup>3</sup> Für die Betrachtung von Massentransfers zwischen Gestein und Grundwasser (z.B. Menge eines gelösten Minerals) wird die Konzentration pro kg reinem Wasser (g/kg<sub>H2O</sub>) benötigt. Laboranalysen werden meist als Konzentration pro Liter Grundwasser rapportiert. Diese Konzentrationsangabe ist unabhängig von der Dichte (g/cm<sup>3</sup>) des Grundwassers. Bis zu einer Mineralisation von 5 g/L ist die Dichte des Grundwassers nahe bei 1 g/cm<sup>3</sup> und mg/L entspricht innerhalb des analytischen Fehlers auf einer Konzentrationsbestimmung der Einheit mg/kg<sub>H2O</sub>. Bei höheren Mineralisationen ist die Dichte des Grundwassers > 1 g/cm<sup>3</sup> und der Unterschied liegt ausserhalb des analytischen Fehlers auf einer Konzentrationsbestimmung und muss berücksichtigt werden.

### 3 Hydrogeologischer Hintergrund

Die Mineralisation von Grundwasser wird durch Mineralreaktionen im Boden und in den Gesteinen bestimmt, welche das Grundwasser von seiner Infiltration bis zur Exfiltration durchfließt. Demgegenüber reflektiert die heutige Verbreitung der Gesteine mit ihrer mineralogischen Vielfalt eine lang andauernde Entwicklung, welche seit Beginn des Mesozoikums vor ca. 250 Mio Jahren durch das Auseinanderdriften von Kontinentalplatten und der Kollision des Europäischen mit dem Adriatischen Kontinent und der damit verbundenen Bildung der Alpen geprägt ist.

Aufgrund der komplexen geo-tektonischen Entwicklung und aus hydrogeologischer Sicht erscheint es deshalb angebracht, die Vorkommen und Entwicklung von Grundwasser nach geographisch-geologischen Kriterien einzuteilen. Die geologischen Kriterien richten sich dabei nach den geo-tektonischen Grossräumen der Schweiz. Diese (vereinfachten) Grossräume sind das alpine Vorland mit Tafeljura und Faltenjura (bzw. Juragebirge), das Mittelland (Molassebecken) und die Alpen (Fig. 3-1). Der Tafeljura, Faltenjura und das Mittelland sind durch die mächtigen mesozoischen und känozoischen Sedimentablagerungen dominiert, welche auf dem kristallinen Grundgebirge und lokal auf paläozoischen Ablagerungen (Permokarbon) aufliegen. Die Alpen lassen sich aufgrund der paläogeographischen Herkunft der dort vorhandenen mesozoischen Sedimente in drei Grosseinheiten einteilen (z.B. Pfiffner 2014): Helvetikum, Penninikum und Ost- und Südalpin.

Aus hydrogeologischer und hydrochemischer Sicht ist es sinnvoll, für die Tiefengrundwässer den Alpenraum aufgrund der unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung weiter in Sedimentgesteine (die Sedimentdecken) und Kristallingesteine (paläozoische Massive und z.T. ältere Gneise) zu unterteilen. So werden hier unter dem Begriff '*Alpennordrand*' die Grundwässer in den Sedimentdecken des Helvetikums und in den nach Norden abgescherten Sedimentdecken des Penninikums (inkl. Préalpes) zusammengefasst. Unter dem Begriff '*Alpenraum*' werden von Norden nach Süden die Kristallin-Massive des Helvetikums, das Penninikum, das Ostalpin und das Südalpin zusammengefasst. Für die Tiefengrundwässer werden die Kristallin-Massive des Helvetikums (Mont-Blanc, Aiguilles-Rouges, Aar- und Gotthard-Massive und ihre Sedimenthüllen) weiter in '*westliche Kristallin-Massive*' bzw. '*zentrale Kristallin-Massive*' unterteilt. Für das Penninikum, das Ostalpin und das Südalpin sind die Tiefengrundwässer jeweils soweit möglich zwischen ihren Vorkommen in Sediment- und Kristallingesteinen unterschieden (vgl. Fig. 3-1).

Für die oberflächennahen Grundwässer aus Lockergesteinen und Festgestein ist entsprechend Wanner et al. 2023 die Vereinfachung in geo-tektonische Grossräume leicht unterschiedlich, indem dort aufgrund der beschränkten Daten sämtliche Grundwässer südlich des Helvetikums unter dem allgemeinen Begriff '*Kristallin*' zusammengefasst wurden (vgl. Fig. 4-1).

Für die Vorkommen und Verbreitung von Tiefengrundwasser ist der geologisch-tektonische Bau der Schweiz von bestimmender Bedeutung. Deshalb ist die geologisch-tektonischen Entwicklung der für die Grundwasserverbreitung und -entwicklung relevanten geotektonischen Grossräume folgend kurz zusammengefasst. Diese Zusammenfassung beruht v.a. auf den detaillierten Ausführungen von Pfiffner 2014 und 2019.

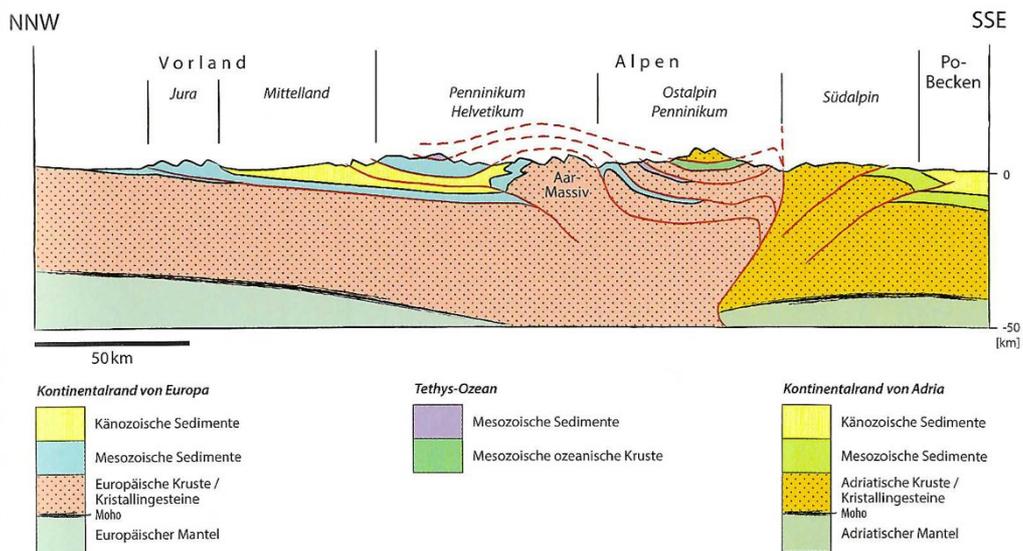
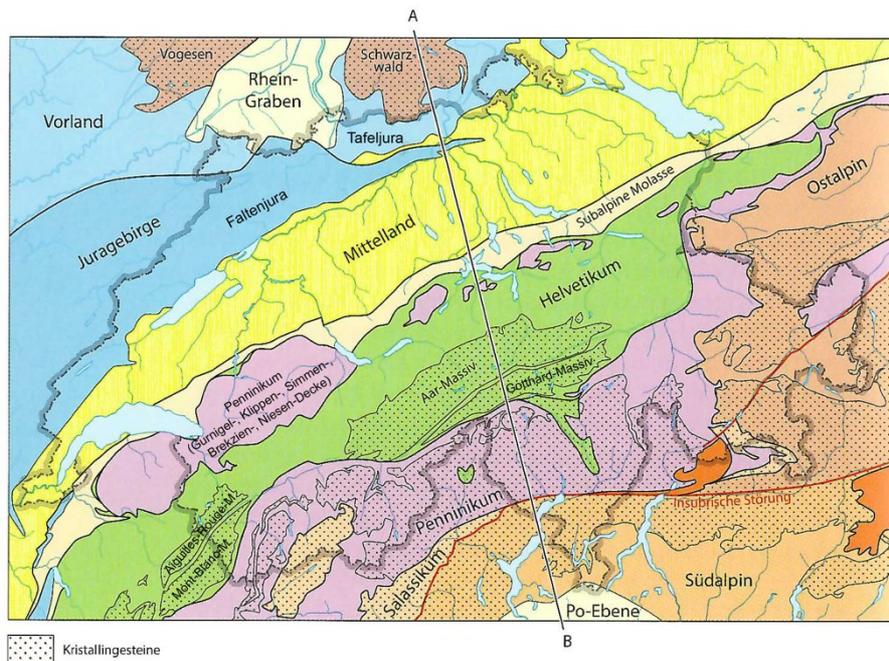


Fig. 3-1: Geotektonische Grossräume, welche für die geographisch-geologische Einteilung der Grundwasserdaten verwendet werden und das geologische Profil entlang der Line A–B zur Veranschaulichung der Tiefenverteilung der einzelnen Einheiten.

Aus Pfiffner 2019, Karte leicht modifiziert.

### 3.1 Tafeljura (Ausseralpine Plattform, Vorland)

Angrenzend an das Kristallin des Schwarzwald-Massivs sind im Tafeljura von Norden gegen Süden alle hydrogeologischen Einheiten vom Permokarbon bis zum Malm-Aquifer in ungestörter Reihenfolge vorhanden, bevor sie im Süden unter die tertiären Molasseablagerungen des Mittellands abtauchen (Fig. 3-2). Der gesamte Sedimentstapel liegt auf dem gegen Süden abtauchenden Kristallin mit seinen Grundwässern. Für die Grundwasserführung von Bedeutung sind besonders die nördlich des Rheins weiträumigen Aufschlüsse der Lithologien von Muschelkalk, Keuper und Malm, welche eine Direktinfiltration in diese Aquifer-Systeme erlauben. Die Freilegung dieser Lithologien steht im Zusammenhang mit der im frühen Tertiär einsetzenden Dehnungstektonik und der damit verbundenen Absenkung des Rheingrabens und mit der im mittleren Tertiär stattfindenden Aufdomung des Vogesen- und des Schwarzwald-Massivs. Entlang der Südabdachung des Schwarzwald-Massivs und den erodierten Grabenschultern des Rheingrabens im Westen sind entlang der Wutach und des Rheins bis in den Raum nördlich von Basel die Sedimente des Muschelkalks und Keupers (untergeordnet auch Buntsandstein) aufgeschlossen. Gegen Süden anschliessend treten vom Raum Schaffhausen westwärts bis an die Aare die Ablagerungen des Doggers und die hier auch verkarsteten Malm-Kalke auf, welche im Raum Basel von den tertiären Sedimenten des Rheingrabens überdeckt sind.

Die relativ flache Lage der Sedimente südlich des Rheins verhinderte eine tiefgreifende Erosion während des Tertiärs (und eventuell schon der Kreidezeit). Zusammen mit der faziellen Ausbildung limitierte das die Ausbildung von tiefem Paläokarst in den Malm-Kalken, wie es z.B. aus dem Süddeutschen Molassebecken bekannt ist. Erst während dem Pleistozän mit seinen wiederkehrenden Eisbedeckungen (Preusser et al. 2011, Schlüchter et al. 2021) und insbesondere der Umlenkung des Alpenrheins in den Hochrhein und der Bildung des Entwässerungs-Systems der Wutach im späten Pleistozän (vgl. Waber & Traber 2022 und dortige Referenzen) wurde durch Erosion die Infiltration in die mesozoischen Aquifere intensiviert, was zu einer stärkeren Verkarstung führte.

Tiefengrundwässer im Tafeljura sind aus den Aquiferen von Malm, Keuper, Muschelkalk, Buntsandstein und Kristallin bekannt (Fig. 3-2 links). Besonders im Malm-Aquifer hängt die Wasserführung stark mit dem süddeutschen Raum zusammen (vgl. Interreg IIIA 2008). Ähnliches dürfte auch für die anderen Aquifere gelten (vgl. Waber & Traber 2022).

### 3.2 Faltenjura (Juragebirge)

Auf dem vorwiegend aus Gneisen und Graniten bestehenden kristallinen Grundgebirge wurde im Vorland der Alpen der gesamte mesozoische Sedimentstapel zwischen ca. 20–5 Mio Jahren durch die Kollision des Europäischen mit dem Adriatischen Kontinent horizontal zusammengedrückt. Als Abscherhorizont dienten die fliessfähigen Evaporite des Mittleren Muschelkalks und es kam zu einer ausgeprägten Faltenbildung, gefolgt von mehrfachen Überschiebungen. Verfaltung und Aufwölbung sind im Faltenjura von der Region der Lägern bis in den Raum Genf stärker ausgeprägt als in der sich zwischen Tafeljura im Norden und Faltenjura im Süden etwa von Eglisau bis Frick erstreckenden sogenannten Vorfaltenzone. (Fig. 3-2). Die dabei geformten Antiklinalen (Bergketten) und Synklinalen (Täler), welche die heutige Topographie bestimmen, sind im Faltenjura dementsprechend höher bzw. tiefer. Die schon während der Faltenbildung stattfindende Erosion führte zur Abtragung des Dachs der Antiklinalen, wobei sich die erosionsresistenteren Kalke zu Schichtkämmen entwickelten und die weicheren Mergel- und Tonabfolgen zurückwärteten und parallel zu den Synklinaltälern weitere Täler bildeten.

Heute finden sich an der Oberfläche der Bergketten die Kalkabfolgen des Malms und weniger häufig des Doggers. Im Faltenjura finden sich von Nordosten nach Südwesten bis in die Region Balsthal – Laufen an der Oberfläche auch noch Sedimente des Muschelkalks und Lias (Fig. 3-2).

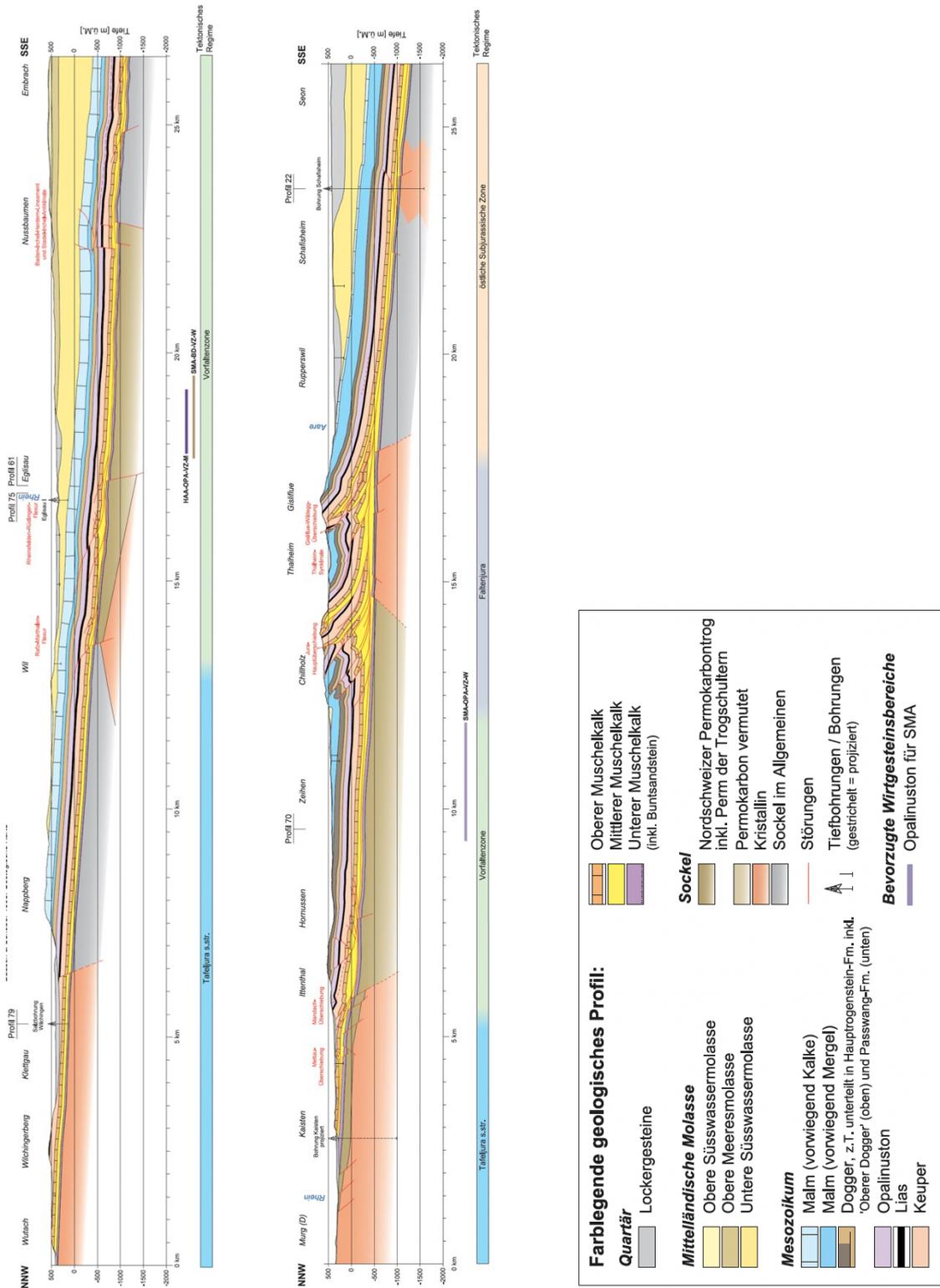


Fig. 3-2: Beispiele von geologischen Profilen durch den Tafeljura bei Eglisau (links) und den Faltenjura zwischen Aarau und Brugg (rechts).

Aus Nagra 2008.

Südwestlich von ungefähr Biel finden sich auf den Höhen neben den Kalkabfolgen des Malms vermehrt auch solche aus der Kreidezeit. Während der Faltung und Aufschiebung wurden diese starren Kalkeinheiten spröde deformiert und es formierten sich Kluftnetzwerke. Die einhergehende Erosion ermöglichte die direkte Infiltration von Oberflächenwasser entlang dieser Kluftnetzwerke, was zu einer ausgeprägten Verkarstung der Kalkabfolgen des Malms, der Kreide und des Haupttrogensteins und im Faltenjura auch der karbonatischen Abfolgen des Muschelkalks führte. Aufgrund der Topographie und der in den Synklinalen tiefen Lage dieser karbonatischen Gesteine aus Kreide, Malm und Muschelkalk (und lokal auch Dogger (Haupttrogenstein) und Lias) infiltriert Grundwasser entlang von Karst- und Kluftstrukturen rasch und mit geringer Mineralisation bis in grosse Tiefen von mehreren 100 m (z.B. Delsberger Becken, Muralt 1999).

Die während des Känozoikums vorherrschenden Festlandphasen führten nur lokal und innerhalb der Täler zu Ablagerungen. Im Südosten des Jura gebirges sind die Ablagerungen von Sandsteinen und Mergeln eines Ausläufers des Molassebeckens, während gegen Westen Nagelfluh-Ablagerungen mit ausschliesslich kalkigen Komponenten aus den umliegenden Bergketten auftreten. Den beiden Ablagerungstypen gemeinsam ist eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit.

Für die Grundwasserführung ein weiterer wichtiger Punkt ist die lückenlose Fortsetzung des gesamten Mesozoischen Sedimentstapels in den Untergrund des Molassebeckens im Mittelland (Fig. 3-2). Eine Folge davon ist, dass in den Jura höhen infiltriertes Grundwasser im Mittelland natürlich oder künstlich exfiltriert (z.B. Mineral- und Thermalquellen Yverdon-les-Bains, Muralt 1999). Andererseits existieren auch Meinungen, dass Thermalwässer im Muschelkalk des Faltenjuras aus den sehr tiefliegenden Karbonatabfolgen des Muschelkalks im Molassebecken stammen könnten (z.B. Biehler et al. 1993). Sicher ist, dass die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten und vor allem die grossen Aquifere zwischen dem Jura gebirge und dem Molassebecken entweder direkt oder entlang tektonischer Störungen hydraulisch mehr oder weniger gut verbunden sind (z.B. Schmassmann 1990, Biehler et al. 1993, Muralt 1999, Waber & Traber 2022).

### 3.3 Mittelland: Molassebecken und subalpine Molasse

Die Absenkung des Europäischen unter den Adriatischen Kontinent führte zur Ausbildung einer grossräumigen Beckenstruktur – dem Molassebecken – im Vorland der werdenden Alpen. Im Molassebecken findet sich der gesamte mesozoische Sedimentstapel von der Trias bis zum Malm im Osten und bis zur Kreide im Westen. Dieser Stapel liegt entweder direkt auf dem kristallinen Grundgebirge oder auf sehr unterschiedlich mächtigen paläozoischen Sedimentablagerungen des Perms und Karbons (Permokarbon-Tröge). Tendenziell nehmen dabei die Mächtigkeiten des Malm- und Muschelkalk-Aquifers von Nordosten gegen Südwesten zu, während die Mächtigkeit des Bundsandstein-Aquifers weniger variiert. Generell nimmt auch die Tiefenlage der Aquifere in Richtung Voralpen und auch von Nordost nach Südwest zu.

Überlagert wird der mesozoische Sedimentstapel von den tertiären Ablagerungen der vier Molasse-Einheiten. Die Molasse-Einheiten widerspiegeln eine zwischen ca. 35–5 Mio Jahre vor heute erfolgte komplexe Abfolge von marinen, marin-brackischen und kontinentalen Süsswasser-Verhältnissen. Paläogeographische Verteilungskarten mit Angaben über Sedimentationsmilieu sowie geologische und hydrologische Verhältnisse finden sich z.B. in Kuhlemann & Kempf 2002, Kälin & Kempf 2009 und Garefalakis & Schlunegger 2019.

Die Untere Meeresmolasse (UMM, Oberes Eozän – Oberes Oligozän) wurde nach einer langen Phase von kontinental-tropischer Verwitterung, welche zur teilweisen Verkarstung der Malm- bzw. wo vorhanden der Kreidekalke führte, auf die im frühen Tertiär (Eozän) abgelagerten Bohnerztone (Siderolithikum) abgelagert. Die UMM ist heute nur noch kleinräumig in der Westschweiz und in der Subalpinen Molasse erhalten (Fig. 3-3) und besteht aus einer Wechsellage von Sandsteinen und Tonmergel mit eingeschalteten Turbiditen (SchlammLawinen). Aufgrund ihres

beschränkten und in der Subalpinen Molasse tiefen Vorkommens, ist über die Wasserführung der UMM wenig bekannt.

Die Untere Süsswassermolasse (USM, Oberes Oligozän – Unteres Miozän) besteht aus dem Abtragungsschutt der sich bildenden Alpen. Sie besteht aus einer Wechsellagerung von Konglomeraten ('Nagelfluh'), Sandsteinen und Tonmergeln und ist sowohl lateral als auch vertikal sehr heterogen aufgebaut. Die intensive Verwitterung führte zu grossen und kleineren, gegen das Zentrum des Beckens gerichteten, konglomeratischen Schuttfächern (z.B. Fribourg-, Napf-, Hörnli-Schuttfächer). Zwischen diesen Fächern und nördlich davon lagerten sich die feinkörnigeren Sedimente ab. Heute ist die USM entlang des Jura gebirges westlich von der Region Wohlen bis nach Genf und in der Subalpinen Molasse entlang der Voralpen an der Oberfläche aufgeschlossen (Fig. 3-3). Die Mächtigkeit der USM variiert von um die 100 m im distalen Molassebecken in der Nordostschweiz (z.B. Bohrungen Benken, Weiach), zu > 1000 m im zentralen Molassebecken

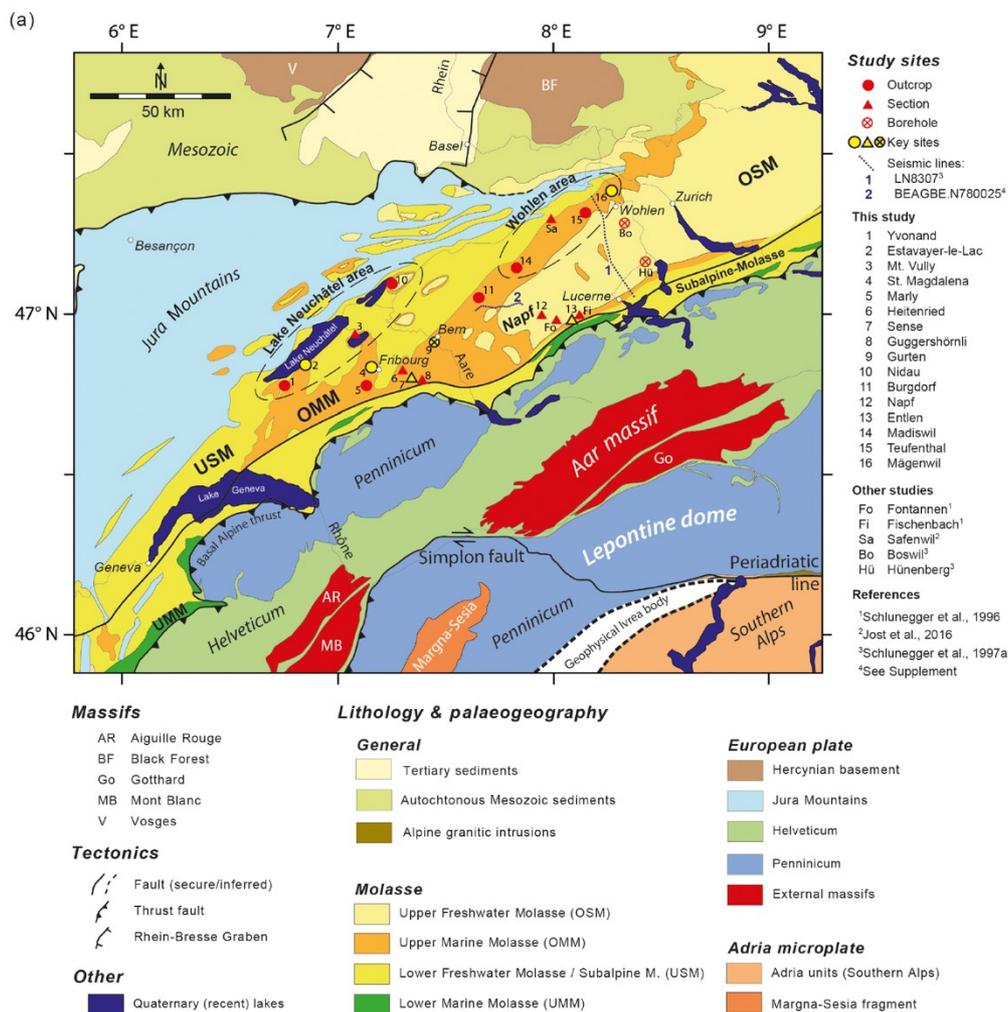


Fig. 3-3: Schematische Verbreitung der vier Molasse-Einheiten OSM, OMM, USM und UMM an der Oberfläche im schweizerischen Molassebecken.

Aus Garefalakis & Schlunegger 2019.

Nach neusten Erkenntnissen aus dem Nagra-Tiefbohrungsprogramm 2019-2022 erstreckt sich die USM nördlich der OMM vom Raum Wohlen weiter gegen Nordosten über die Region nördlich Lägern ins Zürcher Weinland (vgl. Mazurek et al. 2023).

(z.B. Bohrungen Lindau, Kreuzlingen) und > 4000 m am Südrand des Beckens (z.B. Bohrungen Entlebuch, Thun). In der Westschweiz scheint die USM etwas weniger mächtig vorhanden zu sein. Entsprechend der auf kurze Distanz wechselnden Lithologien und deren unterschiedlichem Zementierungsgrad ist die Wasserführung in der USM heterogen, aber weitverbreitet.

Die Obere Meeresmolasse (OMM, Unteres Miozän) besteht mehrheitlich aus recht homogenen Sandsteinen. Gegen Ende der OMM veränderte sich die Salinität des Meerwassers von marin zu zunehmend brackisch, bevor die vollständige Umstellung auf die Süswasser-dominierte Epoche der Oberen Süswassermolasse erfolgte. Heute kommt die OMM von der Nordostschweiz über das zentrale Mittelland bis an den Genfersee nahe der Oberfläche vor (Fig. 3-3). Tendenziell nimmt die Mächtigkeit der OMM vom distalen Beckenbereich im Norden (z.B. Bohrung Trüllikon: 26 m) in Richtung Subalpiner Molasse im Süden (z.B. Bohrung Hüneberg) von wenigen Dekametern auf mehrere hundert Meter zu. Ganz im Westen der Schweiz ist die OMM während der folgenden Kontinentalphase vollständig erodiert worden. Aufgrund ihrer Verbreitung und sandigen Ausbildung stellt die OMM wohl den bedeutendsten regionalen Aquifer der Molasse-Einheiten dar.

Die Obere Süswassermolasse (OSM, Unteres Miozän) besteht wie die USM aus einer Wechselagerung von Konglomeraten, Sandsteinen und Tonmergeln. Auch die OSM ist lateral und vertikal heterogen aufgebaut und zeigt grosse regionale und lokale Eigenheiten. Ursprünglich über die ganze Schweiz mit einem von Ost nach West verlaufenden Mächtigkeitsgefälle abgelagert, ist die OSM heute nur noch von der Zentralschweiz bis in die Ostschweiz und bis weit ins Süddeutsche Molassebecken nahe der Oberfläche vorhanden. Im Süden grenzt sie in der Zentralschweiz an einen dünnen Zug von OMM und weiter gegen Osten an die Subalpine Molasse (Fig. 3-3). Die heutige Mächtigkeit und Verbreitung der OSM ist das Resultat der auf die Sedimentation folgenden ausgeprägten Erosion. Diese begann mit der im Oberen Miozän einsetzenden Hebung des Molassebeckens worauf in der Folge mehr als 1000 m OSM abgetragen wurden. Die Erosion setzte sich während den diversen Gletschervorstössen im Pleistozän fort und dauert bis heute an. In der Ostschweiz beträgt im distalen Molassebecken die Mächtigkeit der unterhalb des Quartärs liegenden OSM rund 120–200 m (z.B. Bohrungen Benken, Marthalen) und nimmt gegen Süden im zentralen Molassebecken auf rund 400–500 m zu (z.B. Bohrungen Kreuzlingen, Berlingen, Herdern, Küsnacht). Gegen Westen in die Zentralschweiz nimmt die Mächtigkeit der OSM kontinuierlich ab (z.B. Bohrung Boswil ca. 340 m, Bohrung Altishofen ca. 40 m). Wie bei den Ablagerungen der USM, ist die Wasserführung in der OSM aufgrund der auf kurze Distanz wechselnden Lithologien und deren unterschiedlichem Zementierungsgrad heterogen, aber weitverbreitet.

### **3.4 Alpennordrand: Helvetikum & Teile der Penninischen Sedimentdecken**

Der Alpennordrand ist durch die Sedimentdecken des Helvetikums und aus nach Norden abgescherten Sedimentdecken des Penninikums aufgebaut (Fig. 3-1).

#### **3.4.1 Helvetische Sedimentdecken**

Die helvetischen Decken beinhalten den ganzen mesozoischen Sedimentstapel, welcher auf dem europäischen Kontinentalrand abgelagert wurde und demjenigen im Juragebirge ähnlich ist. Für die Wasserführung von Bedeutung sind auch hier die evaporitischen, sandigen und dolomitischen Ablagerungen der mittleren und späten Trias (z.B. Mel-Sandstein, Röti-Dolomit). Phasen relativ ruhiger und langandauernder Meeressedimentation führten während des Oberen Jura (Malm) und der Kreide zu mächtig ausgebildeten Kalkabfolgen. Im Känozoikum (Tertiär) wurde der Meeresgrund rasch abgesenkt und es kam zur Bildung von untermeerischen Schlammströmen in Form von vielen Abfolgen von Sandstein- und Tonlagen, welche als Flysch bezeichnet werden.

Während der Alpenbildung wurden diese Sedimente mit oder ohne kristallines Grundgebirge gegen Norden aufgeschoben und häufig mehrfach verfaultet. Die mehrheitlich schwache metamorphe Überprägung und die starke Deformation während der Deckenbildung führten in den starren Kalk-, Sand- und Dolomitabfolgen zu einer ausgeprägten spröden Deformation mit Kluft- und Bruchbildung. Die während der Hebung einsetzende Erosion (mit Abtragung in das entstehende Molassebecken) führte besonders in den Kalkabfolgen zu einer tiefgreifenden Verkarstung (z.B. Schrattekalk, Beatushöhlen).

Für die tiefe Wasserführung von Bedeutung sind wie im Juragebirge die evaporitischen Sedimente der Trias und die teilweise verkarsteten Kalkabfolgen des Malm und der Kreide (z.B. Mineralquellen Adelboden, Weissenburg, Saxon; Thermalwässer Rawil-Tunnel, Leukerbad, Saillon). Zusätzlich sind auch tiefe Grundwasservorkommen in den tertiären Flyschablagerungen vorhanden (z.B. Thermalwässer von Val d'Illicz, Wallis, und Wellenberg, Nidwalden). Aufgrund der teilweise mehrfachen Verfaltung und den komplexen Überschiebungsstrukturen (Fig. 3-5) können die Grundwasservorkommen innerhalb und über einzelne Decken hinweg in mehreren Stockwerken vorhanden und miteinander hydraulisch verbunden sein. Ein Beispiel hierfür sind die Grundwasservorkommen in der Drusberg-Decke und dem Nordhelvetischen Flysch der Axen-Decke am Wellenberg, Nidwalden, wo teilweise artesisches Grundwasser in Flysch und Kalkeinheiten bis in Tiefen von über 1400 m unter der Oberfläche angetroffen wurde (Fig. 3-5; Nagra 1997).

Wie auch im Juragebirge führt die unterschiedliche Mineralogie der im Helvetikum vorhandenen Gesteine im Grundwasser zu einer charakteristischen chemischen Zusammensetzung, aufgrund welcher auch die Tiefenzirkulation identifiziert werden kann.

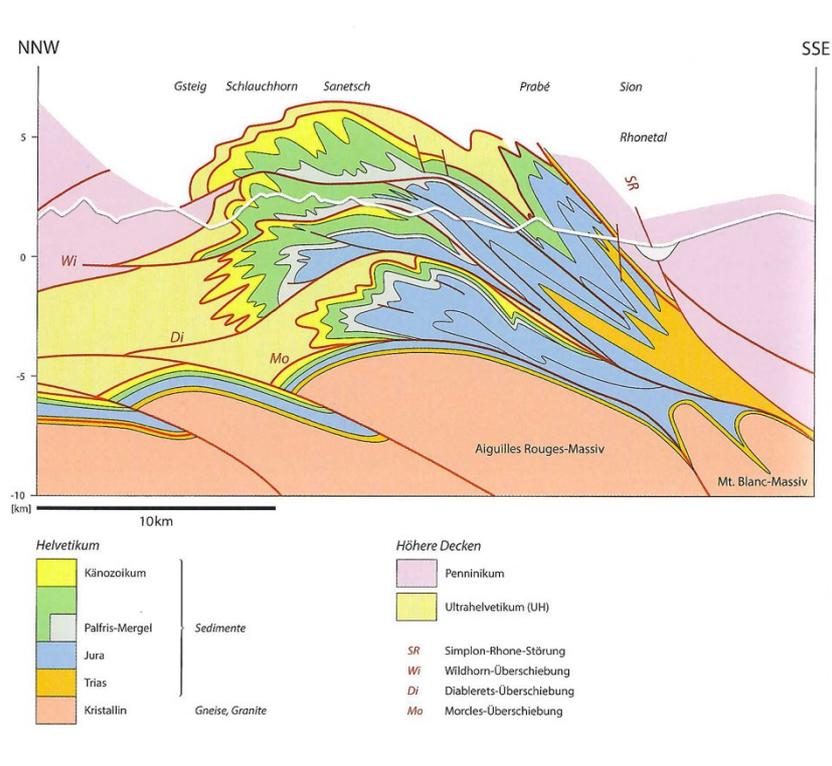


Fig. 3-4: Geologisches Profil durch das Helvetikum der Westschweiz.

Aus Pfiffner 2019. Die Morcles-Decke bildete die Sedimentbedeckung des Mont-Blanc Massivs; das Kristallin der Sedimente der Diablerets- und Wildhorn-Decken liegt südlich des Mont-Blanc Massivs).

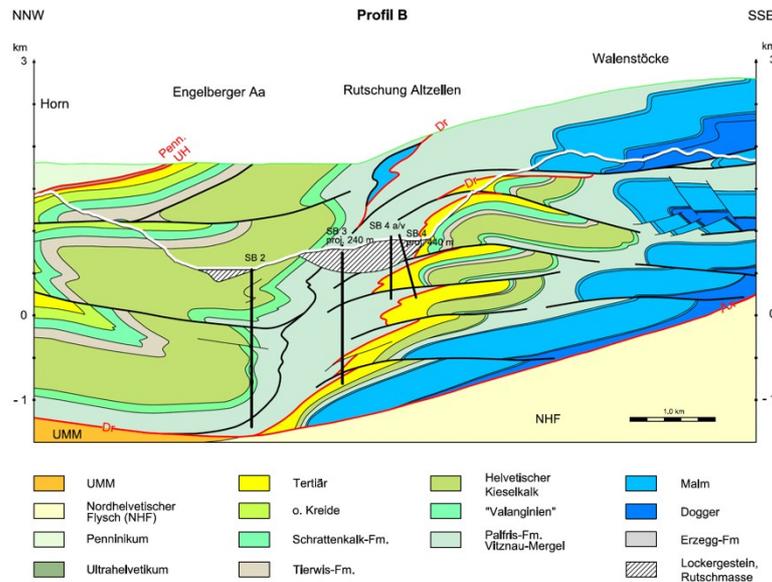


Fig. 3-5: Geologisches Profil durch das Helvetikum am Wellenberg, Kt. Nidwalden.

Aus Hänni & Pfiffner 2014. Grundwasser wurde bis an die Basis der Bohrungen SB2, SB3 und SB1 (nicht im Bild) in mehreren Tiefenintervallen bis in den Nordhelvetischen Flysch angetroffen. In den Flyscheinheiten (im Profil als Tertiär und NHF bezeichnet) herrschen artesische Grundwasser-Verhältnisse vor (Nagra 1997).

### 3.4.2 Penninische Sedimentdecken im Norden des Helvetikums

Während der Subduktion des Europäischen unter den Adriatischen Kontinents wurden die in unterschiedlichen Ablagerungsräumen (vgl. Abschnitt 3.5.2) gebildeten penninischen Sedimentstapel teilweise in Richtung Norden über die Helvetischen Decken überschoben.

In den heutigen Voralpen nehmen diese nördlich der helvetischen Decken liegenden, aus dem Penninikum stammenden Decken einen grossen Raum zwischen Genfersee und Thunersee ein und kommen weiter östlich nur noch kleinräumiger vor (Fig. 3-1). Der heutige Aufbau dieser Sedimentdecken ist aufgrund der vielen Überschiebungen, der Verfaltung und der mit diesen tektonischen Bewegungen einhergehenden Erosion, welche auch zu den Ablagerungen der Molassesedimente führten, sehr komplex und teilweise chaotisch (Fig. 3-6). So finden sich zwischen Genfersee und Thunersee angrenzend an das Helvetikum von Süden gegen Norden die Sedimente des unteren Penninikums (z.B. Niesen-Decke), des geographisch die grösste Fläche einnehmenden mittleren Penninikums (z.B. Klippen-Decke, Brekzien-Decke) und des oberen Penninikums (z.B. Gurnigel-Decke, Flysch-Decken).

Die Sedimentgesteine dieser vorgelagerten penninischen Decken beinhalten das ganze Mesozoikum, welches aber entsprechend ihren Ablagerungsräumen lithologisch unterschiedlich zusammengesetzt ist (vgl. Abschnitt 3.5.2). Zudem erfuhren die Sedimentstapel während ihrer Versenkung unter den adriatischen Kontinent eine schwache metamorphe Überprägung, bevor sie verfaltet und in den heutigen Decken über das Helvetikum überschoben wurden.

Auf die Wasserführung haben die tektonische Beanspruchung und die Erosion einen grossen Einfluss. So reichen z.B. die gemeinhin durchlässigen und der Verkarstung unterliegenden Evaporitablagerungen der Trias, welche als Sulfatmineral-führende Dolomite und Rauwacken vorliegen, von der Oberfläche bis in grosse Tiefen (Fig. 3-6). Mancherorts wird Grundwasser aus solchen

tiefgreifenden Zirkulationssystemen genutzt. Erwähnenswert ist auch, dass gewisse Sedimentabfolgen wie z.B. diejenigen des Lias oder Doggers, welche im Jura- und unter dem Mittel- und im Nordost-Helvetikum Aquitarden (Wasserstauer) bilden, in den penninischen Decken in anderer lithologischer Ausbildung vorliegen und – obwohl metamorph überprägt – deshalb hier Grundwasserführend sein können.

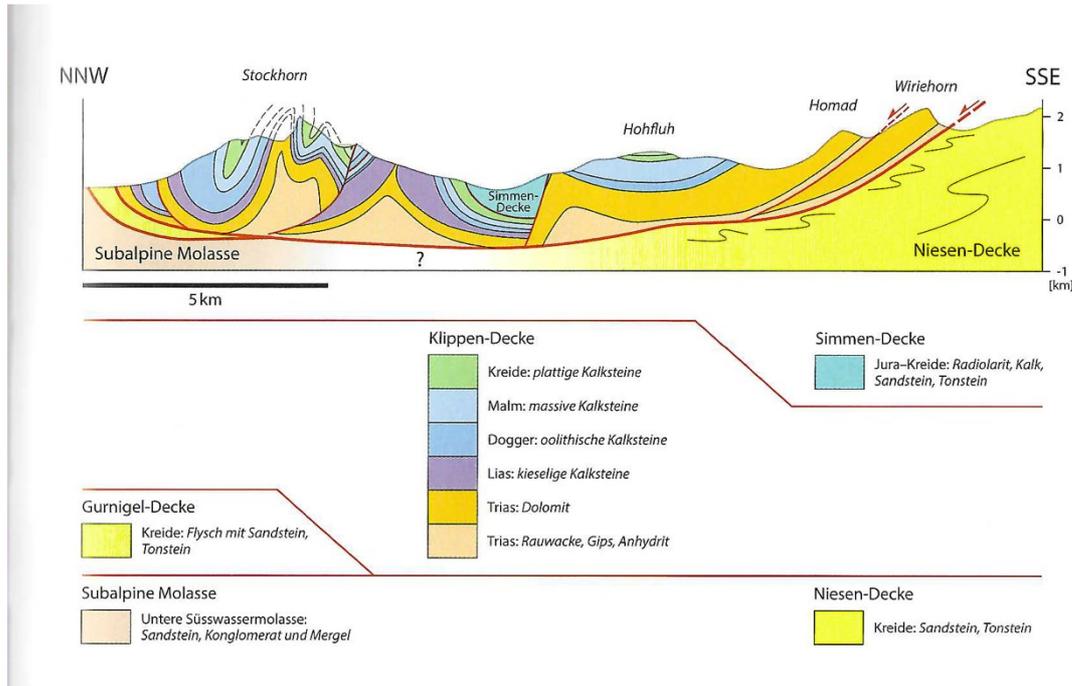


Fig. 3-6: Geologisches Profil durch penninischen Decken im Norden des Helvetikums. Aus Pfiffner 2019.

### 3.5 Alpenraum: Kristallin des Helvetikums und Penninikum, Ostalpin und Südalpin

Der Alpenraum besteht aus den Kristallingesteinen des Helvetikums, den Sediment- und Kristallin-Decken von Penninikum, Ostalpin, Südalpin, Salassikum, und im südlichen Engadin der tertiären, granitischen Bergeller Intrusion. Sediment- und Kristallingesteine erfuhren während der Alpenbildung je nach Lage und Versenkungsgrad eine unterschiedlich starke metamorphe Überprägung. So können die mesozoischen Sedimente in gewissen Teilen der Alpen nur schwach überprägt sein und ihre ursprüngliche Lithologie praktisch erhalten haben oder die ursprünglich karbonatischen und tonig-mergeligen Ablagerungen sind umgewandelt als Marmore und Granat-Glimmer-Schiefer und -Gneise mit vielen Variationen vorhanden.

Auf die Grundwasserführung und -zusammensetzung hat die metamorphe Überprägung einen grossen Einfluss. Während in wenig überprägten Sedimenten die Wasserzirkulation durchaus auch noch im Porenraum und – in kalkigen und evaporitischen Lithologien – in Karststrukturen stattfinden kann, ist die Zirkulation in den stark überprägten Sedimenten und den Kristallingesteinen an Kluft- und Bruchsysteme gebunden. Bezüglich dem Grundwasserchemismus ergeben sich in den schwach überprägten, mesozoischen Sedimenten ähnliche Zusammensetzungen, wie

in den gleichen Sedimenten im Juragebirge und im Untergrund des Mittellands. Demgegenüber ist Grundwasser in den vorwiegend aus Alumino-Silikaten bestehenden, stark überprägten Sedimenten und den alten gneisigen und granitischen Einheiten aufgrund der langsamen Reaktionskinetik der dort vorhandenen Minerale anders und nur gering mineralisiert. Einen nochmals anderen Chemismus und insbesondere andere Gehalte an metallischen Spurenelementen erhalten Grundwässer, welche sich in den basischen Mantelgesteinen und Vulkaniten an der Basis der unterpenninischen Decken und weiter verbreitet in den oberpenninischen Decken befinden.

### 3.5.1 Kristallin des Helvetikums

Die Kristallin-Massive des Helvetikums umfassen die Massive Mont-Blanc, Aiguilles-Rouges, Aar-Gotthard und ihre Sedimenthüllen. Sie stellen granitische Kristallinkörper dar, wovon die meisten vor rund 300 Mio. Jahren in viel ältere Gneise intrudierten. In Depressionen sind über den Graniten und Gneisen lokal noch spätpaläozoische Sedimente (Verrucano) vorhanden. Die Massive bildeten einen Teil des Grundgebirges auf welchem die mesozoischen Sedimente des Helvetikums (vgl. Abschnitt 3.4.1) abgelagert wurden. Während der Alpenbildung wurden die Massive gehoben und die überliegenden Sedimente in Decken nach Norden verfrachtet, so dass die kristallinen Gesteine nun an der Oberfläche liegen.

Die Kristallin-Massive des Helvetikums stellen typische Kluftwasserleiter dar. Die v.a. während der Hebung angelegten Bruchsysteme stellen zusammen mit denjenigen in den umgebenden Gneisschichten auch heute aktive und sehr tiefgreifende Wasserzirkulationssysteme dar. So wird z.B. für die am Grimselpass austretenden Thermalwässer (Pfeifer et al. 1992, Waber et al. 2017) eine Zirkulation von meteorischem Wasser bis in rund 10 km Tiefe vermutet (Diamond et al. 2018), bevor diese Wässer wieder an die Oberfläche gelangen. Ähnlich grosse Tiefen werden für Thermalwässer, welche im Gotthard NEAT-Tunnel angetroffen wurden, aufgrund der chemischen und isotopischen Zusammensetzung prognostiziert (Wanner et al. 2020).

### 3.5.2 Penninikum

Das Penninikum umfasst drei sehr unterschiedliche Ablagerungsräume, welche sich beim beginnenden Auseinanderdriften des Europäischen und des Adriatischen Kontinents ergaben. Im Norden ist das ein tiefer Meerestrog, der sog. Wallis-Trog, dessen Sedimente und Kristallingesteine die unterpenninischen Decken bilden. Gegen Süden anschliessend war eine submarine Schwelle vorhanden, die sog. Briançon-Schwelle, deren Sedimente und unterliegende Kristallingesteine die mittelpenninischen Decken bilden. Ganz im Süden bildete sich ein tiefer Ozean, der sog. Piemont-Ozean, dessen Sedimente und unterliegende Kristallingesteine die oberpenninischen Decken bilden. Im Unterschied zum Grundgebirge im Vorland, Juragebirge und Helvetikum beinhaltet das Grundgebirge des Wallis-Trogs und des Piemont-Ozeans (d.h. die unter- und oberpenninischen Decken) auch Gesteine aus dem Erdmantel und submarinen Vulkanismus. Wegen den unterschiedlichen Ablagerungsbedingungen bildeten sich in den drei Räumen verschiedene mesozoische Sedimentsequenzen (Fig. 3-7), welche während der Alpenbildung bei ihrer Subduktion unter den Adriatischen Kontinent unterschiedlich stark metamorph überprägt wurden.

Im unterpenninischen Wallis-Trog liegt eine dünne Schicht von Quarziten, Dolomiten und Rauwacken der Trias auf dem Kristallin und lokal auf Basalten und Serpentiniten, welche im Meer abgelagert wurden. Über den spärlichen, nur noch lokal vorhandenen Kalken und Tonsteinen aus der Liaszeit liegen die mächtigen tonig-sandigen Kalke und Tonsteine des Malms und der Kreide, welche als '*Bündnerschiefer*' bezeichnet werden. Diese sind heute grossräumig in Graubünden südlich des Rheins vorhanden und erstrecken sich zusammen mit den Triasgesteinen entlang dem Südrand des Helvetikums bis ins Unterwallis. Die jüngsten Sedimente im Wallis-Trog sind relativ

mächtige Ablagerungen von Sand- und Tonsteinen, welche nur in Graubünden an der Oberfläche anzutreffen sind und sich dort südlich an die Bünderschiefer anschliessen.

Die mittelpenninische Briançon-Schwelle hat aufgrund ihrer erhöhten Lage während der Sedimentation einen vergleichbaren Aufbau der mesozoischen Sedimente, wie er im Juraergebirge und unterhalb des Mittellands zu finden ist. Andere Tiefenverhältnisse in der Meeresbedeckung führten aber besonders während der Zeit von Lias zum Tertiär zu einer unterschiedlichen lithologischen Ausbildung. Auch sind die Ablagerungen der Trias und der Lias mächtiger ausgebildet und diejenigen des Malm und der Kreide weniger mächtig als z.B. im Juraergebirge (Fig. 3-7). Die Sedimente der Trias beinhalten von unten nach oben Quarzite, Dolomite sowie mächtige Evaporitabfolgen, welche heute vorwiegend als Rauwacken vorliegen und von einer weiteren Sequenz mit Dolomitgesteinen überlagert werden. Im Malm, der Kreide und auch im Känozoikum herrschen Kalk-dominierte Ablagerungen mit zwischengelagerten Mergelabfolgen vor. Obwohl von Graubünden über das Tessin bis ins Wallis vorhanden, sind die mittelpenninischen, mesozoischen Sedimente an der Oberfläche deutlich weniger weit verbreitet, als diejenigen des Unterpenninikums.

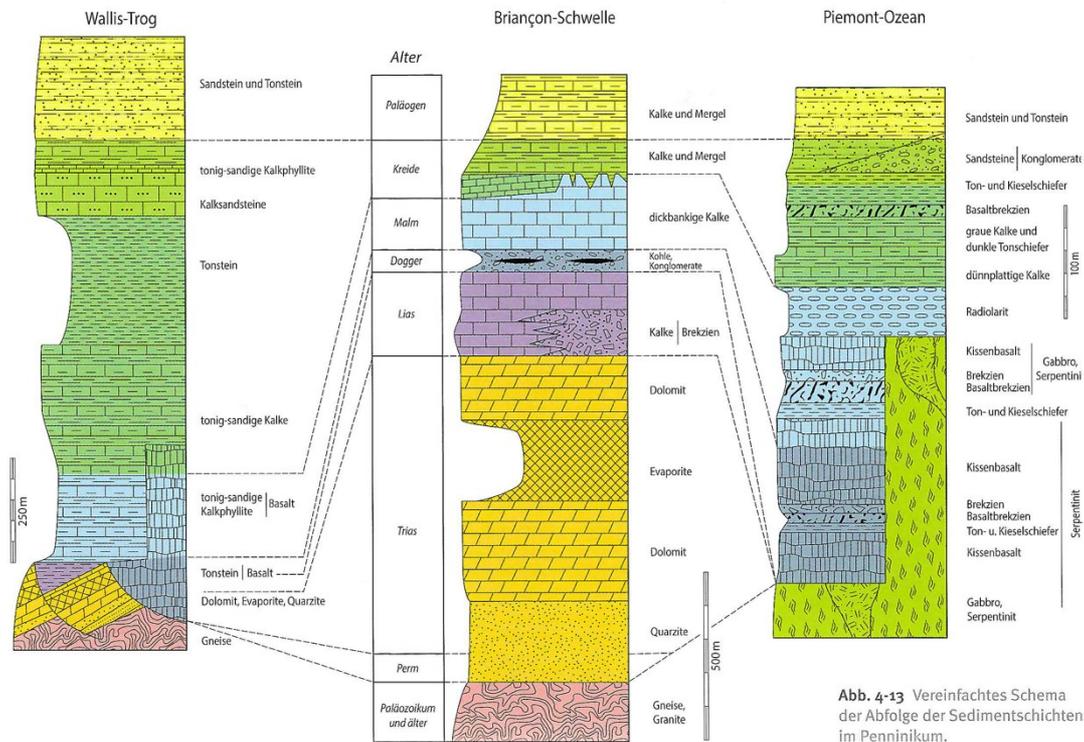


Abb. 4-13 Vereinfachtes Schema der Abfolge der Sedimentschichten im Penninikum.

Fig. 3-7: Vereinfachtes Schema der Abfolge der Sedimentschichten in den drei Ablagerungsräumen des Penninikums.

Aus Pfiffner 2019.

Im oberpenninischen Piemont Ozean herrschten während des Mesozoikums völlig andere Bedingungen. Es kam bis in die Kreidezeit zu Tiefseeablagerungen durchsetzt mit Basalten, Gabbros und Peridotiten, wobei Letztere heute als Serpentinite vorliegen, und welche bei der Öffnung des Piemont-Ozeans aus dem Mantel auf den Meeresgrund an die Oberfläche gelangten (Fig. 3-7).

Während der späten Kreide und im Tertiär nahm die Meerestiefe langsam ab und es kam zu konglomeratischen und sandigen Ablagerungen, welche häufig als Flysch ausgebildet sind. Die Decken mit solchen ozeanischen Gesteinen inklusive der mafischen Mantelgesteine liegen heute zuoberst im penninischen Deckenstapel und sind vor allem in Graubünden (Avers-Decke-Arosler Zone, Platta-Decke) und im südlichen Wallis (Zone Zermatt – Saas Fee, Combin-Zone) anzutreffen. Demgegenüber wurden die oberen kretazischen und tertiären Sedimente nach Norden über die unterpenninischen Decken und das Helvetikum hinweggeschoben und finden sich heute als Flysch-Decken (z.B. Gurnigel-Decke in der Westschweiz, Wägitaler-Decke in der Ostschweiz) auf der Subalpinen Molasse (vgl. Fig. 3-1) bzw. auf mittelpenninischen Deckenstapeln aufliegend als Mantelgestein-führende Decken (z.B. Simmen-Decke in der Westschweiz) liegend wieder.

Der tektonische Bau des Penninikums ist komplex und regional unterschiedlich. Generell liegen die penninischen Kristallin-Decken als 3–5 km mächtige Schollen von mittel- bis hochmetamorphen Kristallingesteinen vor, welche sich vom Helvetikum gegen Süden über mehr als 20 km und von West nach Ost über mehr als 50 km verfolgen lassen (Fig. 3-1). Diese sind dachziegelartig übereinandergestapelt und durch geringmächtige Triassedimente (z.B. der sog. 'Basisquarzit') voneinander getrennt. Die jüngeren, mesozoischen und känozoischen Sedimente sind als Sedimentdecken auf den Evaporitlagen abgeschert und gegen Norden (z.T. über das Helvetikum hinweg) geschoben und gestapelt worden. Generell liegen heute die unterpenninischen Kristallin-Decken (also das Grundgebirge des Wallis-Trogs) zuunterst und die oberpenninischen Decken (also das Grundgebirge des Piemont-Ozeans) mit ihren Mantelgesteinen zuoberst. Unter- und mittelpenninische Kristallin-Decken sind zum grössten Teil aus sauren granitischen und gneisigen Gesteinen aufgebaut, während die oberpenninischen Kristallin-Decken aus mehrheitlich basischen Mantelgesteinen bestehen.

Die tiefe Grundwasserführung und die chemische Zusammensetzung von Grundwässern im penninischen Raum ist wie eingangs erwähnt von der lithologischen Ausbildung, der metamorphen Überprägung und der tektonischen Beanspruchung der Gesteine abhängig. So ist die Wasserführung in nur gering metamorph überprägten unterpenninischen Sedimentabfolgen je nach Lithologie Porenwasser- oder Kluftwasser-dominiert. In den Rauwacken der Trias ist teilweise sogar eine Karstwasserführung ausgebildet. Wie die diversen Thermal- und Mineralwasservorkommen (z.B. Bad Ragaz, Rhäzuns, Passug, Vals) und Vorkommen in Tunneln (z.B. Gotthardtunnel mit Piora-Mulde) andeuten, erfolgt die Wasserführung in den unterpenninischen Sedimenten bis in Tiefen von mehreren hundert Metern oder mehr. Die mittel- und oberpenninischen Sedimentabfolgen sind generell höher metamorph überprägt und zum grossen Teil Kluftwasserfluss dominiert. Gleiches gilt für alle penninischen Kristallin-Decken, wobei die mafischen Mantelgesteine in den oberpenninischen Decken einen völlig anderen Einfluss auf den Chemismus des in diesen Gesteinen zirkulierenden Grundwassers haben. Tiefgreifende Zirkulationssysteme sind entlang der Kontakte verschiedener penninischer Decken und zu den Kristallin-Massiven des Helvetikums (z.B. Mineral- und Thermalwässern von Brig, Lavey-les-Bains, Acquarossa, Graubünden; z.B. Nussberger et al. 1937, Hartmann 1998, Pastorelli et al. 1999, Sonney et al. 2009 & 2020,), in den Kluft- und Störungszonen innerhalb der helvetischen Kristallin-Massive (z.B. Aiguilles-Rouges-, Mont-Blanc-, Aar-Massiv; z.B. Maréchal 1998, Pastorelli et al. 2001, Maréchal & Etcheverry 2003, Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Diamond et al. 2018, Wanner et al. 2020, Stober et al. 2023) und in den (infra-) penninischen Kristallin-Decken (z.B. Simplon, Furka, Nufenen; z.B. Hunziker et al. 1990, Bianchetti et al. 1993) bekannt.

### 3.5.3 Ostalpin

Die Ostalpinen Decken stellen den Rand des adriatischen Kontinents dar, welcher während der Kreidezeit auf die sich bildenden Alpen aufgeschoben wurde. Der kristalline Untergrund dieses Kontinentalrands besteht aus alten Para- und Orthogneisen, Graniten und Amphiboliten. Das

Kristallin weist tiefgreifende Grabenstrukturen auf, welche mit v.a. permischen Sandsteinen und Brekzien vom Verrucano-Typ gefüllt sind. Im Mesozoikum während der Triaszeit herrschte auf dem adriatischen Kontinentalrand ein seicht-marines Umfeld, was zur Ablagerung von mächtigen Dolomitabfolgen und Evaporiten führte (Fig. 3-8). Zu Beginn der Jurazeit nahm die Meerestiefe rasch bis auf gegen 10 km zu. Als Folge davon lagerten sich zuerst Kalke, Mergel und ausge dehnte Brekzien ab, welche in radiolaritische Tiefseesedimente übergingen. Darüber folgen die in etwas geringerer Tiefe abgelagerten Kalke und kieseligen Tonsteine des Malms und in noch einmal geringerer Tiefe abgelagerte Mergel- und Kalkabfolgen der Kreide. In der Oberen Kreide kam es zur Ablagerung von Sand- und Tonsteinen, welche von der Erosion des sich im Norden bildenden alpinen Gebirges stammen.

Im heutigen Alpenraum ist das Ostalpin mit seinen Sediment- und Kristallin-Decken in Graubünden und im Engadin anzutreffen. Für die Wasserführung sind einerseits die mächtigen und weitverbreiteten Dolomite und Evaporite der Trias und andererseits die durch die intensive tektonische Beanspruchung entstandenen Kluft- und Störungszonen inklusive der tiefgreifenden Engadiner Störung von Wichtigkeit. Aufgrund der intensiven Verfaltungen und Überschiebungen erstrecken sich heute die potentiell wasserführenden, mesozoischen Evaporit- und Kalkabfolgen bis in mehrere Kilometer Tiefe. Evaporitische Abfolgen liegen zudem heute meist als Rauwacke vor und begünstigen so auch einen Porenwasserfluss und die Verkarstung neben dem sonst dominierenden Kluftwasserfluss. Im ganzen Ostalpin finden sich verbreitet Vorkommen von tiefgreifenden Zirkulationssystemen von Thermal- und Mineralwässern (z.B. Scuol-Tarasp, Andeer), wovon einige schon zu Römerzeit bekannt waren (z.B. Bissig et al. 2006).

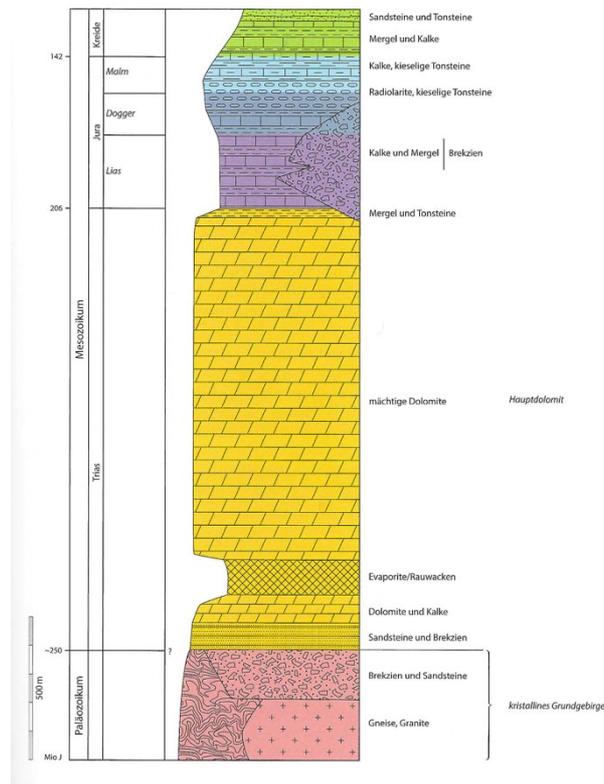


Fig. 3-8: Vereinfachtes Schema der Abfolge der Sedimentschichten im Ostalpin und Südalpin.

Aus Pfiffner 2019.

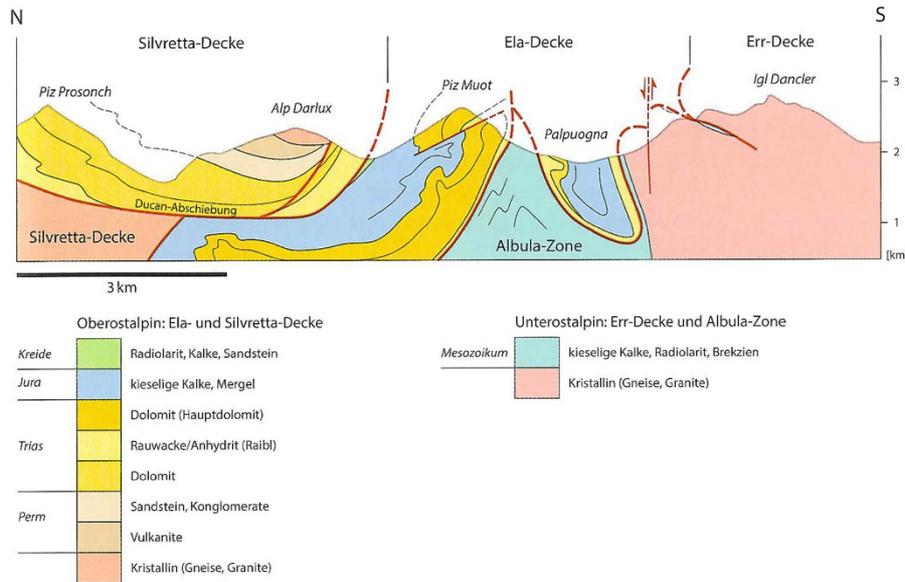


Fig. 3-9: Vereinfachter Profilschnitt Preda – Albula zur Illustration der tiefen Ausdehnung von potentiell wasserführenden, mesozoischen Sedimentabfolgen im Ostalpin.

Aus Pfiffner 2019.

### 3.5.4 Südalpin

Das Südalpin schloss sich auf dem adriatischen Kontinentalrand südlich an die Ostalpen an. Es beinhaltet eine ähnliche Abfolge von auf kristallinem Grundgebirge abgelagerten mesozoischen Sedimenten wie das Ostalpin (vgl. Fig. 3-8). Das Südalpin liegt heute südlich der Insubrischen Linie, welche sich von Domodossola über Bellinzona ins Veltlin erstreckt. In der Schweiz besteht das Südalpin zum grössten Teil aus dem paläozoischen Grundgebirge mit seinen Para- und Orthogneisen und granitischen, porphyritischen und diabasischen Kristallingesteinen. Metamorphe, mesozoische Sedimente finden sich nur noch im südlichsten Zipfel der Schweiz in der Region von Morcote bis Mendrisio. Weiter gegen Süden tauchen diese mesozoischen Sedimente unter das Känozoikum des Po-Beckens ab (Fig. 3-10).

Bezüglich Tiefengrundwasser ist aus dem Südalpinen Raum wenig bekannt. Die Wasserzirkulation dürfte wie in den anderen Kristallingestein-dominierten Regionen vorwiegend entlang von Klüften und anderen tektonischen Störungszonen verlaufen.

### 3.5.5 Salassikum

Das Salassikum beinhaltet wie das Südalpin ebenfalls eine Sequenz von Grundgebirge und mesozoischen Sedimenten des adriatischen Kontinentalrands. Im Unterschied zum Südalpin wurden aber diese Gesteinseinheiten zuerst durch eine südgerichtete Subduktion sehr tief versenkt und hoch-metamorph überprägt, bevor sie durch nordgerichtete Überschiebungen in den alpinen Deckenbau einbezogen wurden. Bestandteile des Salassikums in der Schweiz sind die Sesia- und Canavese-Zonen und die Dent-Blanche-Decke im Wallis, welche auf den dortigen penninischen Deckenstapel aufgeschoben wurde. Auf Schweizer Gebiet beinhaltet das Salassikum praktisch ausschliesslich Kristallingesteine (Para- und Orthogneise, granitische Gesteine).

Wie für das Südalpin ist auch für das geographisch heute noch weniger verbreitete Salassikum wenig über eine mögliche tiefe Wasserzirkulation bekannt. Auch in diesen Regionen dürfte aber die Wasserzirkulation wie in den anderen Kristallingestein-dominierten Regionen vorwiegend entlang von Klüften und anderen tektonischen Störungszonen verlaufen.

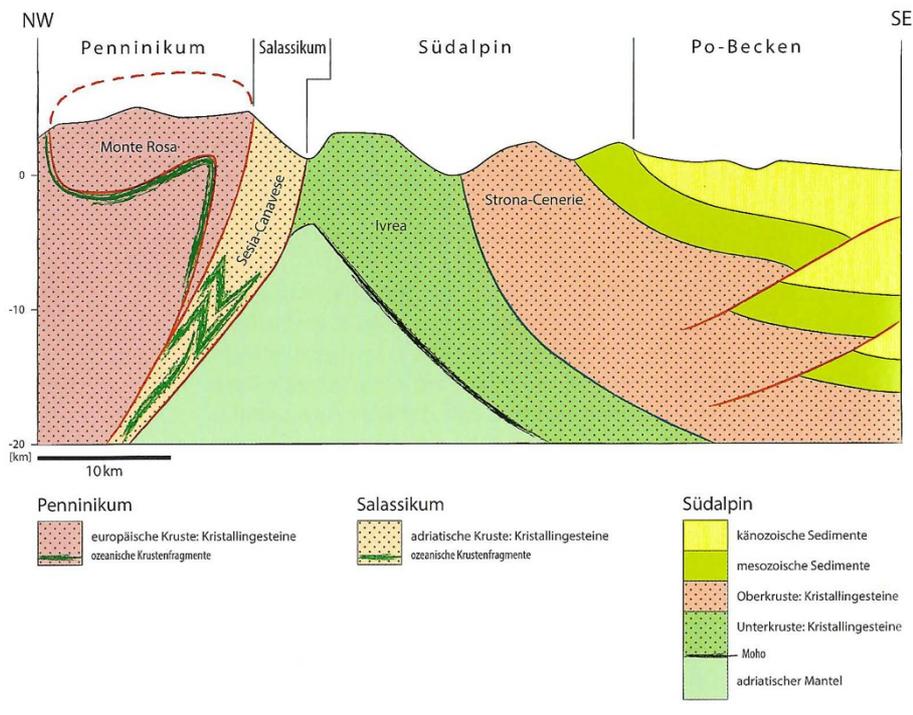


Fig. 3-10: Vereinfachter Profilschnitt der europäisch – adriatischen Kontaktzone von Valle d'Ossola über Lago Maggiore nach Italien.

Aus Pfiffner 2019.

## 4 Grundwasser in oberflächennahen Grundwasserleitern

### 4.1 Verbreitung von oberflächennahen Grundwasserleitern

Oberflächennahes Grundwasser, welches für die Trinkwasserversorgung genutzt wird oder werden könnte, kommt sowohl in Lockergestein- als auch Festgestein-Grundwasserleitern vor.

Lockergestein-Grundwasserleiter finden sich hauptsächlich entlang von Flussläufen und in Talsohlen. In diesen mittel- bis grobkörnigen Sanden, Kiesen und Schottern findet der Grundwasserfluss grossräumig im mehr oder weniger homogen verteilten Porenraum statt. Die laterale Verbreitung der Lockergestein-Grundwasserleiter lässt sich relativ gut bestimmen und ist in der Karte der Grundwasservorkommen 1:500'000 basierend auf der Hydrogeologischen Karte der Schweiz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo) festgehalten. Die laterale Ausdehnung von Lockergestein-Grundwasserleitern, welche sich innerhalb von Talsohlen entlang von Flussläufen erstrecken, variiert von wenigen km<sup>2</sup> entlang Bächen und kleineren Flüssen bis zu mehreren 100 km<sup>2</sup> entlang der grossen Flussläufe (Rhone, Aare, Rhein, Reuss, Limmat, Ticino). Die Kenntnis der vertikalen Ausbreitung dieser Grundwasserleiter, und besonders die Kenntnis der Grundwasserzusammensetzung, beschränkt sich meist auf das oberste Stockwerk in den ersten Dekametern solcher Talfüllungen. Es sind auch mehrheitlich die Grundwasservorkommen in diesen obersten Stockwerken, welche heute genutzt werden. In den Talfüllungen der grossen Flüsse (vgl. Fig. 4-1) und besonders in den glazial stark übertieften Tälern können durchlässigere Ablagerungen durchaus in Tiefen von einigen hundert Meter vorkommen (z.B. Felsrinne Richterswil–Menzingen–Zug > 300 m, Hantke et al. 2009; Rhonetal bei Martigny > 400 m, Sonney et al. 2020) und Grundwasser in mehreren Stockwerken führen. Die öffentlich zugängliche Datenlage über diese Vorkommen ist aber noch sehr beschränkt.

Für die Festgestein-Grundwasserleiter gestaltet sich die Bestimmung ihrer Ausdehnung schwieriger. Vor allem in den Karst- und Kluft-Grundwasserleitern ist die hydraulische Verbundenheit der komplexen Karst- und Kluft-Netzwerke sowohl vertikal als auch horizontal schwierig zu bestimmen. Zudem hängen diese wasserführenden Strukturen in grossem Masse von der tektonischen Beanspruchung und dementsprechend der geo-tektonischen Lage der betrachteten Lithologien ab. Lateral können sich Karst- und Kluft-Grundwasserleiter über weit mehr als 100 km<sup>2</sup> erstrecken, aber auch deutlich kleinräumiger sein. Während sich ein Grossteil der genutzten Karst- und Kluftgrundwasservorkommen in den ersten Dekametern bis rund 200 m unter der Oberfläche befinden, wird z.B. im Faltenjura Karst-Grundwasser auch aus deutlich grösseren Tiefen genutzt (z.B. Delsberger Becken, Muralt 1999). Die laterale Ausdehnung von zusammenhängenden Porengrundwasservorkommen im Festgestein, z.B. in sandigen Lithologien der Molasseablagerungen im Mittelland, dürfte sich in einem ähnlichem, geographisch stark variablen Rahmen halten. Aus solchen Vorkommen werden heute v.a. die Vorkommen in den obersten Stockwerken in wenigen Dekametern unter der Oberfläche genutzt. Demgegenüber ist über tiefere Grundwasservorkommen in solchen Festgesteinen noch wenig bekannt. Wasserqualitäts-Daten von oberflächennahen Grundwasservorkommen liegen von ca. 550 Messstellen von den Modulen TREND und SPEZ der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA vor. Aufgrund der regionalen Verteilung dieser Messstellen und der Verfügbarkeit anderer Grundwasserdaten sind die genutzten, oberflächennahen Grundwässer in einen gegenüber Fig. 3-1 nochmals vereinfachten geo-tektonischen Hintergrund zusammengefasst und dargestellt (Fig. 4-1). Die NAQUA-Daten und die älteren Daten sind entsprechend den in Fig. 4-1 angegebenen geo-tektonischen Grossräumen tabelliert und beschrieben. Für die vor 2010 erhobenen Daten ist zudem die Zuordnung in hydrogeologische Einheiten vorhanden, wie sie für die Tiefengrundwässer benutzt wird (vgl. Abschnitt 5.1.1 und Fig. 5-2). Das erlaubt eine weitere Unterteilung der oberflächennahen Grundwässer insbesondere auch für die unterschiedlichen Molasse-Einheiten.

## 4.2 Grundwasser in Lockergesteinen

Grundwasser in den Lockergesteinen steht mit demjenigen in Festgestein-Grundwasserleitern abhängig von den geologischen Verhältnissen in unterschiedlich stark ausgeprägter Verbindung. Je nach den geologisch-hydrologischen Bedingungen fliesst Grundwasser aus Lockergestein-Grundwasserleitern in Festgestein-Grundwasserleiter oder vice versa. Gleichermassen infiltriert Grundwasser aus Lockergestein vielerorts in tiefere Grundwasserleiter.

Für die generelle chemische Charakterisierung von Grundwasser in Lockergesteinen wurden die im Rahmen von zwei NAQUA-Pilotstudien erhobenen Daten in den Jahren 2018/2019 an Messstellen der Module TREND und SPEZ verwendet. Dieselbe Datenbasis wurde zur Bestimmung von Hintergrundwerten in oberflächennahen Grundwasservorkommen verwendet (Wanner et al. 2023). In Wanner et al. (2023) findet sich auch eine detaillierte Beschreibung der Genese dieser Grundwässer und ihrer Mineralisation.

### 4.2.1 Generelle chemische Charakterisierung

Grundwasser in oberflächennahen Lockergestein-Grundwasserleitern ist generell gering mineralisiertes Süsswasser und weist eine Mineralisation von  $< 1$  g/L auf (Tab. 4-1 und Tab. 4-2). Die durchschnittliche Mineralisation der Grundwässer ist im Tafeljura, Faltenjura und dem

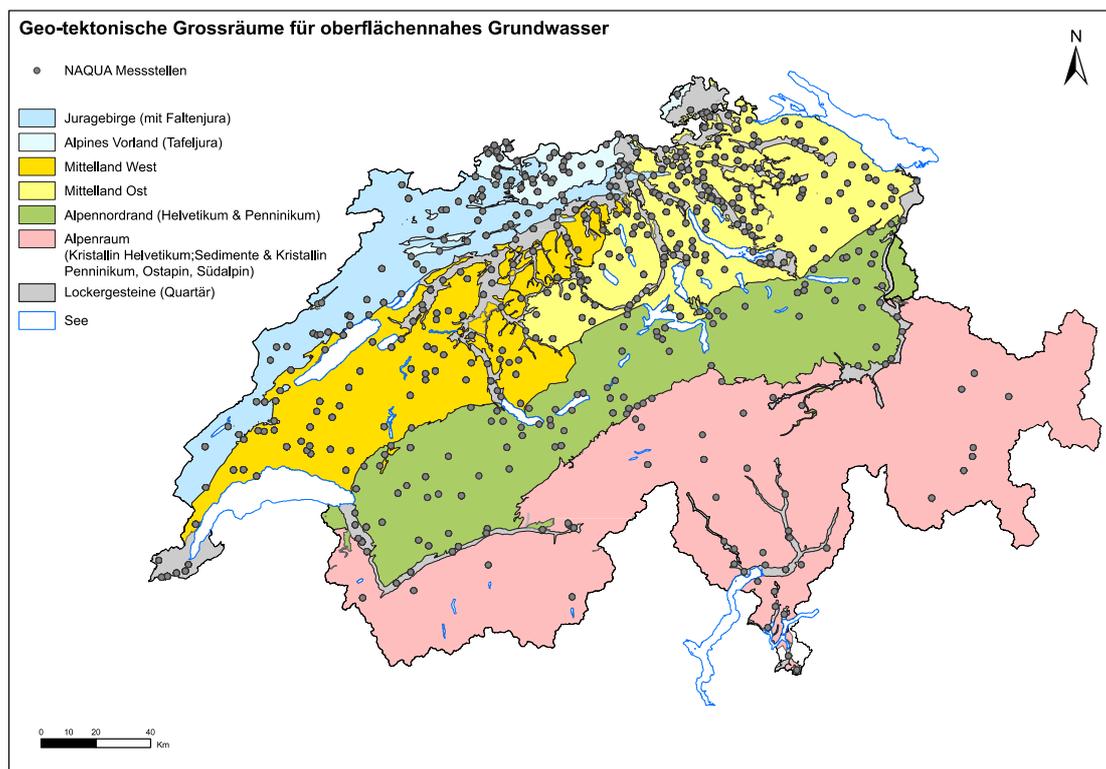


Fig. 4-1: Vereinfachte geo-tektonische Grossräume, welche für die geographisch-geologische Einteilung der oberflächennahen Grundwasserdaten verwendet werden und die Messstellen der NAQUA-Module TREND und SPEZ.

Modifiziert nach Wanner et al. 2023.

Mittelland inklusive dessen Talfüllungen ähnlich, mit einem Bereich von rund 460–580 mg/L. In den Lockergesteinen des Alpennordrands und im Alpenraum haben die Grundwässer durchschnittlich eine leicht geringere Mineralisation von rund 200–480 mg/L. Die geringsten Werte werden dabei in Lockergestein-Grundwasserleitern über Kristallingesteinen beobachtet (Alpenraum Süd in Tab. 4-2).

Grundwasser in Lockergestein-Grundwasserleitern ist unabhängig von der geographisch-geologischen Lage in der ganzen Schweiz durch Karbonatlösung dominiert und mehrheitlich vom (vereinfachten) chemischen Ca-CO<sub>3</sub>-Typ gefolgt vom Ca-Mg-CO<sub>3</sub>-Typ (Tab. 4-1 und Tab. 4-2). Einflüsse von Evaporit-Mineralen (v.a. Gips, Anhydrit) in den Sedimenten der Trias und Sulfid-Oxidation in Kristallingesteinen sind im Tafeljura, in Teilen des Alpennordrands und dem Alpenraum ersichtlich. Im Alpenraum treten aufgrund der dort auch in den Lockergesteinen von Alumino-Silikat-Mineralen dominierten Mineralogie und der geringen Mineralisation auch weitere chemische Typen mit Natrium (Na<sup>+</sup>) und Chlor (Cl<sup>-</sup>) als wichtige Bestandteile auf (Tab. 4-2). In dicht besiedelten Gebieten sind zudem anthropogene Einflüsse von Natrium und Chlor erkennbar (vgl. Wanner et al. 2023).

Der pH-Werte von Grundwasser in Lockergestein-Grundwasserleitern im Tafeljura, Faltenjura und dem Mittelland inklusive dessen Talfüllungen ist durch die Karbonatlösung kontrolliert und variiert für die meisten Grundwässer in einem Bereich von 7–7.5. Diese Grundwässer haben eine erhöhte totale Alkalinität von durchschnittlich 4.8–6.3 meq/L (Tab. 4-1). Dabei entspricht die totale Alkalinität praktisch vollständig der Karbonat-Alkalinität. Demgegenüber haben Grundwässer in Lockergestein-Grundwasserleitern des Alpennordrands und Alpenraums je nach Auftreten und der vorhandenen Gesteinsmineralogie leicht basischere oder saurere pH-Werte, bei einer geringeren totalen Alkalinität (Tab. 4-2).

Die Temperatur von Grundwasser in Lockergestein-Grundwasserleitern ist abhängig von der Jahreszeit, der Meereshöhe und der Infiltrationsmenge und variiert deshalb relativ stark. Zudem liegen für die hier betrachteten Daten mehrheitlich Einzelmessungen vor und stellen somit eine Momentaufnahme dar. Die durchschnittliche Grundwasser-Temperatur in Lockergestein-Grundwasserleitern im Tafeljura, Faltenjura, Mittelland und im westlichen und südlichen Alpenraum dieser Momentaufnahme liegt recht einheitlich zwischen rund 11–13°C (Tab. 4-1 und Tab. 4-2). Lokal, besonders in dicht besiedelten Gebieten, werden aber Temperaturen bis >18°C beobachtet. Geringere Temperaturen von mehrheitlich <10°C sind in Grundwässern am Alpennordrand und im östlichen Alpenraum vorhanden.

#### 4.2.2 Redox-Bedingungen

Messungen des Redoxpotentials von oberflächennahem Grundwasser in Lockergestein-Grundwasserleitern sind nicht vorhanden. Die Grundwässer sind mit vereinzelt Ausnahmen aber alle mehr oder weniger Sauerstoff-führend und weisen dementsprechend ein oxidierendes Redox-Milieu auf (Tab. 4-3 und Tab. 4-4). Die Sauerstoffsättigung variiert aber unabhängig der geographisch-geologischen Lage zwischen vollständig gesättigt und < 5% Sättigung.

Entsprechend dem oxidierenden Redox-Milieu sind auch die Konzentrationen von gelöstem Eisen (Fe) und Mangan (Mn) gering und liegend meist unterhalb 0.01 mg/L (Tab. 4-3 und Tab. 4-4), was in etwa der Löslichkeitskontrolle durch mineralische Fe- und Mn-Hydroxide entspricht.

Gelöster Schwefel liegt ausschliesslich als Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) vor und reduzierte Schwefelspezies (H<sub>2</sub>S, HS) sind nicht vorhanden (Tab. 4-3 und Tab. 4-4). Die Konzentration von gelöstem SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> zeigt dabei in Abhängigkeit von der Gesteinsmineralogie gewisse regionale Unterschiede. In den Karbonat-dominierten Gesteinen des Faltenjuras, des Mittellands, des Alpennordrands und des südlichen Alpenraums sind die durchschnittlichen Konzentrationen < 20 mg/L. Bis zu 10-fach höhere Gehalte finden sich in den durch Evaporitgestein der Trias beeinflussten Einzugsgebieten

im Tafeljura, Teilen des Alpennordrands und auch im westlichen und östlichen Alpenraum (Tab. 4-3 und Tab. 4-4).

Die durchschnittlichen Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) sind in allen geo-tektonischen Grossräumen mit  $< 0.5$  mg/L gering mit Ausnahme der Grundwässer im Juragebirge, welche etwas erhöhte durchschnittliche Konzentrationen aufweisen (Tab. 4-3 und Tab. 4-4). Die geringsten DOC-Konzentrationen sind in den Lockergestein-Grundwässern des Alpennordrands und des Alpenraums vorhanden.

Im zur Verfügung stehenden Datensatz liegen keine Daten für die Lockergestein-Grundwässer für gelösten Stickstoff und Phosphor vor, welche für mikrobielle Prozesse von Wichtigkeit ist.

### 4.2.3 Metallische Spurenelemente

Die Gehalte von metallischen Spurenelementen in den Lockergestein-Grundwässern der Jahre 2018/19 und deren Herkunft sind in Wanner et al. (2023) ausführlich beschrieben. Für die meisten Elemente liegen die Konzentrationen im Bereich von wenigen Mikrogramm/L ( $\mu\text{g/L}$ ) oder darunter. Erwähnenswert sind die gegenüber den anderen geo-tektonischen Grossräumen mehrheitlich erhöhten Gehalte von (vgl. Tab. 4-5 und Tab. 4-6):

- Arsen (As), welches in den oxidierenden Grundwässern vorwiegend als gelöstes, fünfwertiges Arsenat ( $\text{AsO}_4^{-3}$ ) vorliegt, im Tafeljura, Faltenjura und dem südlichen Alpenraum
- Chrom (Cr), welches in den oxidierenden Grundwässern vorwiegend als gelöstes, sechswertiges  $\text{Cr}^{\text{VI}}$ , vorwiegend als Chromat ( $\text{CrO}_4^{-2}$ ) vorliegt, im Tafeljura und dem westlichen Mittelland
- Kupfer (Cu) im Tafeljura, Faltenjura und dem Mittelland mit seinen Talfüllungen
- Molybdän (Mo) im Alpenraum,
- Nickel (Ni) im Faltenjura, Teilen des Mittellands (Raum Genf), dem Alpennordrand und dem westlichen und östlichen Alpenraum
- Blei (Pb) und Zink (Zn) im Tafeljura, Faltenjura und dem Mittelland mit seinen Talfüllungen
- Uran (U) im Mittelland und Alpenraum

Tab. 4-1: Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA; Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
Tafeljura	Analysen Total	50	29	43	25	28	Ca-HCO <sub>3</sub>  weniger häufig: Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-HCO <sub>3</sub> -Cl
	Anzahl Messwerte	50	29	43	25	28	
	Anzahl Lokalitäten: 26	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	676	523	13.1	7.37	4.79	
	Standardabweichung	162	131	1.3	0.20	0.95	
	Minimum	351	268	10.7	7.00	2.93	
	Maximum	1104	744	15.6	7.80	7.19	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Faltenjura	Analysen Total	30	9	30	8	9	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	30	9	30	8	9	
	Anzahl Lokalitäten: 12	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	575	462	11.1	7.31	5.01	
	Standardabweichung	132	105	1.7	0.17	1.01	
	Minimum	410	364	8.1	7.10	4.06	
	Maximum	852	645	14.9	7.50	6.75	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	191	124	223	49	125	Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	191	124	223	49	125	
	Anzahl Lokalitäten: 79	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	679	573	11.2	7.37	6.31	
	Standardabweichung	130	117	1.5	0.24	1.05	
	Minimum	272	158	7.6	7.10	2.80	
	Maximum	935	797	15.1	7.80	8.16	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	82	40	82	36	40	Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	82	40	82	36	40	
	Anzahl Lokalitäten: 35	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	660	577	11.1	7.23	6.19	
	Standardabweichung	106	108	1.3	0.20	0.90	
	Minimum	358	172	9.0	6.40	2.36	
	Maximum	912	753	18.0	7.60	7.64	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Mittelland West Raum Genf (Lockergestein auf USM)	Analysen Total	9	9	9	0	9	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	9	9	9	0	9	
	Anzahl Lokalitäten: 5	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	538	381	12.2		4.18	
	Standardabweichung	129	92	0.4		0.99	
	Minimum	371	238	11.8		2.46	
	Maximum	727	516	13.0		5.59	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Mittelland Talfüllungen (Lockergestein, vgl. Fig 4-1 für Verbreitung)	Analysen Total	213	167	271	97	167	Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	213	167	271	97	167	
	Anzahl Lokalitäten: 102	$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$^{\circ}\text{C}$	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$	$\text{meq/L}$	
	Durchschnitt	623	528	12.1	7.32	5.59	
	Standardabweichung	124	103	1.2	0.19	1.13	
	Minimum	281	243	9.4	6.80	2.51	
	Maximum	936	726	18.2	7.90	8.00	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						

Tab. 4-2: Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum	Analysen Total	54	36	57	30	36	Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	54	36	57	30	36	
	Anzahl Lokaltäten: 37	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>a,H+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	354	306	8.7	7.58	3.31	
	Standardabweichung	133	95	1.7	0.28	0.98	
	Minimum	105	128	5.2	6.70	1.18	
	Maximum	654	513	12.1	8.10	6.02	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Alpenraum West Ob. Rhonetal & Penninikum	Analysen Total	32	23	32	19	23	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> weniger häufig: Ca-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte	32	23	32	19	23	
	Anzahl Lokaltäten: 11	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>a,H+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	602	482	11.4	7.64	3.95	
	Standardabweichung	159	144	1.0	0.23	1.27	
	Minimum	363	282	9.2	7.20	2.43	
	Maximum	853	723	13.2	8.00	6.15	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Alpenraum Süd Talfüllungen & Südalpin	Analysen Total	29	21	29	13	21	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> weniger häufig: Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl
	Anzahl Messwerte	29	21	29	13	21	
	Anzahl Lokaltäten: 12	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>a,H+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	254	207	12.3	6.62	1.88	
	Standardabweichung	185	157	1.1	0.52	1.69	
	Minimum	28	43	9.1	5.90	0.26	
	Maximum	553	467	14.8	7.30	4.98	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						
Alpenraum Ost Ob. Rheintal, Ostalpin & Penninikum	Analysen Total	20	14	20	10	14	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
	Anzahl Messwerte	20	14	20	10	14	
	Anzahl Lokaltäten: 7	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>a,H+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	548	472	9.9	7.42	4.72	
	Standardabweichung	129	104	1.5	0.15	1.09	
	Minimum	336	256	6.8	7.30	2.30	
	Maximum	726	604	12.5	7.80	5.99	
	Anzahl Analysen < BG					0	
	Bestimmungsgrenze BG						

Tab. 4-3: Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	DOC	
Tafeljura	Analysen Total	0	50	51	36	0	30	0	30	
	Anzahl Messwerte		50	6	24		30		23	
	Anzahl Lokalitäten: 26	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		7.0	0.009	0.004		52.1		0.30
		Minimum		1.9	0.007	0.004		29.6		0.29
		Maximum		2.5	0.003	0.001		14.7		0.00
		Bestimmungsgrenze BG		9.9	0.023	0.018		137.0		0.80
	Anzahl Analysen < BG		0	45	12		0		7	
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001					<0.5	
Faltenjura	Analysen Total	0	30	29	27	0	22	0	22	
	Anzahl Messwerte		30	3	16		22		18	
	Anzahl Lokalitäten: 12	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		6.8	0.007	0.013		14.8		0.82
		Minimum		2.3	0.007	0.017		9.5		0.28
		Maximum		2.3	0.001	0.001		4.6		0.50
		Bestimmungsgrenze BG		10.5	0.014	0.057		39.4		1.46
	Anzahl Analysen < BG		0	26	11		0		4	
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001					<0.5	
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	0	206	151	149	0	162	0	125	
	Anzahl Messwerte		206	27	87		162		124	
	Anzahl Lokalitäten: 79	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		7.7	0.002	0.009		15.4		0.5
		Minimum		1.8	0.003	0.013		10.1		0.2
		Maximum		1.6	0.000	0.001		1.8		0.2
		Bestimmungsgrenze BG		11.6	0.016	0.072		55.8		1.3
	Anzahl Analysen < BG		0	124	62		0		1	
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001					<0.2	
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	0	82	70	68	0	42	0	28	
	Anzahl Messwerte		82	14	43		42		28	
	Anzahl Lokalitäten: 35	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		6.6	0.005	0.005		20.9		0.5
		Minimum		2.3	0.009	0.005		9.4		0.2
		Maximum		0.5	0.000	0.001		7.0		0.2
		Bestimmungsgrenze BG		10.1	0.034	0.031		52.0		1.2
	Anzahl Analysen < BG		0	56	25		0		0	
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001						
Mittelland West Raum Genf (Lockergestein auf USM)	Analysen Total	0	9	9	9	0	9	0	0	
	Anzahl Messwerte		9	0	4		9			
	Anzahl Lokalitäten: 5	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		6.9	0.003	0.003		37.0		
		Minimum		1.3	0.001	0.001		16.7		
		Maximum		4.6	0.002	0.002		7.2		
		Bestimmungsgrenze BG		8.7	0.005	0.005		49.3		
	Anzahl Analysen < BG		0	9	5		0			
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001						
Mittelland Talfüllungen (Lockergestein, vgl. Fig 4-1 für Verbreitung)	Analysen Total	0	223	208	190	0	198	0	163	
	Anzahl Messwerte		223	26	118		198		145	
	Anzahl Lokalitäten: 102	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung		6.7	0.027	0.004		19.3		0.5
		Minimum		2.2	0.084	0.009		8.1		0.4
		Maximum		0.1	0.000	0.001		3.5		0.2
		Bestimmungsgrenze BG		11.4	0.313	0.086		50.0		3.4
	Anzahl Analysen < BG		0	182	72		0		18	
	Bestimmungsgrenze BG		<0.0002	<0.001						

Tab. 4-4: Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	DOC
<b>Alpennordrand Helvetikum &amp; Penninikum</b>	Analysen Total	0	56	54	53	0	47	0	12
	Anzahl Messwerte		56	6	45		47		12
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Anzahl Lokalitäten: 37	Durchschnitt	9.3	0.001	0.007		20.4		0.3
		Standardabweichung	1.6	0.000	0.009		29.9		0.1
		Minimum	5.0	0.000	0.001		1.0		0.2
		Maximum	11.7	0.002	0.038		184.0		0.6
		Anzahl Analysen < BG	0	48	8		0		0
	Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				
<b>Alpenraum West Ob. Rhonetal &amp; Penninikum</b>	Analysen Total	0	29	22	21	0	23	0	21
	Anzahl Messwerte		29	10	20		23		19
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Anzahl Lokalitäten: 11	Durchschnitt	3.6	0.022	0.021		94.2		0.3
		Standardabweichung	1.5	0.038	0.022		48.4		0.1
		Minimum	1.2	0.000	0.001		46.0		0.2
		Maximum	6.2	0.111	0.085		236.0		0.6
		Anzahl Analysen < BG	0	12	1		0		2
	Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.2
<b>Alpenraum Süd Talfüllungen &amp; Südalpin</b>	Analysen Total	0	13	22	20	0	21	0	13
	Anzahl Messwerte		13	8	16		21		12
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Anzahl Lokalitäten: 12	Durchschnitt	7.7	0.005	0.018		20.1		0.3
		Standardabweichung	0.5	0.007	0.022		20.5		0.1
		Minimum	7.1	0.000	0.001		3.9		0.2
		Maximum	8.4	0.020	0.085		97.1		0.4
		Anzahl Analysen < BG	0	14	4		0		1
	Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.2
<b>Alpenraum Ost Ob. Rheintal, Ostalpin &amp; Penninikum</b>	Analysen Total	0	18	14	14	0	18	0	14
	Anzahl Messwerte		18	0	8		18		12
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Anzahl Lokalitäten: 7	Durchschnitt	7.2		0.003		44.8		0.3
		Standardabweichung	2.1		0.002		8.5		0.1
		Minimum	2.9		0.001		31.3		0.1
		Maximum	10.0		0.007		60.9		0.4
		Anzahl Analysen < BG	0	14	6		0		2
	Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.2

Tab. 4-5: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1, BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
Tafeljura Anzahl Lokaltäten: 26	Analysen Total	23	49	56	51	48	49	6	51	47	49	45	49	47	49	47	22	43
	Anzahl Messwerte	22	47	55	14	41	44	6	42	46	31	28	26	47	49	47	11	35
	Durchschnitt	15.0	0.60	32.9	0.06	0.03	0.68	1.94	2.94	0.44	0.73	0.18	0.21	0.35	0.71	0.31	0.06	28
	Standardabweichung	7.1	0.39	16.6	0.09	0.02	0.67	2.11	2.49	0.21	0.48	0.09	0.20	0.11	0.31	0.13	0.02	53
	Minimum	4.0	0.16	10.0	0.01	0.01	0.05	0.37	0.30	0.06	0.10	0.06	0.06	0.19	0.30	0.09	0.04	2
Maximum	31.0	1.84	73.0	0.29	0.09	2.71	6.00	7.90	0.96	1.50	0.38	0.70	0.63	1.60	0.66	0.10	232	
Anzahl Analysen < BG	1	2	1	37	7	5	0	9	1	18	17	23	0	0	0	11	8	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<0.5	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04		<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06			<0.03	<1	
Faltenjura	Analysen Total	12	29	30	29	21	29	0	27	23	29	27	23	19	19	21	12	28
	Anzahl Messwerte	11	25	24	11	12	18	0	19	21	19	19	7	19	19	21	4	21
	Durchschnitt	11.0	0.55	20.6	0.05	0.02	0.32	0.32	3.3	0.30	0.98	0.37	0.08	0.25	0.47	0.29	0.09	45
	Standardabweichung	3.7	0.41	8.7	0.03	0.01	0.25	0.25	2.4	0.16	0.53	0.27	0.03	0.08	0.15	0.15	0.07	50
	Minimum	7.0	0.10	8.0	0.01	0.01	0.10	0.10	0.4	0.09	0.10	0.03	0.06	0.11	0.20	0.04	0.04	1
Maximum	20.0	1.33	42.0	0.08	0.03	1.03	1.03	8.3	0.64	2.10	0.91	0.14	0.36	0.70	0.68	0.19	157	
Anzahl Analysen < BG	1	4	6	18	9	11	11	8	2	10	8	16	0	0	0	8	7	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<0.5	<7	<0.01	<0.01	<0.5	<0.5		<0.5	<0.06	<0.5	<0.05	<0.06			<0.03	<1	
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	73	149	195	151	151	151	0	148	147	150	151	151	149	146	145	76	144
	Anzahl Messwerte	65	147	178	10	68	134	0	106	119	82	70	16	149	145	137	13	74
	Durchschnitt	10.6	0.33	18	0.07	0.03	0.29	0.29	1.3	0.35	0.7	0.25	0.09	0.22	1.1	0.26	0.06	14
	Standardabweichung	5.9	0.32	9	0.06	0.02	0.22	0.22	1.1	0.33	0.6	0.29	0.03	0.15	0.6	0.16	0.03	21
	Minimum	4.0	0.04	2	0.01	0.01	0.04	0.04	0.3	0.06	0.1	0.03	0.06	0.04	0.2	0.03	0.04	1
Maximum	29.0	2.51	48	0.18	0.10	1.42	1.42	6.5	2.32	4.3	1.46	0.17	0.80	3.4	0.70	0.14	91	
Anzahl Analysen < BG	8	2	17	141	83	17	17	42	28	68	81	135	0	1	8	63	70	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<0.2	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04		<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.02	<0.03	<1	
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	33	70	80	70	69	70	0	67	70	69	67	70	65	70	70	35	65
	Anzahl Messwerte	29	70	77	7	20	53	0	41	53	39	27	9	65	68	64	5	28
	Durchschnitt	7	0.27	19.4	0.03	0.04	0.69	0.69	1.13	0.28	0.48	0.19	0.09	0.26	1.13	0.22	0.08	13
	Standardabweichung	4	0.17	9.2	0.03	0.03	0.57	0.57	0.83	0.28	0.41	0.17	0.03	0.19	0.74	0.16	0.04	16
	Minimum	4	0.05	7.0	0.01	0.01	0.06	0.06	0.30	0.06	0.10	0.03	0.06	0.05	0.30	0.04	0.05	1
Maximum	21	0.91	43.0	0.08	0.13	2.13	2.13	3.80	1.38	1.50	0.65	0.16	0.78	3.80	0.79	0.15	61	
Anzahl Analysen < BG	4	0	3	63	49	17	17	26	17	30	40	61	0	2	6	30	37	
Bestimmungsgrenze BG	<4		<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04		<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.02	<0.03	<1	
Mittelland West Raum Genf (Lockergestein auf USM) Anzahl Lokaltäten: 5	Analysen Total	4	9	9	9	9	9	0	9	9	9	9	9	9	9	9	4	9
	Anzahl Messwerte	3	9	9	9	2	8	0	5	5	5	5	9	9	7	9	4	5
	Durchschnitt	6	0.25	22.6	0.03	0.03	0.29	0.29	1.5	0.40	1.4	0.09	0.09	0.25	1.4	0.12	0.06	6
	Standardabweichung	2	0.10	8.2	0.01	0.01	0.09	0.09	1.5	0.36	0.1	0.03	0.03	0.14	0.2	0.06	0.03	3
	Minimum	4	0.14	9.0	0.02	0.02	0.15	0.15	1.2	0.09	1.3	0.05	0.05	0.11	1.0	0.08	0.04	2
Maximum	7	0.40	33.0	<0.01	0.04	0.44	0.44	2.2	1.20	1.6	0.13	<0.06	0.42	1.7	0.23	0.10	9	
Anzahl Analysen < BG	1	4	0	0	7	1	1	4	4	4	4	0	0	2	0	0	4	
Bestimmungsgrenze BG	<4				<0.01	<0.04	<0.04		<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.02	<0.03	<1	

Tab. 4-6: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Lockergesteinen am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
<b>Mittelland Täufüllungen</b> (Lockergestein, vgl. Fig 4-1 für Verbreitung) Anzahl Lokaltäten: 102	Analysen Total	97	205	256	206	195	199	4	202	200	204	203	200	199	195	200	100	201
	Anzahl Messwerte	84	195	239	42	90	165	3	153	171	122	120	49	198	193	193	29	127
	Durchschnitt	12.4	0.38	21	0.08	0.03	0.40	0.22	1.6	0.38	0.58	0.29	0.11	0.24	0.93	0.24	0.07	33
	Standardabweichung	6.4	0.32	8	0.06	0.01	0.29	0.17	1.2	0.31	0.47	0.33	0.06	0.12	0.41	0.15	0.05	46
	Minimum	4.0	0.07	8	0.02	0.01	0.08	0.06	0.4	0.07	0.10	0.06	0.06	0.05	0.30	0.03	0.04	2
	Maximum	30.0	2.02	44	0.23	0.07	1.38	0.40	5.2	1.74	1.80	2.09	0.33	0.85	2.30	0.81	0.24	218
Anzahl Analysen < BG	13	10	17	164	105	34	1	49	29	82	83	151	1	2	7	71	74	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<7	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.3	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpennordrand Helvetikum &amp; Penninikum</b> Anzahl Lokaltäten: 37	Analysen Total	18	54	56	54	54	54	6	54	54	54	53	54	54	54	54	37	54
	Anzahl Messwerte	18	54	49	8	12	37	6	18.0	48	21	17	3	54	23	27	2	21
	Durchschnitt	14.3	0.48	13.7	0.03	0.03	0.18	0.18	0.9	0.39	0.79	0.15	0.07	0.28	0.91	0.09	0.11	15
	Standardabweichung	9.1	1.51	5.5	0.03	0.03	0.09	0.12	0.3	0.53	0.55	0.13	0.01	0.17	0.79	0.07	0.06	23
	Minimum	4.0	0.02	7.0	0.01	0.01	0.06	0.07	0.4	0.06	0.10	0.02	0.06	0.05	0.20	0.02	0.06	1
	Maximum	34.0	9.05	32.0	0.08	0.13	0.38	0.39	1.4	2.77	2.20	2.42	0.08	0.87	2.70	0.27	0.15	92
Anzahl Analysen < BG	0	0	7	46	42	17	0	36	6	33	36	51	0	31	27	35	33	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<7	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.3	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpenraum West Ob. Rhonetal &amp; Penninikum</b> Anzahl Lokaltäten: 11	Analysen Total	11	22	32	22	22	22	0	22	22	22	22	22	22	22	22	11	22
	Anzahl Messwerte	11	22	32	3	10	13	0	16	22	19	6	2	21	22	22	9	1
	Durchschnitt	5.9	0.27	21.0	0.013	0.04	0.2	0.2	0.8	1.54	0.9	0.08	0.07	0.5	4.3	0.04	0.12	12
	Standardabweichung	1.3	0.19	13.0	0.006	0.03	0.2	0.2	0.5	1.62	0.6	0.04	0.01	0.3	4.3	0.03	0.13	13
	Minimum	4.0	0.08	6.0	0.010	0.01	0.0	0.0	0.3	0.37	0.1	0.04	0.06	0.1	1.0	0.02	0.2	2
	Maximum	8.0	0.84	49.0	0.020	0.1	0.5	0.9	2.0	7.11	2.2	0.16	0.07	1.1	17.6	0.12	5.8	4
Anzahl Analysen < BG	0	0	0	19	12	9	0	6	0	3	16	20	1	0	13	10	4	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<7	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.3	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpenraum Süd Täufüllungen &amp; Südalpin</b> Anzahl Lokaltäten: 12	Analysen Total	11	22	29	22	22	22	0	20	22	22	22	22	22	22	21	11	22
	Anzahl Messwerte	7	22	17	6	6	13	0	12	22	13	10	3	21	15	21	5	10
	Durchschnitt	21.7	0.55	13.3	0.02	0.04	0.3	0.8	0.92	0.6	0.21	0.13	0.13	0.3	1.1	0.26	0.06	12
	Standardabweichung	15.4	0.39	8.6	0.03	0.02	0.2	0.7	0.68	0.4	0.24	0.05	0.2	0.8	0.13	0.03	0.03	10
	Minimum	7.0	0.13	2.0	0.01	0.02	0.1	0.3	0.25	0.1	0.04	0.08	0.1	0.3	0.07	0.04	0.2	2
	Maximum	47.0	1.35	28.0	0.08	0.06	0.7	2.3	3.00	1.7	0.80	1.7	0.17	0.7	2.7	0.49	0.11	29
Anzahl Analysen < BG	4	0	12	16	16	9	8	0	8	0	9	12	19	1	7	0	12	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<7	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.3	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpenraum Ost Ob. Rheintal, Ostalpin &amp; Penninikum</b> Anzahl Lokaltäten: 7	Analysen Total	7	14	20	14	14	14	4	14	14	14	14	14	14	14	14	7	14
	Anzahl Messwerte	4	14	18	2	1	14	4	6	14	10	5	10	14	14	2	2	7
	Durchschnitt	12.0	0.37	16	0.02	0.02	0.36	0.37	0.7	0.78	1.0	0.06	0.10	0.76	2.1	0.15	0.05	11
	Standardabweichung	5.4	0.18	8	0.00	0.11	0.22	0.19	0.5	0.36	0.4	0.04	0.03	0.36	0.4	0.00	0.01	16
	Minimum	6.0	0.13	6	0.02	0.05	0.24	0.3	0.31	0.3	0.3	0.02	0.06	0.27	1.4	0.15	0.04	1
	Maximum	17.0	0.71	33	0.02	0.11	0.76	0.65	1.6	1.36	1.5	0.11	0.13	1.29	2.7	0.15	0.06	39
Anzahl Analysen < BG	3	0	2	12	13	0	0	8	0	4	9	4	0	0	12	5	7	
Bestimmungsgrenze BG	<4	<7	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.3	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1

### 4.3 Grundwasser im Festgestein

Grundwasser in den oberflächennahen Festgestein-Grundwasserleitern wird durch Infiltration aus Niederschlag, Flusswasser und/oder unterirdischen Zuflüssen aus anderen Grundwasserleitern gespeisen. Für die generelle chemische Charakterisierung von Grundwasser in Festgesteinen stehen zwei ausführliche Datensets zur Verfügung. Einerseits sind dies die Daten von 2018/19 aus den NAQUA-Modulen TREND und SPEZ, welche in Wanner et al. (2023) detailliert beschrieben sind. Andererseits sind das Daten, welche vor allem im Zeitraum von 1980 bis 2010 erhoben wurden und in den Datenbanken des AQUITYP-Projekts (Parriaux et al. 1990, Kilchmann 2001) und der Nagra (vgl. Waber & Traber 2022 und dortige Referenzen) abgelegt sind, und mit Daten aus RWI-Projekten am Institut für Geologie, Uni Bern, ergänzt wurden.

Für die NAQUA-Daten existiert keine detaillierte geologische Beschreibung des Festgesteins, in welchem sich die Grundwässer entwickeln. Diese Daten sind deshalb entsprechend der vereinfachten geo-tektonischen Einteilung von Fig. 4-1 eingeteilt. Für die älteren Daten liegt eine detaillierte Beschreibung der Geologie vor, so dass diese neben den geo-tektonischen Grossräumen von Fig. 3-1 auch noch nach der jeweilig entsprechenden Aquifer-Geologie (d.h. der hydrogeologischen Einheit, vgl. Abschnitt 5.1.1) unterteilt sind. Das ergibt insbesondere für die Molasse-Einheiten im Mittelland eine grössere Auflösung. Auch wenn die Grundwasserproben nicht von den gleichen Stellen stammen, können doch gewisse allgemeine Vergleiche gemacht werden.

#### 4.3.1 Generelle chemische Charakterisierung

Entsprechend der NAQUA-Daten sind die für die Trinkwasserversorgung genutzten Grundwässer in Festgestein-Grundwasserleitern Süsswässer mit einer Mineralisation von  $< 1$  g/L (Tab. 4-7). Die durchschnittliche Mineralisation dieser Grundwässer liegt im Alpenen Vorland (Tafeljura), Juragebirge und dem Mittelland in einem Bereich von rund 365–590 mg/L, ähnlich wie in den Lockergestein-Grundwässern dieser Regionen. Festgestein-Grundwasser vom Alpennordrand (Karbonat- und Evaporitgestein) ist mit rund 260–330 mg/L durchschnittlich leicht geringer mineralisiert. Die deutlich geringste Mineralisation weisen Festgestein-Grundwässer in kristallinen Gesteinen des Alpenraums auf ( $110 \pm 61$  mg/L, Tab. 4-7).

Aufgrund der älteren Daten, welche genutzte und ungenutzte Grundwasservorkommen beinhalten, ergibt sich je nach hydrogeologischer Einheit ein etwas anderes Bild (Tab. 4-11). Im Tafeljura, Faltenjura und dem Mittelland sind ebenfalls Süsswässer mit einer ähnlichen durchschnittlichen Mineralisation von rund 420–540 mg/L vorhanden, wie bei den NAQUA-Messstellen. Besonders Grundwässer aus der USM im westlichen Mittelland weisen aber eine grössere Streuung mit einer Mineralisation von bis zu  $> 1'300$  mg/L auf. Deutlich höhere durchschnittliche Mineralisationen von rund  $1'150$ – $2'570$  mg/L – und demzufolge schwach mineralisierte Grundwässer – weisen Festgestein-Grundwässer aus den Lithologien des Keupers und Muschelkalks im Tafeljura und Faltenjura auf. Diese Grundwässer werden zumindest teilweise auch für die lokale Trinkwasserversorgung genutzt. Ähnlich hohe Mineralisationen finden sich in den Evaporitgesteinen der Trias des Helvetikums und Penninikums am Alpennordrand und der triadischen (Meta-)Sedimente im Penninikum und Ostalpin des Alpenraums (Tab. 4-11). Festgestein-Grundwässer in kalkigen Lithologien am Alpennordrand sind demgegenüber wieder Süsswässer mit ähnlich geringer Mineralisation wie in den gleichen Lithologien im Faltenjura (Tab. 4-11). Sehr gering mineralisierte Süsswässer mit durchschnittlich nur gerade rund 60 mg/L sind die oberflächennahen Festgestein-Grundwässer aus Kristallingesteinen (Granite, Gneise) des Aiguilles-Rouges- und Mont-Blanc-Massivs im Alpenraum.

Der chemische Typ der Festgestein-Grundwässer reflektiert die Gesteinsmineralogie, in welcher das Grundwasser zirkuliert. Sowohl in den NAQUA-Daten als auch in den älteren Daten ist Festgestein-Grundwasser in kalkigen Lithologien des Tafeljuras, Faltenjuras, der Molasse-Einheiten

im Mittelland und des Alpennordrands mehrheitlich vom chemischen Ca-HCO<sub>3</sub>- und Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typ (Tab. 4-7 und Tab. 4-11). Sobald das Grundwasser evaporitische Gesteine aus der Trias antrifft, wird Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ein wichtiges oder das dominierende Anion und die Grundwässer sind von den generellen chemischen Typen Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> oder Ca-SO<sub>4</sub> (Tab. 4-7 und Tab. 4-11). Solche Festgestein-Grundwässer finden sich in den Sedimenten der Trias (Keuper, Muschelkalk) in allen geo-tektonischen Grossräumen, in denen ebensolche Sedimente vorkommen (Tab. 4-11, vgl. Kapitel 3).

Wie für den chemischen Typ ergibt sich auch für den pH-Wert und die totale Alkalinität eine Abhängigkeit von der Lithologie, welche in beiden Datensätzen in etwa gleich ist (vgl. Tab. 4-7 und Tab. 4-11). In den Festgestein-Grundwässern in kalkigen Lithologien des Tafeljuras, des Faltenjuras, der Molasse-Einheiten des Mittellands und des Alpennordrands ist der pH-Wert durch Karbonatlösung kontrolliert und variiert für die meisten Grundwässer in einem Bereich von 7–7.7. Vereinzelt alkalischere pH-Werte dürften eher Problemen bei der Beprobung zuzuschreiben sein (Entgasung von CO<sub>2</sub>) als dem natürlichen Wert. Solche Grundwässer weisen auch erhöhte totale Alkalinitäten von durchschnittlich rund 4.2–5.8 meq/L auf. Tendenziell tiefere pH-Werte (ca. 6.7–7) und totale Alkalinitäten (ca. 3–5 meq/L) finden sich in den evaporitischen Sedimenten der Trias in allen geo-tektonischen Grossräumen (Tab. 4-11). Die rein in Kristallingestein zirkulierenden Festgestein-Grundwässer im Alpenraum weisen sich durch leicht saure bis leicht alkalische pH-Werte aus, verbunden mit einer charakteristisch geringen totalen Alkalinität von <1 meq/L und damit einer geringen Pufferkapazität (Tab. 4-11).

Die Temperatur von Festgestein-Grundwasser in den Jahren 2018/19 ist durchschnittlich rund 2–4°C tiefer als in den Lockergestein-Grundwässern derselben Jahre (vgl. Tab. 4-7 mit Tab. 4-1, Tab. 4-2). Sie liegt bei rund 9–10°C im Tafeljura, Faltenjura und im Mittelland und bei rund 7.5–8.5°C in Festgestein-Grundwasser des Alpennordrands und des Alpenraums. Die gegenüber den Lockergestein-Grundwässern tiefere Temperatur dürfte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Höhenlage auch auf die in den Festgestein-Grundwässern stattfindende Homogenisierung der saisonalen Schwankungen zuzuschreiben sein. Interessanterweise hatten vor 2010 die Festgestein-Grundwässer aus allen geo-tektonischen Räumen eine um durchschnittlich ca. 0.5–2.5°C tiefere Temperatur als in 2018/19 (vgl. Tab. 4-7 und Tab. 4-11). Diese momentane Beobachtung der Temperaturzunahme in den Festgestein-Grundwässern zwischen vor-2010 und 2018/19 stimmt mit den Langzeitbeobachtungen an Oberflächenwässern und Grundwässern innerhalb der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA überein (BAFU 2021, 2023) und ist auf die generelle Klimaerwärmung zurückzuführen.

### 4.3.2 Redox-Bedingungen

Bezüglich der Redox-Bedingungen in Grundwässern in Festgestein-Grundwasserleitern beinhaltet der NAQUA-Datensatz Messungen von gelöstem Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und einigen redox-aktiven gelösten Substanzen (Tab. 4-8). Der Datensatz mit den vor 2010 beprobten Grundwässern beinhaltet zusätzlich zu diesen und anderen Parametern vor Ort Messungen des Redoxpotentials (Tab. 4-12).

Die gemessenen Redoxpotentiale weisen für die Grundwässer in allen geo-tektonischen Grossräumen mit zwei Ausnahmen auf moderat bis stark oxidierende Verhältnisse hin (Tab. 4-12). Die beiden Ausnahmen mit reduzierenden Redoxpotentialen sind an die Oberfläche aufstossende Thermalwässer im Muschelkalk des Faltenjuras und Tafeljuras (Lostorf, Kaisten).

Die oxidierenden Redoxpotentiale sind in Übereinstimmung mit den vorhandenen Konzentrationen von gelöstem Sauerstoff. Tendenziell scheinen zumindest in den Daten von vor 2010 die gelösten O<sub>2</sub>-Gehalte in den Festgestein-Grundwässern aus den evaporitischen Lithologien der Trias sowohl im Tafeljura und Faltenjura, dem Alpennordrand und den Sedimenten der USM im

Mittelland geringer zu sein, als in allen anderen Festgestein-Grundwässern. Aufgrund der temperaturabhängigen Löslichkeit von Sauerstoff weisen die wärmeren Festgestein-Grundwässer aus den Jahren 2018/19 in den jeweiligen geo-tektonischen Grossräumen einen durchschnittlich geringeren Gehalt an gelöstem  $O_2$  auf als vor 2010 (vgl. Tab. 4-8 und Tab. 4-12).

Entsprechend dem oxidierenden Redox-Milieu sind sowohl im NAQUA-Datensatz als auch in den älteren Analysen die Konzentrationen von gelöstem Eisen (Fe) und Mangan (Mn) gering und liegen meist unterhalb 0.02 mg/L bzw. unterhalb 0.01 mg/L, was in etwa der Löslichkeitskontrolle durch mineralische Fe- und Mn-Hydroxide entspricht. Ausnahmen hiervon bilden einzig die Fe-Gehalte in Festgestein-Grundwässern von vor 2010 aus dem Malm, Keuper und Muschelkalk des Faltenjuras und dem Keuper des Tafeljuras, wo zwar generell weniger oxidierende Redoxpotentiale angezeigt sind, aber auch eine gewisse Kontamination mit kolloidalem Eisen nicht ausgeschlossen werden kann (Tab. 4-12).

Gelöstes Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) ist die einzige Schwefelspezies. Reduzierte Schwefelspezies sind nicht vorhanden (Tab. 4-8 und Tab. 4-12) mit Ausnahme der beiden obgenannten, aufstossenden Thermalwässer. Die Konzentration von gelöstem  $SO_4^{2-}$  zeigt dabei in Abhängigkeit von der Gesteinsmineralogie gewisse regionale Unterschiede. In beiden Datensätzen weisen Festgestein-Grundwässer in Karbonat-dominierten Gesteinen des Faltenjuras, des Mittellands, des Alpennordrands und in den Kristallingesteinen des Alpenraums durchschnittliche  $SO_4$ -Konzentrationen von  $< 20$  mg/L auf. Demgegenüber liegen die durchschnittlichen  $SO_4$ -Konzentrationen von Festgestein-Grundwasser in Evaporitgesteinen der Trias im Tafeljura, Faltenjura, Alpennordrand (Helvetikum und Penninikum) und im Alpenraum (Penninikum, Ost- und Südalpin) mit rund 170–1'600 mg/L deutlich höher. In den Molasse-Einheiten zeichnet sich eine Zunahme der  $SO_4$ -Konzentrationen von Festgestein-Grundwasser in der OSM und OMM von durchschnittlich  $< 25$  mg/L zu durchschnittlich  $> 70$  mg/L in der USM ab (Tab. 4-12). In den NAQUA-Daten vom Tafeljura dürfte die grosse Schwankung in den  $SO_4$ -Konzentrationen (8–270 mg/L) auch auf den Einfluss der dort bis an die Oberfläche vorkommenden Evaporitgesteinen der Trias (vgl. Abschnitt 3.1) und damit verbundener Lösung von Sulfatmineralen (Gips, Anhydrit) zurückzuführen sein.

Daten über gelösten Stickstoff liegen vom Datensatz mit den vor 2010 beprobten Grundwässern vor. In diesen oberflächennahen Grundwässern ist Nitrat ( $NO_3^-$ ) die dominierende Stickstoff-Spezies (Tab. 4-12). Die durchschnittlichen  $NO_3$ -Konzentrationen sind im Tafeljura und dem Mittelland gegenüber den Einzugsgebieten im Faltenjura, am Alpennordrand und im Alpenraum erhöht (Tab. 4-12). Spuren von gelöstem Nitrit ( $NO_2^-$ ) von bis zu 0.02 mg/L sind nur sporadisch in wenigen Festgestein-Grundwässern in Evaporitgesteinen der Trias im Tafeljura und Faltenjura vorhanden. Geringe Konzentrationen von Ammonium ( $NH_4^+$ ) von mehrheitlich  $< 0.1$  mg/L sind für Festgestein-Grundwasser aus allen geo-tektonischen Grossräumen mit Ausnahme derjenigen am Alpennordrand und in den Sedimentgesteinen im Alpenraum dokumentiert (Tab. 4-12). Vereinzelt wurden lokal aber auch stark erhöhte  $NH_4$ -Konzentrationen von wenigen mg/L beobachtet, welche eher einer Kontamination durch die Entnahmeart (Bohrung), als dem natürlichen Eintrag zuzuschreiben sind.

Die durchschnittlichen Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) sind in Festgestein-Grundwasser aus allen geo-tektonischen Grossräumen gegenüber den entsprechenden Lockergestein-Grundwässern erhöht und liegen mehrheitlich zwischen rund 0.5–1 mg/L (Tab. 4-8 und Tab. 4-12). Analysen für gelösten Phosphor liegen nur für die vor 2010 entnommenen Grundwässer vor. Die P-Gehalte in Festgestein-Grundwasser variieren relativ stark zwischen durchschnittlich 0.002–0.055 mg/L ohne direkten Zusammenhang zu den verschiedenen geo-tektonischen Grossräumen (Tab. 4-8 und Tab. 4-12).

### 4.3.3 Metallische Spurenelemente

Die Gehalte von metallischen Spurenelementen in den Festgestein-Grundwässern der Jahre 2018/19 und deren Herkunft sind in Wanner et al. (2023) ausführlich beschrieben. Analysen von Spurenelementen in Festgestein-Grundwasser liegen zu einem grossen Teil aus dem AQUITYP-Projekt vor, in welchem diese mit hochauflösender ICP-MS bestimmt wurden und sehr präzise sind (Kilchmann et al. 2004).

In oberflächennahen Festgestein-Grundwässern liegen die Konzentrationen der meisten Spurenelemente im Bereich von wenigen Mikrogramm/L ( $\mu\text{g/L}$ ) oder darunter. Erwähnenswert sind die gegenüber den anderen geo-tektonischen Grossräumen mehrheitlich erhöhten mittleren Konzentrationen von (vgl. Tab. 4-9, Tab. 4-10 und Tab. 4-13):

- Arsen (As), welches in den oxidierenden Grundwässern vorwiegend als gelöstes, fünfwertiges Arsenat ( $\text{AsO}_4^{-3}$ ) vorliegt, im Tafeljura und dem Alpenraum. Die nach hydrogeologischen Einheiten aufteilbaren Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass erhöhte As-Gehalte im Tafeljura und im Alpenraum v.a. auf die Evaporit-führenden Gesteine der Trias zurückzuführen sind. Im Alpenraum sind zudem stark erhöhte As-Gehalte in den unterpenninischen, oberpenninischen und ostalpinen mesozoischen Sedimenten (vgl. Abschnitte 3.5.2 und 3.5.3) und v.a. in den Kristallingesteinen vorhanden. Diese erhöhten As-Gehalte sind v.a. auf leicht oxidierbare As-führende Sulfidmineralen in diesen Gesteinen zurückzuführen.
- Chrom (Cr), welches in den oxidierenden Grundwässern vorwiegend als gelöstes, sechswertiges  $\text{Cr}^{\text{VI}}$ , vorwiegend als Chromat ( $\text{CrO}_4^{-2}$ ) vorliegt, im westlichen Mittelland. Die Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass stark erhöhte Cr-Gehalte im westlichen Mittelland v.a. in Grundwässern der Oberen Meeresmolasse (OMM) und weniger ausgeprägt in der Unteren Süsswassermolasse (USM) anzutreffen sind. Diese Gehalte reflektieren den in diesen Sedimenten enthaltenen Detritus von mafischen Gesteinen der unterpenninischen und oberpenninischen mesozoischen Sediment- und Kristallin-Decken im westlichen Alpenraum (vgl. Abschnitte 3.5.2).
- Kupfer (Cu) im Tafeljura, westlichen Mittelland und am Alpennordrand. Die Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass erhöhte Cu-Gehalte im Tafeljura v.a. auf die Evaporitgesteine der Trias (Keuper, Muschelkalk) zurückzuführen sind. Im westlichen Mittelland sind stark erhöhte Cu-Gehalte v.a. in Festgestein-Grundwässern der Oberen und Unteren Süsswassermolasse (OSM, USM) anzutreffen und dürften auf den dort enthaltenen Detritus von mafischen Gesteinen im westlichen Alpenraum zurückzuführen sein.
- Molybdän (Mo) im Alpenraum und (weniger ausgeprägt) in den Evaporitgesteinen am Alpennordrand. Die Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass erhöhte Mo-Gehalte im Alpenraum den Festgestein-Grundwässern in Kristallingestein zuzuordnen sind. Zudem weisen Festgestein-Grundwässer in der Oberen und Unteren Süsswassermolasse (OSM, USM) des Mittellands gegenüber dem Durchschnitt häufig erhöhte Mo-Gehalte auf.
- Nickel (Ni) im Faltenjura, im westlichen Mittelland, am Alpennordrand und im Alpenraum. Für diese Regionen weisen die Daten von vor 2010 darauf hin, dass die erhöhten Ni-Gehalte vor allem den Evaporitgesteinen der Trias (Keuper, Muschelkalk) zuzuordnen sind. In der Oberen Meeresmolasse (OMM) und Unteren Süsswassermolasse (USM) des westlichen Mittellands dürften die erhöhten Ni-Gehalte auch auf den in diesen Sedimenten enthaltenen Detritus von mafischen Gesteinen der unterpenninischen und oberpenninischen Sediment- und Kristallin-Decken im Alpenraum zurückzuführen sein.
- Zink (Zn) am Alpennordrand, im Alpenraum, im Tafeljura und Faltenjura. Die Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass erhöhte Zn-Gehalte in all diesen Regionen einerseits den Evaporitgesteinen der Trias (Keuper, Muschelkalk) und andererseits metamorphen Gesteinen mit

Zn-Sulfidmineralen zuzuordnen sind. Etwas erhöhte Zn-Gehalte finden sich auch in Festgestein-Grundwässern der Oberen Meeresmolasse (OMM) und der Unteren Süßwassermolasse (USM) im Mittelland.

- Uran (U) vorwiegend im Alpenraum und weniger ausgeprägt in den Molasse-Einheiten im Mittelland und am Alpennordrand. Die Daten von vor 2010 weisen darauf hin, dass erhöhte U-Gehalte im Alpenraum und am Alpennordrand einerseits den Evaporitgesteinen des Keupers und andererseits den mesozoischen Metasedimenten im Penninikum und Ostalpin sowie den Kristallingesteinen zuzuordnen ist.

Tab. 4-7: Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, Mittelland, Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ	
Tafeljura	Analysen Total	28	24	30	20	24	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	28	24	30	20	24		
	Anzahl Lokalitäten: 18	Durchschnitt	679	587	10.5	7.39		5.79
	Standardabweichung	144	133	1.3	0.28	0.95		
	Minimum	500	381	6.6	7.00	3.81		
	Maximum	871	845	12.8	7.80	7.15		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Faltenjura	Analysen Total	66	35	67	38	35	Ca-HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	66	35	67	38	35		
	Anzahl Lokalitäten: 36	Durchschnitt	432	365	9.3	7.48		4.22
	Standardabweichung	89	78	1.6	0.22	0.84		
	Minimum	295	249	6.1	7.10	2.92		
	Maximum	641	553	13.4	8.00	5.92		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	23	25	28	11	25	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> weniger häufig: Ca-HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	23	25	28	11	2		
	Anzahl Lokalitäten: 26	Durchschnitt	525	474	10.0	7.74		5.41
	Standardabweichung	155	116	1.3	0.39	1.15		
	Minimum	224	150	7.1	7.30	2.05		
	Maximum	814	682	12.1	8.50	7.01		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	37	34	39	21	34	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	37	34	39	21	34		
	Anzahl Lokalitäten: 25	Durchschnitt	476	457	10.0	7.57		4.99
	Standardabweichung	127	115	1.1	0.26	1.17		
	Minimum	118	222	8.0	7.20	2.42		
	Maximum	700	691	12.2	8.20	6.90		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum Karbonatgesteine	Analysen Total	66	57	69	39	59	Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> weniger häufig: Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	
	Anzahl Messwerte	66	57	69	39	59		
	Anzahl Lokalitäten: 35	Durchschnitt	310	262	7.6	7.86		2.92
	Standardabweichung	76	65	2.0	0.40	0.64		
	Minimum	189	155	4.0	7.40	1.78		
	Maximum	540	455	12.6	8.90	4.61		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum Evaporitgesteine	Analysen Total	15	14	16	4	15	Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-SO <sub>4</sub> _HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	15	14	16	4	15		
	Anzahl Lokalitäten: 13	Durchschnitt	594	327	8.3	7.55		3.08
	Standardabweichung	168	71	1.8	0.25	0.91		
	Minimum	291	175	5.1	7.20	1.92		
	Maximum	914	483	12.1	7.80	4.54		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0
Alpenraum	Analysen Total	61	59	62	27	60	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-HCO <sub>3</sub> Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	
	Anzahl Messwerte	61	59	62	27	60		
	Anzahl Lokalitäten: 35	Durchschnitt	144	110	7.5	7.57		0.98
	Standardabweichung	78	61	3.1	0.53	0.68		
	Minimum	23	16	4.3	6.40	0.12		
	Maximum	320	274	16.9	8.50	3.32		
	Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG							0

Tab. 4-8: Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, Mittelland, Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	DOC
Tafeljura	Analysen Total	0	29	31	28	0	37	0	19
	Anzahl Messwerte		29	5	22		37		15
	Anzahl Lokalitäten: 18	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		9.4	0.0059	0.003		57.9		0.61
	Standardabweichung		1.1	0.0090	0.002		55.0		0.40
	Minimum		6.8	0.0004	0.001		7.7		0.00
	Maximum		10.6	0.0217	0.010		270.0		1.80
Analysen < BG		0	26	6		0		4	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.5	
Faltenjura	Analysen Total	0	66	65	61	0	66	0	40
	Anzahl Messwerte		66	15	51		61		36
	Anzahl Lokalitäten: 36	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		9.4	0.0013	0.009		8.7		1.05
	Standardabweichung		1.5	0.0022	0.009		7.3		0.58
	Minimum		3.1	0.0003	0.001		3.2		0.30
	Maximum		11.0	0.0089	0.036		41.3		3.40
Analysen < BG		0	50	10		5		4	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001		<2.5		<0.5	
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	0	27	29	29	0	30	0	17
	Anzahl Messwerte		27	8	22		29		17
	Anzahl Lokalitäten: 26	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		9.6	0.0009	0.007		10.8		0.4
	Standardabweichung		1.0	0.0008	0.007		10.2		0.2
	Minimum		6.8	0.0004	0.001		1.0		0.3
	Maximum		11.5	0.0028	0.033		38.6		0.8
Analysen < BG		0	21	7		1		0	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001		<3			
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	0	37	34	31	0	40	0	21
	Anzahl Messwerte		37	5	13		40		18
	Anzahl Lokalitäten: 25	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		8.8	0.0038	0.003		13.9		0.4
	Standardabweichung		1.4	0.0018	0.002		7.3		0.2
	Minimum		4.8	0.0009	0.001		3.4		0.2
	Maximum		10.7	0.0053	0.006		32.5		0.7
Analysen < BG		0	29	18		0		3	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.5	
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum Karbonatgesteine	Analysen Total	0	69	56	50	0	69	0	18
	Anzahl Messwerte		69	14	45		69		17
	Anzahl Lokalitäten: 35	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		9.5	0.0035	0.033		16.2		0.5
	Standardabweichung		1.7	0.0066	0.129		15.5		0.2
	Minimum		4.7	0.0002	0.001		1.0		0.2
	Maximum		11.7	0.0197	0.810		66.0		1.0
Analysen < BG		0	42	5		0		1	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.2	
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum Evaporitgesteine	Analysen Total	0	16	15	11	0	16	0	6
	Anzahl Messwerte		16	1	11		16		4
	Anzahl Lokalitäten: 13	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		8.4		0.006		173.3		0.3
	Standardabweichung		2.0		0.010		100.5		0.0
	Minimum		3.9		0.001		54.0		0.2
	Maximum		11.0	0.0014	0.035		371.0		0.3
Analysen < BG		0	14	0		0		2	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002					<0.2	
Alpenraum	Analysen Total	0	43	40	37	0	60	0	44
	Anzahl Messwerte		43	8	33		60		41
	Anzahl Lokalitäten: 35	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt		9.7	0.0023	0.004		17.6		0.4
	Standardabweichung		1.6	0.0009	0.005		11.2		0.2
	Minimum		5.5	0.0012	0.001		2.4		0.2
	Maximum		13.1	0.0041	0.020		43.9		1.4
Analysen < BG		0	32	4		0		3	
Bestimmungsgrenze BG			<0.0002	<0.001				<0.2	

Tab. 4-9: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in oberflächennahem Grundwasser in Festgestein im Tafeljura, Faltenjura, und Mittelland, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
Tafeljura	Analysen Total	11	35	35	33	32	28	0	34	30	30	34	35	30	35	34	14	33
	Anzahl Messwerte	11	35	27	4	15	24		23	19	14	18	5	30	34	34	9	12
	Durchschnitt	µg/L	13.2	0.65	14.9	0.05	0.03	0.20		1.70	0.41	1.20	0.15	0.07	0.22	0.52	0.05	3.0
	Standardabweichung		5.1	0.45	8.2	0.04	0.03	0.13		1.42	0.36	0.48	0.17	0.01	0.32	0.01	0.01	1.3
	Minimum		7.0	0.14	7.0	0.02	0.01	0.07		0.30	0.08	0.80	0.03	0.06	0.20	0.06	0.04	2.0
Faltenjura	Analysen Total	27	65	67	61	61	61	0	59	65	63	61	67	65	67	67	34	59
	Anzahl Messwerte	27	60	39	8	10	35		26	47	31	19	2	52	60	65	10	10
	Durchschnitt	µg/L	13.4	0.24	9.4	0.02	0.02	0.21		0.6	0.21	0.67	0.08	0.08	0.20	0.43	0.34	0.05
	Standardabweichung		5.4	0.18	4.1	0.01	0.00	0.09		0.2	0.19	0.48	0.06	0.02	0.07	0.26	0.13	0.01
	Minimum		6.0	0.10	2.0	0.01	0.01	0.10		0.3	0.08	0.10	0.02	0.06	0.10	0.20	0.06	0.03
Mittelland Ost (v.a. OSM)	Analysen Total	4	26	27	29	29	29	3	29	29	29	29	29	29	29	29	7	28
	Anzahl Messwerte	4	25	24	28	7	27	3	4	21	21	5	1	29	27	19	0	4
	Durchschnitt	µg/L	21.3	0.22	15	0.02	0.02	0.32		0.5	0.33	0.9	0.14	0.21	0.9	0.45		2.0
	Standardabweichung		4.8	0.10	5	0.01	0.01	0.18		0.2	0.33	0.5	0.13	0.18	0.7	0.29		0.0
	Minimum		16.0	0.10	9	0.01	0.01	0.09		0.3	0.11	0.1	0.06	0.07	0.2	0.16		2.0
Mittelland West (v.a. OMM, USM)	Analysen Total	7	34	38	34	33	34	2	33	33	34	33	33	33	33	33	10	33
	Anzahl Messwerte	7	33	25	36	7	26	2	2	19	18	5	35	30	27	32	3	4
	Durchschnitt	µg/L	11	0.28	12.8	0.03	0.03	3.35		1.00	0.19	0.62	0.05	0.12	1.05	0.77		0.05
	Standardabweichung		5	0.24	5.1	0.02	0.02	1.36		0.71	0.18	0.61	0.02	0.07	1.19	0.63		1.8
	Minimum		5	0.07	8.0	0.01	0.01	1.80		0.50	0.06	0.10	0.02	0.05	0.20	0.16		0.04

Tab. 4-10: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in oberflächennahem Grundwasser in Festgestein am Alpennordrand und im Alpenraum, Daten 2018/19.

Datenbasis: NAQUA Module TREND & SPEZ. Die Farben der einzelnen Regionen entsprechen in etwa den geo-tektonischen Grossräumen in Fig. 4-1. BG: Bestimmungsgrenze.

Region	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
<b>Alpennordrand</b> Helvetikum & Penninikum Karbonatgesteine Anzahl Lokalitäten: 35	Analysen Total	15	66	69	50	48	49	6	66	56	56	63	66	56	66	64	48	65
	Anzahl Messwerte	15	64	60	3	20	34	6	14.0	36	22	13	3	56	11	41	4	8
	Durchschnitt	21.5	0.20	12.4	0.03	0.02	0.15	0.12	1.0	0.39	0.61	0.08	0.10	0.24	0.81	0.07	0.11	2.0
	Standardabweichung	9.6	0.24	6.6	0.00	0.01	0.06	0.06	0.6	0.28	0.50	0.07	0.05	0.17	0.86	0.04	0.05	0.9
	Minimum	6.0	0.05	3.0	0.03	0.01	0.06	0.05	0.3	0.11	0.10	0.03	0.06	0.07	0.30	0.03	0.05	1.0
Maximum	34.0	1.49	27.0	0.03	0.05	0.40	0.19	1.9	1.03	1.40	0.29	0.15	0.77	2.50	0.20	0.15	4.0	
Analysen < BG	0	2	9	47	28	15	0	52	20	34	50	63	0	55	23	44	57	
Bestimmungsgrenze BG			<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	0	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.09	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpennordrand</b> Helvetikum & Penninikum Evaporitgesteine Anzahl Lokalitäten: 13	Analysen Total	1	15	16	11	11	11	1	15	14	15	15	15	15	15	15	10	15
	Anzahl Messwerte	1	15	14	1	3	4	1	3.0	14	5	3	1	15	13	9	10	1
	Durchschnitt		0.17	28.1	0.04	0.19	0.03	0.17	0.4	0.78	0.62	0.04	0.27	0.66	0.66	0.08		
	Standardabweichung		0.14	19.4	0.03	0.07	0.02	0.07	0.0	0.48	0.57	0.01	0.10	0.48	0.30	0.04		
	Minimum	18.0	0.04	9.0	0.11	0.02	0.07	0.4	0.4	0.17	0.10	0.04	0.10	0.07	0.30	0.03		3.0
Maximum	18.0	0.61	64.0	0.11	0.07	0.44	0.11	0.4	1.82	1.40	0.05	0.10	0.47	1.70	0.14		<0.03	
Analysen < BG	0	0	2	10	8	7	0	12	0	10	12	14	0	2	6	0	14	
Bestimmungsgrenze BG			<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	0	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.09	<0.2	<0.02	<0.03	<1
<b>Alpenraum</b>	Analysen Total	6	40	62	38	40	40	1	37	39	39	38	40	40	40	40	31	38
	Anzahl Messwerte	6	40	18	9	13	26	0	16	39	17	21	14	39	29	35	15	12
	Durchschnitt	7.5	2.93	7.8	0.04	0.05	0.20	0.13	0.9	1.75	0.6	0.14	0.11	0.3	3.5	0.35	0.20	11.0
	Standardabweichung	2.6	5.31	5.0	0.04	0.04	0.13	0.05	0.7	1.48	0.5	0.18	0.04	0.2	3.0	0.45	0.27	13.0
	Minimum	5.0	0.06	-2.0	0.01	0.01	0.05	0.04	0.4	0.18	0.1	0.02	0.07	0.1	0.5	0.02	0.04	1.0
Maximum	12.0	27.40	21.0	0.10	0.15	0.54	0.15	2.8	7.17	1.6	0.75	0.19	0.9	12.3	2.12	1.05	43.0	
Analysen < BG	0	0	44	29	27	14	1	21	0	22	17	26	1	11	5	16	26	
Bestimmungsgrenze BG		<0.03	<7	<0.01	<0.01	<0.04	<0.04	<0.05	<0.3	<0.06	<0.1	<0.02	<0.06	<0.04	<0.2	<0.02	<0.03	<1

Tab. 4-11: Physikalisch-chemische Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010.

Datenbasis: AQUITYP Projekt, Hydrochemische Datenbank der Nagra, diverse Projekte am Institut für Geologie, Universität Bern. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ	
<b>Mittelland Ost Molasse alle</b>	Analysen Total	56	56	56	56	56	Ca-Mg-HCO3 Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3-SO4	
	Anzahl Messwerte	56	56	56	56	56		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 56	Durchschnitt	437	438	9.5	7.3		4.91
		Standardabweichung	111	122	2.3	0.4		1.36
		Minimum	114	110	6.8	6.7		1.08
		Maximum	643	761	17.5	8.1		7.45
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland West Molasse alle</b>	Analysen Total	46	46	46	44	46	Ca-Mg-HCO3 Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3-SO4	
	Anzahl Messwerte	46	46	46	44	46		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 46	Durchschnitt	485	477	9.4	7.2		4.77
		Standardabweichung	244	245	1.8	0.2		1.53
		Minimum	157	147	6.6	6.7		1.68
		Maximum	1326	1339	16.3	7.8		7.60
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland, OSM</b>	Analysen Total	30	30	30	30	30	Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3	
	Anzahl Messwerte	30	30	30	30	30		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 30	Durchschnitt	487	494	9.5	7.4		5.52
		Standardabweichung	94	107	2.6	0.5		1.05
		Minimum	328	326	6.8	6.7		3.75
		Maximum	643	761	17.5	8.1		7.45
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland, OMM</b>	Analysen Total	48	48	48	46	48	Ca-Mg-HCO3 Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3-SO4	
	Anzahl Messwerte	48	48	48	46	48		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 48	Durchschnitt	431	422	9.2	7.2		4.65
		Standardabweichung	106	108	1.3	0.2		1.27
		Minimum	183	180	7.4	6.9		2.03
		Maximum	662	625	13.0	7.7		7.09
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland, USM</b>	Analysen Total	23	23	23	23	23	Ca-Mg-HCO3 Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3-SO4	
	Anzahl Messwerte	23	23	23	23	23		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 23	Durchschnitt	485	483	10.1	7.3		4.46
		Standardabweichung	338	341	2.5	0.3		1.89
		Minimum	114	110	7.5	6.7		1.08
		Maximum	1326	1339	16.3	7.8		7.60
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Tafeljura Malm</b>	Analysen Total	6	6	6	6	6	Ca-HCO3	
	Anzahl Messwerte	6	6	6	6	6		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 6	Durchschnitt	550	541	8.8	7.1		5.82
		Standardabweichung	38	57	0.8	0.1		0.65
		Minimum	497	460	7.7	7.0		4.77
		Maximum	594	603	9.9	7.2		6.39
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Faltenjura Malm</b>	Analysen Total	15	16	16	16	16	Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3	
	Anzahl Messwerte	15	16	16	16	16		
		<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-loga<sub>H+</sub></b>	<b>meq/L</b>		
	Anzahl Lokalitäten: 16	Durchschnitt	420	424	9.8	7.3		4.74
		Standardabweichung	102	100	2.8	0.4		0.87
		Minimum	238	245	5.8	6.5		2.89
		Maximum	609	600	15.9	7.9		5.70
	Analysen < BG					0		
	Bestimmungsgrenze BG							

Tab. 4-11: ff

Region / Geologie	Statistik	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ	
<b>Tafeljura Keuper</b>	Analysen Total	11	14	14	11	14	Ca-SO4 Ca-Mg-SO4 Ca-SO4-HCO3 Ca-HCO3	
	Anzahl Messwerte	11	14	14	11	14		
	Anzahl Lokalitäten: 14	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 1721	$\text{mg/L}$ 1608	$^{\circ}\text{C}$ 11.0	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 6.93		$\text{meq/L}$ 5.09
		Standardabweichung	533	682	3.0	0.31		1.03
		Minimum	644	541	5.6	6.64		2.87
		Maximum	2569	2433	15.8	7.60		6.24
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Faltenjura Keuper</b>	Analysen Total	3	3	3	3	3	Ca-SO4	
	Anzahl Messwerte	3	3	3	3	3		
	Anzahl Lokalitäten: 3	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 2257	$\text{mg/L}$ 2572	$^{\circ}\text{C}$ 11.9	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 6.75		$\text{meq/L}$ 5.41
		Standardabweichung	177	9	0.3	0.06		0.79
		Minimum	2152	2562	11.7	6.70		4.76
		Maximum	2462	2580	12.3	6.81		6.29
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Tafeljura Muschelkalk</b>	Analysen Total	5	5	4	4	5	Ca-Mg-SO4-HCO3 Ca-Mg-HCO3	
	Anzahl Messwerte	5	5	4	4	5		
	Anzahl Lokalitäten: 5	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 1290	$\text{mg/L}$ 1147	$^{\circ}\text{C}$ 13.6	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 7.02		$\text{meq/L}$ 5.62
		Standardabweichung	794	642	3.3	0.22		0.82
		Minimum	395	385	11.7	6.87		4.24
		Maximum	2570	2149	18.5	7.39		6.28
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Faltenjura Muschelkalk</b>	Analysen Total	21	22	22	21	22	Ca-SO4 Ca-Mg-SO4-HCO3	
	Anzahl Messwerte	21	22	22	21	22		
	Anzahl Lokalitäten: 22	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 1209	$\text{mg/L}$ 1293	$^{\circ}\text{C}$ 12.2	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 6.97		$\text{meq/L}$ 5.44
		Standardabweichung	598	679	2.1	0.17		0.84
		Minimum	456	523	7.7	6.66		3.08
		Maximum	2411	2503	15.7	7.23		6.61
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Alpenrand Helvetikum &amp; Penninikum Karbonatgesteine</b>	Analysen Total	80	80	74	73	80	Ca-HCO3 Ca-Mg-HCO3	
	Anzahl Messwerte	80	80	74	73	80		
	Anzahl Lokalitäten: 80	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 345	$\text{mg/L}$ 336	$^{\circ}\text{C}$ 5.9	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 6.9		$\text{meq/L}$ 3.35
		Standardabweichung	222	219	1.5	0.4		0.82
		Minimum	159	158	1.2	5.9		1.86
		Maximum	1870	1888	9.2	7.8		5.15
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Alpenrand Helvetikum &amp; Penninikum Evaporitgesteine</b>	Analysen Total	55	55	55	12	55	Ca-SO4 Ca-Mg-SO4 Ca-SO4-HCO3 Ca-Mg-SO4-HCO3	
	Anzahl Messwerte	55	55	55	12	55		
	Anzahl Lokalitäten: 55	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 1644	$\text{mg/L}$ 1787	$^{\circ}\text{C}$ 8.3	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 7.0		$\text{meq/L}$ 4.07
		Standardabweichung	323	413	2.0	0.1		0.76
		Minimum	956	977	4.2	7.0		2.84
		Maximum	2190	2562	12.0	7.2		6.61
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Alpenraum Sedimentgesteine Penninikum, Ost-&amp;Südalpin</b>	Analysen Total	48	48	48	12	40	Ca-SO4 Ca-Mg-HCO3-SO4	
	Anzahl Messwerte	48	48	48	12	48		
	Anzahl Lokalitäten: 48	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 1509	$\text{mg/L}$ 1626	$^{\circ}\text{C}$ 8.9	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 7.4		$\text{meq/L}$ 3.99
		Standardabweichung	577	691	2.3	0.2		1.81
		Minimum	217	220	4.2	7.0		1.39
		Maximum	2373	2779	16.4	7.8		9.73
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0
<b>Alpenraum Kristallin</b>	Analysen Total	30	30	30	7	23	Ca-HCO3-SO4 Ca-HCO3	
	Anzahl Messwerte	30	30	30	7	23		
	Anzahl Lokalitäten: 30	Durchschnitt	$\mu\text{S/cm}$ 72	$\text{mg/L}$ 61	$^{\circ}\text{C}$ 5.9	$-\log_{10} a_{\text{H}^+}$ 7.01		$\text{meq/L}$ 0.61
		Standardabweichung	56	54	2.3	0.79		0.47
		Minimum	20	16	2.4	5.85		0.11
		Maximum	330	297	14.2	7.80		2.51
		Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0

Tab. 4-12: Redox-Parameter von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010.

Datenbasis: AQUITYP Projekt, Hydrochemische Datenbank der Nagra, diverse Projekte am Institut für Geologie, Universität Bern; Redox-Spezien Eisen, Schwefel und Stickstoff sind nicht immer an allen Proben analysiert worden, so dass die statistischen Werte nicht zusammenpassen. Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P	
<b>Mittelland Ost Molasse alle</b>	Analysen Total	54	14	56	46	7	56	5	9	7	54	5	7	
	Anzahl Messwerte	54	14	53	46	2	56	1	5	0	54	4	2	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 56	Durchschnitt	359	8.4	0.004	0.013	0.30	20.3	0.055	0.10		8.5	1.4	0.035
		Standardabweichung	78	3.8	0.009	0.034	0.40	22.5		0.07		4.8	0.6	0.045
		Minimum	10	0.2	0.000	0.000	0.02	4.1	0.055	0.02		0.4	<0.5	0.003
		Maximum	445	13.2	0.046	0.162	0.58	119	0.055	0.20		20.2	2.2	0.067
	Analysen < BG	0	0	3	0	5	0	4	4	7	0	1	5	
	Bestimmungsgrenze BG			<0.001		<0.01		<0.02	<0.1	<0.01		<0.05	<0.04	
<b>Mittelland West Molasse alle</b>	Analysen Total	44	13	46	43	1	46	1	1	1	46	1	1	
	Anzahl Messwerte	44	13	46	43	0	46	0	1	0	46	1	1	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 46	Durchschnitt	393	10.9	0.002	0.008		43.2				15.3		
		Standardabweichung	46	2.1	0.004	0.020		103.8				12.2		
		Minimum	170	6.3	0.000	0.000		2.6		0.2		0.2	0.5	0.002
		Maximum	461	14.8	0.021	0.112		445.0		0.2		46.7	0.5	0.002
	Analysen < BG	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	
	Bestimmungsgrenze BG					< BG		< BG		< BG				
<b>Mittelland, OSM</b>	Analysen Total	28	9	30	23	3	30	2	5	3	28	2	3	
	Anzahl Messwerte	28	9	28	23	0	30	0	2	0	28	1	1	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 30	Durchschnitt	375	10.7	0.005	0.019		24.8		0.07		8.5		0.003
		Standardabweichung	52	1.6	0.010	0.045		29.0		0.01		4.7		
		Minimum	168	8.3	0.000	0.000		4.5		0.06		0.6	<0.5	0.003
		Maximum	445	13.2	0.046	0.162		119		0.08		19.0	1.5	0.003
	Analysen < BG	0	0	2	0	3	0	2	3	3	0	1	2	
	Bestimmungsgrenze BG			<0.001		<0.01		<0.02	<0.1	<0.01		<0.05	<0.04	
<b>Mittelland, OMM</b>	Analysen Total	46	12	48	45	1	48	0	1	1	48	0	1	
	Anzahl Messwerte	46	12	48	45	1	48	1	1	0	48	0	0	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 48	Durchschnitt	385	10.5	0.002	0.007	0.580	14.5				13.9		
		Standardabweichung	47	2.3	0.004	0.019		7.9				10.3		
		Minimum	140	5.7	0.000	0.000	0.580	2.6		0.2		0.2		
		Maximum	461	14.8	0.021	0.112	0.580	40.0		0.2		46.7		
	Analysen < BG	0	0	0	0	0	0		0	1	0		1	
	Bestimmungsgrenze BG									<0.01			<0.02	
<b>Mittelland, USM</b>	Analysen Total	23	5	23	20	4	23	4	4	4	23	4	4	
	Anzahl Messwerte	23	5	22	20	1	23	1	3	0	23	4	2	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 23	Durchschnitt	350	4.9	0.004	0.011	0.020	73.1	0.055	0.12		10.9	1.2	0.035
		Standardabweichung	108	4.0	0.008	0.015		142.0		0.09		11.5	0.7	0.046
		Minimum	10	0.2	0.000	0.001	0.020	3.4	0.055	0.02		2.0	0.5	0.002
		Maximum	434	10.9	0.037	0.064	0.020	445	0.055	0.20		40.0	2.2	0.067
	Analysen < BG	0	0	1	0	3	0	3	1	4	0	0	2	
	Bestimmungsgrenze BG			< BG		< BG		b.d	< BG	b.d			b.d	
<b>Tafeljura Malm</b>	Analysen Total	0	0	0	4	0	6	0	6	0	6	0	0	
	Anzahl Messwerte				0		6		1		6			
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 6	Durchschnitt					18.3				27.0			
		Standardabweichung					6.7				12.2			
		Minimum					11.0		0.03		3.0			
		Maximum				4	29.0		0.03		37.0			
	Analysen < BG				4	0		5		0				
	Bestimmungsgrenze BG				<0.005				<0.01					
<b>Faltenjura Malm</b>	Analysen Total	10	7	14	14	1	15	1	3	1	15	3	1	
	Anzahl Messwerte	10	7	14	12	1.00	15	0	1	0	15	1	0	
		<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	
	Anzahl Lokaltäten: 16	Durchschnitt	388	11.4	0.008	0.117		8.9				8.8		
		Standardabweichung	106	1.8	0.013	0.326		5.7				8.1		
		Minimum	170	8.2	0.0002	0.002	0.09	1.3		0.8		1.8	0.2	
		Maximum	487	13.2	0.037	1.150	0.09	23.7		0.8		30.1	0.2	
	Analysen < BG	0	0	0	2	0	0	1	2	1	0	2	1	
	Bestimmungsgrenze BG				<0.001			< BG	<0.1	< BG		<0.5	< BG	

Tab. 4-12: ff

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P	
Tafeljura Keuper	Analysen Total	4	6	6	8	6	14	6	8	6	8	5	6	
	Anzahl Messwerte	4	6	5	7	0	14	1	2	1	7	4	2	
	Anzahl Lokalitäten: 14	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	43	7.9	0.010	0.252		924		0.12		7.9	1.25	0.002
		Standardabweichung	255	4.2	0.007	0.273		405		0.06		6.3	1.37	0.000
		Minimum	-340	0.5	0.004	0.018		71	0.90	0.08	0.006	2.5	0.50	0.002
		Maximum	190	12.6	0.022	0.570		1466	0.90	0.16	0.006	21.1	3.30	0.002
		Analysen < BG	0	0	1	1	6	0	5	6	5	1	1	4
Bestimmungsgrenze BG			< BG	<0.005	<0.1		<0.02	<0.01	<0.01	< BG	<0.5	<0.04		
Faltenjura Keuper	Analysen Total	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	Anzahl Messwerte	3	3	2	3	0	3	0	1	0	3	3	2	
	Anzahl Lokalitäten: 3	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	150	5.7	0.006	0.031		1523				6.1	0.66	0.020
		Standardabweichung	17	2.4	0.006	0.017		43				2.1	0.56	0.025
		Minimum	140	3.6	0.002	0.017		1485		0.1		4.0	0.28	0.002
		Maximum	170	8.3	0.010	0.050		1569		0.1		8.1	1.30	0.038
		Analysen < BG	0	0	1	0	3	0	3	2	3	0	0	1
Bestimmungsgrenze BG			< BG		< BG		< BG	<1	< BG			< BG		
Tafeljura Muschelkalk	Analysen Total	3	2	4	3	3	5	2	3	3	5	2	2	
	Anzahl Messwerte	3	2	1	3	1	5	0	0	0	4	2	2	
	Anzahl Lokalitäten: 5	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	185	3.5		0.404		350				13.5	0.40	0.055
		Standardabweichung	213	2.8		0.578		202				7.9	0.00	0.067
		Minimum	-20	1.6	0.057	0.032	0.600	16				3.6	0.40	0.007
		Maximum	405	5.5	0.057	1.070	0.600	505				22.6	0.40	0.102
		Analysen < BG	0	0	3	0	2	0	2	3	3	1	0	0
Bestimmungsgrenze BG			<0.03		< BG		< BG	<0.1	<0.01	<0.5				
Faltenjura Muschelkalk	Analysen Total	16	19	19	18	20	22	19	20	20	21	15	15	
	Anzahl Messwerte	16	18	12	17	7	22	1	11	4	20	15	12	
	Anzahl Lokalitäten: 22	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	105	5.2	0.018	0.238	0.393	565		0.59	0.018	6.5	0.91	0.012
		Standardabweichung	165	2.9	0.031	0.366	0.401	486		1.28	0.021	5.9	0.60	0.014
		Minimum	-320	0.0	0.002	0.002	0.060	15	21	0.03	0.003	0.6	0.28	0.002
		Maximum	397	9.5	0.110	1.270	0.850	1406	21	4.43	0.050	23.0	2.70	0.055
		Analysen < BG	0	1	7	1	13	0	18	9	16	1	0	3
Bestimmungsgrenze BG		< BG	<0.01	<0.01	<0.01		<0.02	<0.01	<0.01	< BG		< BG		
Alpenordrand Helvetikum & Penninikum Karbonatgesteine	Analysen Total	12	6	76	64	0	80	0	0	0	70	0	0	
	Anzahl Messwerte	12	6	76	64		80				70			
	Anzahl Lokalitäten: 80	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	446	11.9	0.0009	0.0165		42.0				3.0		
		Standardabweichung	20	2.4	0.0012	0.0133		131.5				2.0		
		Minimum	408	9.2	0.0000	0.0004		2.5				0.1		
		Maximum	477	16.1	0.0049	0.0648		1027				8.6		
		Analysen < BG	0	0	0	0		0				0		
Bestimmungsgrenze BG														
Alpenordrand Helvetikum & Penninikum Evaporitgesteine	Analysen Total	8	1	46	1	0	55	0	0	0	23	0	0	
	Anzahl Messwerte	8	1	46	1		55				23			
	Anzahl Lokalitäten: 55	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	407	6.7	0.0136	0.0046		1028				3.2		
		Standardabweichung	5					285				8.5		
		Minimum	396	6.7	0.0002	0.0046		388				0.1		
		Maximum	415	6.7	0.0287	0.0046		1620				41.7		
		Analysen < BG	0	0	0	0		0				0		
Bestimmungsgrenze BG														
Alpenraum Sedimentgesteine Penninikum, Ost-&Südalpin	Analysen Total	6	4	38	2	0	48	0	0	0	19	0	0	
	Anzahl Messwerte	6	4	38	2		48				19			
	Anzahl Lokalitäten: 48	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	471	11.6	0.0101	0.0005		922				5.0		
		Standardabweichung	48	0.5	0.0079	0.0004		469				5.4		
		Minimum	408	10.9	0.0003	0.0002		7				0.3		
		Maximum	517	12.0	0.0312	0.0008		1597				17.9		
		Analysen < BG	0	0	0	0		0				0		
Bestimmungsgrenze BG														
Alpenraum Kristallin	Analysen Total	6	1	2	3	0	30	0	2	0	28	2	0	
	Anzahl Messwerte	6	1	0	2		30		0		28	1		
	Anzahl Lokalitäten: 30	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Durchschnitt	341	13.1		0.0315		10.1				1.68	1.04	
		Standardabweichung	112			0.0293		9.3				1.76		
		Minimum	155	13.1		0.0108		2.8				0.07	<0.25	
		Maximum	435	13.1		0.0523		44.9				7.50	1.04	
		Analysen < BG	0	0	2	1		0				0	1	
Bestimmungsgrenze BG			<0.005	<0.005				<0.1			<0.25			

Tab. 4-13: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen von oberflächennahem Grundwasser in Festgestein in den diversen geo-tektonischen Grossräumen, Daten vor 2010.

Datenbasis: AQUITYP Projekt, Hydrochemische Datenbank der Nagra, diverse Projekte am Institut für Geologie, Universität Bern. BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
<b>Mittelland Ost</b> <b>Molasse alle</b>	Analysen Total	55	53	53	2	51	39	0	50	45	53	53	0	48	54	50	0	52
	Anzahl Messwerte	50	49	52	0	46	37	0	47	45	48	47	0	45	50	47	0	49
	Durchschnitt	11	0.2	9	0.2	0.9	0.9	0.9	1.2	0.8	0.6	0.3	0.1	0.1	1.1	0.5	0.5	3
	Standardabweichung	32	0.5	19	0.1	0.9	0.1	0.1	2.6	1.6	0.7	1.3	0.0	0.0	1.8	0.2	0.2	5
	Minimum	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
<b>Mittelland West</b> <b>Molasse alle</b>	Maximum	212	2.5	105	0.4	3.4	3.4	15.2	7.7	3.9	8.7	8.7	0.1	9.0	1.0	1.0	27	27
	Analysen < BG	5	4	1	2	5	2	3	0	0	5	6	3	3	4	3	3	3
	Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<90	<5	<20	<5	<5	<5	<5	<20	<20	<20	<BG	<BG	<BG	<BG	<20
	Analysen Total	45	46	46	0	46	43	0	46	43	46	46	0	46	46	46	0	46
	Anzahl Messwerte	45	45	45	0	45	43	0	46	43	45	45	0	45	46	45	0	46
<b>Mittelland, OSM</b>	Durchschnitt	22	0.2	7	0.2	1.9	1.9	2.5	1.0	0.6	0.3	0.3	0.4	0.4	0.9	0.6	0.6	6
	Standardabweichung	16	0.2	12	0.1	1.8	0.4	7.6	2.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	1.0	0.3	0.3	23
	Minimum	3	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
	Maximum	81	0.7	56	0.8	6.9	6.9	49.5	16.0	2.0	2.1	2.1	4.1	4.1	3.6	1.4	1.4	155
	Analysen < BG	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
<b>Mittelland, OMM</b>	Bestimmungsgrenze BG	<BG	<BG	<5	<5	<20	<5	<5	<5	<20	<BG	<20						
	Analysen Total	30	28	28	2	27	19	0	25	24	28	28	0	24	28	26	0	28
	Anzahl Messwerte	27	26	27	0	24	17	0	25	24	26	25	0	23	26	25	0	26
	Durchschnitt	14	0.2	8	0.2	0.4	0.4	1.8	1.2	0.9	0.2	0.2	0.1	0.1	1.7	0.5	0.5	2
	Standardabweichung	41	0.5	20	0.1	0.3	0.3	3.3	2.2	0.8	0.2	0.2	0.2	0.1	2.3	0.2	0.2	3
<b>Mittelland, USM</b>	Minimum	0	0.1	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0
	Maximum	212	2.5	105	0.4	3.4	3.4	15.2	7.7	3.9	8.7	8.7	0.1	9.0	1.0	1.0	16	
	Analysen < BG	3	2	1	2	3	2	0	0	0	2	3	1	1	2	1	2	2
	Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<90	<5	<20	<5	<5	<5	<5	<20	<20	<20	<BG	<BG	<BG	<BG	<20
	Analysen Total	48	48	48	0	47	46	0	48	47	48	48	0	47	48	47	0	47
<b>Mittelland, USM</b>	Anzahl Messwerte	48	48	48	0	47	46	0	47	47	47	47	0	47	47	47	0	47
	Durchschnitt	19	0.2	5	0.2	2.1	2.1	0.8	0.5	0.5	0.4	0.4	0.1	0.1	0.7	0.6	0.6	5
	Standardabweichung	19	0.3	10	0.1	1.7	1.7	1.5	0.4	0.4	1.3	1.3	0.0	0.0	0.7	0.2	0.2	23
	Minimum	0	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0
	Maximum	81	2.0	68	0.8	6.9	6.9	7.2	1.9	2.0	8.7	8.7	0.1	3.1	1.4	1.4	1.4	155
<b>Mittelland, USM</b>	Analysen < BG	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
	Bestimmungsgrenze BG	<BG	<BG	<5	<5	<20	<5	<5	<5	<5	<20	<20	<20	<BG	<BG	<BG	<BG	<20
	Analysen Total	21	22	22	0	22	16	0	22	16	22	22	0	22	23	22	0	22
	Anzahl Messwerte	19	19	21	0	19	16	0	20	16	19	19	0	19	22	19	0	21
	Durchschnitt	14	0.3	15	0.2	0.6	0.6	4.7	1.7	0.4	0.3	0.3	0.7	0.7	0.9	0.4	0.4	6
<b>Mittelland, USM</b>	Standardabweichung	14	0.2	20	0.2	0.3	0.3	11.1	3.9	0.5	0.5	0.5	1.4	1.4	1.1	0.3	0.3	6
	Minimum	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
	Maximum	51	1.0	68	0.6	1.1	1.1	49.5	16.0	1.7	2.1	2.1	4.1	4.1	3.6	1.1	1.1	27
	Analysen < BG	2	3	1	3	0	0	2	0	3	3	3	3	3	1	3	1	1
	Bestimmungsgrenze BG	<BG	<BG	<5	<5	<20	<5	<5	<5	<5	<20	<20	<20	<BG	<BG	<BG	<BG	<20





## 5 Grundwasser in tiefliegenden Aquiferen (Tiefengrundwässer)

Als Tiefengrundwasser wird hier Grundwasser bezeichnet, welches der von der Arbeitsgruppe "Tiefengrundwasser" der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie (SGH) vorgeschlagenen Definition Rechnung trägt (vgl. Waber et al. 2015). Alle diese Tiefengrundwässer erfüllen mindestens drei der dort beschriebenen Bedingungen. Diese sind (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 (d.h.  $< 1/4$  des atmosphärischen Eintrages von  $^3\text{H}$ ), (4) lange Fliesswege im Untergrund.

Für Grundwasser, welches aus Tiefbohrungen entnommen wird, gestaltet sich die Bezeichnung als Tiefengrundwasser meist relativ einfach. Anders verhält es sich bei natürlichen Ausflüssen von Grundwasser an der Oberfläche oder in oberflächennahen Grundwasserleiter. Für solches Grundwasser gestaltet sich besonders die Abklärung der Bedingungen (3) und (4) nicht immer einfach und erfordert zusätzlich zu chemischen Analysen auch solche von (radiogenen) Isotopen und eine gute Kenntnis der grossräumigen hydrogeologischen Verhältnisse.

Rückwirkend muss auch die Bedingung der erhöhten Temperatur mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden. Aufgrund der Klimaerwärmung nimmt die Temperatur von oberflächennahem Grundwasser mit kurzen Verweilzeiten im Untergrund stetig zu. Es kann also durchaus Fälle geben, wo ein Tiefengrundwasser mit einer Temperatur um die  $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ , welches in einen genutzten Grundwasserleiter aufstösst, die oben genannte zweite Bedingung vor zehn Jahren noch erfüllte, heute aber nicht mehr.

Gegenüber den meist sehr ergiebigen oberflächennahen Lockergestein-Grundwasserleiter haben tiefliegende Aquifere ähnlich wie die oberflächennahen Festgestein-Grundwasserleiter generell eine geringere Ergiebigkeit. Je nach topographischer und geologischer Lage können aber auch besonders aus tiefliegenden Karst-Aquiferen grosse Volumen von Grundwasser gefördert und genutzt werden (z.B. Muralt 1999, vgl. auch Abschnitt 5.2). Für die grosse Mehrzahl der Vorkommen von Tiefengrundwasser ist aber die Ergiebigkeit quantitativ bisher nicht erfasst.

Ähnliches gilt für die Infiltrationsgebiete und der Zirkulationswege von Tiefengrundwasser im tiefen Untergrund. Hier beschränkt sich eine genauere Kenntnis der Tiefengrundwässer vor allem auf die von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) durchgeführten detaillierten Untersuchungen in der Nordostschweiz und dem Wellenberg (Schmassmann 1990, Schmassmann et al. 1984, 1992, Pearson et al. 1991, Biehler et al. 1993, Nagra 1997, Waber & Traber 2022) sowie auf das landesübergreifende Interreg-Projekt im Raum Hegau – Schaffhausen (Interreg IIIA 2008). Mehr lokale Untersuchungen meist in Zusammenhang mit Mineralwasser- u/o Thermalwasservorkommen sind aus dem Alpenraum vorhanden (z.B. Högl 1980, Vuataz 1982, Pfeifer et al. 1992, Hartmann 1998, Bissig et al. 2006, Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Waber et al. 2017, Sonney et al. 2020, Stober et al. 2023). Für gewisse Thermalwässer mit meteorischem Ursprung werden z.B. im Aar-Gotthard-Massiv Zirkulationstiefen von bis zu 10 km unterhalb der Oberfläche prognostiziert (Diamond et al. 2018, Wanner et al. 2020).

### 5.1 Verbreitung tiefliegender Aquifere

Die Grundwasserführung findet in der Tiefe generell in den gleichen Lithologien statt, wie in den oberflächennahen Festgestein-Grundwasserleitern. Wie in diesen hängt die Wasserführung in grossem Masse von der tektonischen Beanspruchung und geographischen Lage (z.B. Juragebirge, Mittelland, Alpen), der sedimentologischen Ausbildung und der diagenetischen und/oder metamorphen Überprägung der betrachteten Lithologien ab (vgl. Kap. 3). In der im Alpenen Vorland

und dem Mittelland (Molassebecken) tektonisch relativ ungestört vorliegenden Sequenz der känozoischen und mesozoischen Sedimente können unterschiedliche, wasserführende litho-stratigraphische Einheiten in der Vertikalen zu sog. "*hydrogeologischen Einheiten*" zusammengefasst werden (vgl. Waber & Traber 2022). Aus diesen Einheiten tritt Grundwasser artesisch aus oder kann aus tiefen Bohrungen gepumpt werden. Je nach horizontaler Ausdehnung werden die Einheiten dann als regionaler oder lokaler Aquifer bezeichnet. Für die Aquifere werden in der Regel spezifische Bezeichnungen (z.B. Malm-Aquifer, Keuper-Aquifer) verwendet. Diese orientieren sich aus historischen Gründen oft an älteren stratigraphischen Begriffen und können von der aktuellen litho-stratigraphischen Gliederung abweichen.

Daten über tiefe Grundwässer in der Schweiz liegen aus Vorkommen bis in Tiefen von mehr als 2'000 m unterhalb der Oberfläche vor. Der Kenntnisstand über tiefe Grundwässer variiert regional stark und ist bei weitem nicht so flächendeckend und homogen verteilt, wie durch die diversen Beobachtungsnetze der oberflächennahen Grundwässer. Figur 5-1 gibt eine Übersicht von bekannten Vorkommen von Tiefengrundwasser in der Schweiz, für welche Daten über die chemische Zusammensetzung und häufig auch über (Radio-)Isotope vorliegen.

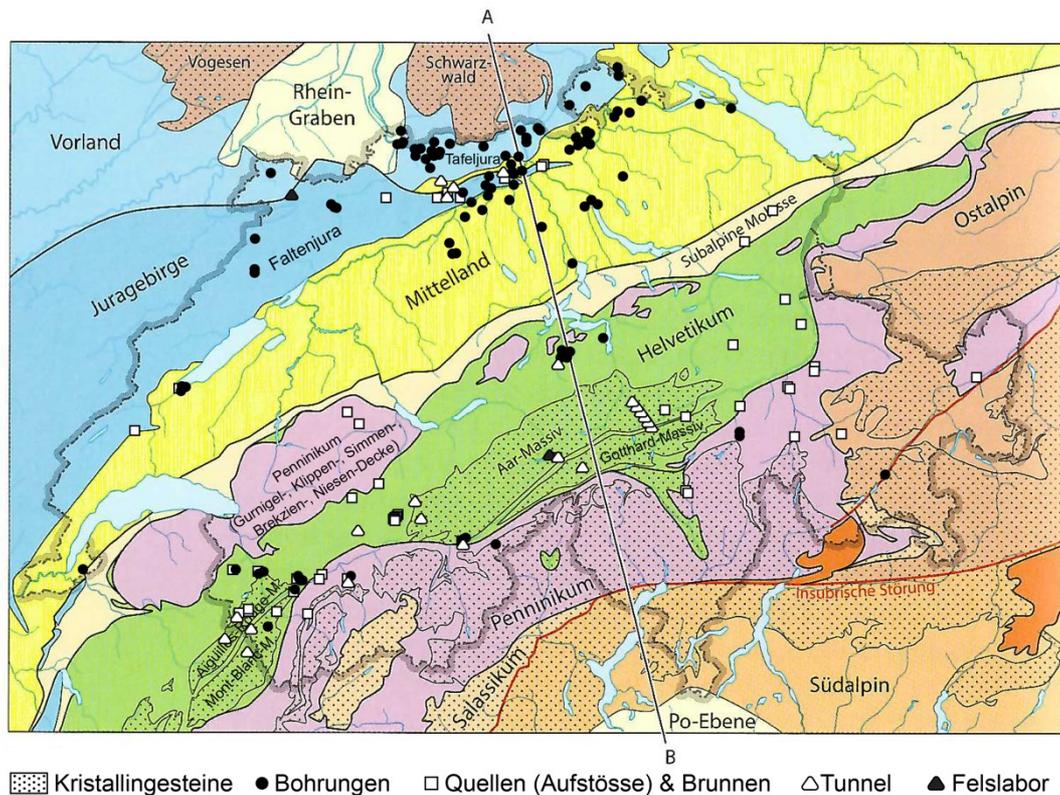


Fig. 5-1: Vorkommen von Tiefengrundwasser mit chemischer Charakterisierung in den geotektonischen Grossräumen der Schweiz.

Geo-tektonische Grossräume nach Pfiffner 2019, Karte leicht modifiziert.  
Felslabors: Grimsel Test Site (GTS) und Mont Terri Untergrund Labor.

### 5.1.1 Hydrogeologische Einheiten

Unabhängig von ihrer paläogeographischen Herkunft ist die Wasserführung in der Tiefe über die ganze Schweiz grundsätzlich an die gleichen litho-stratigraphischen Einheiten gebunden. Es sind dies vor allen die Sedimente des Känozoikums (Tertiär) und des Mesozoikums (Kreide, Jura, Trias), welche teilweise auf paläozoischen Ablagerungen (Perm, Karbon) oder direkt auf dem kristallinen Grundgebirge aufliegen. Je nach der paläogeographischen Situation während der Ablagerung der känozoischen und mesozoischen Sedimente und der Deformationsgeschichte während der Alpenbildung erstrecken sich diese in unterschiedlicher lithologischer Ausbildung über die heutige Schweiz (vgl. Kap. 3). Einzelne Sedimentabfolgen fehlen in gewissen Regionen sogar ganz, weil sie im Verlauf der geologischen Geschichte der Erosion zum Opfer fielen oder gar nicht erst abgelagert wurden.

Beispielhaft für den Aufbau des känozoischen und mesozoischen Sedimentstapels und der darin enthaltenen wasserführenden Einheiten kann die Situation in der Nordschweiz genommen werden. In dieser tektonisch wenig beanspruchten Region liegen die Sedimente entsprechend ihrem Sedimentationsalter aufeinander und fallen leicht gegen Süden ein (vgl. Fig. 3-2). Über die letzten Jahrzehnte wurden in der Nordschweiz innerhalb diverser Projekte mit unterschiedlicher Zielsetzung mehrere Tiefbohrungen abgeteuft, welche eine detaillierte Rekonstruktion des tiefen Untergrunds in dieser Region inklusive der Hydrogeologie zulassen. Solche Projekte beinhalten u.a. die landesübergreifende Wasserversorgung im Raum Schaffhausen (Interreg IIIA 2008), die Mineral- und Thermalwasserförderung (z.B. Gübeli 1957, Cadisch 1959, Zusammenfassung in Burger 2009), die Kohlenwasserstoff-Exploration (z.B. Büchi et al. 1965, Lemcke et al. 1968) und die intensiven Abklärungen der Nagra für ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle (Schmassmann et al. 1984, 1992, Schmassmann 1990, Biehler et al. 1993, Traber et al. 2002, Waber & Traber 2022). Basierend auf diesen Erkenntnissen werden in der Nordschweiz im Tafeljura, östlichen Faltenjura und Mittelland (Molassebecken) zehn hydrogeologische Einheiten unterschieden, welche in unterschiedlichem Mass grundwasserleitend sind (Fig. 5-2).

In dieser Einteilung fehlen zwei hydrogeologische Einheiten, welche in anderen Teilen der Schweiz vorhanden und wasserführend sind. Es sind dies einerseits die Kalkabfolgen der Kreide, welche im Mittelland und westlichen Faltenjura (ungefähr westlich der Linie Thun – Biel), am Alpennordrand und im Alpenraum in den penninischen und ostalpinen Sedimentdecken erhalten sind (vgl. Kap. 3). Andererseits sind es die mehrheitlich geringmächtigen, teilweise sandigen Abfolgen der Unteren Meeresmolasse (UMM, Tertiär), welche im mittelländischen Molassebecken ebenfalls nur in der westlichen Schweiz und in der Subalpinen Molasse am Südrand des Molassebeckens am Alpennordrand vorhanden sind (z.B. Sommaruga et al. 2012, Pfiffner 2014, 2019).

Generell lassen sich aber die im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten auf die anderen geo-tektonischen Grossräume (vgl. Fig. 3-1) anwenden. Dies unter Berücksichtigung von lateralen Wechseln in der sedimentologischen Fazies (z.B. Wechsel von Ton- zu Sandstein) und der intensiven Verfaltung und teilweisen metamorphen Überprägung des mesozoischen Sedimentstapels in den helvetischen, penninischen und ostalpinen Decken (vgl. Kap. 3).

Aufgrund der regionalen Ausdehnung und der relativ homogenen lithologischen Ausbildung bilden fünf hydrogeologische Einheiten (Tertiär, Kreide, Malm, Muschelkalk, Buntsandstein) regionale Aquifere. Das kristalline Grundgebirge zeigt in der Nordschweiz im obersten Bereich (einige 100 m) eine grosse Kontinuität und bildet dort ebenfalls einen regionalen Aquifer. Nicht bekannt ist die mögliche weitere Ausdehnung dieses Aquifers in Richtung Süden und Westen. Ähnliches gilt für die kristallinen Massive und hochmetamorphen Gneise in den Alpen (siehe unten). Die restlichen hydrogeologischen Einheiten (Effinger Schichten, Hauptrogenstein, Lias, Keuper und Permokarbon) sind aufgrund lithologischer und fazieller Veränderungen über kurze

Distanzen für die Grundwasserführung mehr von lokal begrenzter Bedeutung und können lokal Aquifere darstellen.

Stratigraphisch von oben nach unten und in tektonisch ungestörter Lage können diese hydrogeologischen Einheiten folgendermassen kurz charakterisiert werden (modifiziert nach Waber & Traber 2022):

- *Hydrogeologische Einheit der Molasse-Ablagerungen* (Mittelland, Tertiär):
  - Obere Süsswassermolasse (OSM). Eine Abfolge von fluvioterrestrischen Sandsteinen, Konglomeraten und Tonmergeln von grosser Ausdehnung und lateral und vertikal grosser Heterogenität (Schuttfächer). Dementsprechend variiert auch die Wasserführung lokal, kann aber mächtig ausgebildet sein. Der Wasserfluss findet in Sedimentschichten mit höheren hydraulischen Durchlässigkeiten von homogen-porös bis zu Kluft-dominiert statt.
  - Obere Meeresmolasse (OMM). Eine Abfolge von marinen, fein- bis grobkörnigen Sandsteinen von grossflächiger Ausdehnung. Der Wasserfluss findet homogen-porös bis zu Kluft-dominiert in den Regionen mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit statt.
  - Untere Süsswassermolasse (USM). Eine Abfolge von fluvioterrestrischen Sandsteinen, Konglomeraten und Tonmergeln. von grosser Ausdehnung und lateral und vertikal grosser Heterogenität (Schuttfächer). Wie in der OSM variiert auch die lokal mächtige Wasserführung und der Wasserfluss findet in Sedimentschichten mit höheren hydraulischen Durchlässigkeiten von homogen-porös bis zu Kluft-dominiert statt.
  - Untere Meeresmolasse (UMM; nur sporadisch in Westschweiz und subalpiner Molasse). Wechselfolge von küstennahen marinen Sandsteinen und Tonmergeln durchsetzt mit Turbiditen. Wegen der limitierten Verbreitung ist über die Wasserführung wenig bekannt.

Die Molasse-Einheiten sind hydraulisch miteinander verbunden und es besteht auch eine hydraulische Verbindung zum Kreide-Aquifer bzw. dem Malm-Aquifer im Liegenden, sofern diese nicht durch die Bohnerztone des Siderolithikums (Eozän, Tertiär) unterbunden ist.

In der gesamten hydrogeologischen Molasse-Einheit ist die vertikale hydraulische Durchlässigkeit meist deutlich geringer als die horizontale.

- Der *Kreide-Aquifer* (nur Westschweiz) ist eine mächtige Abfolge von gebankten, teilweise bioklastischen Kalken, welche ungefähr westlich der Linie Thun – Biel von weniger als 100 m bis zu mehr als 400 m in der Region Genf zunimmt. An der Basis finden sich mergelige, teilweise Gips-führende Abfolgen. Die Karst- und Kluft-dominierte Wasserführung ist auf die kalkigen Abfolgen beschränkt.
- Der *Malm-Aquifer* ist eine mächtige Abfolge von massigen und gebankten Kalken des Oberen Malms (Oberjura). Die Mächtigkeit nimmt von rund 100 m in der Nordost-Schweiz bis gegen 800 m im Raum Genf zu. Die Karst- und Kluft-dominierte Wasserführung hängt in grossem Masse von der Intensität der Verkarstung und der faziellen Ausbildung der Kalke (z.B. bioklastischen Rifffazies) ab und ist gegen Westen deutlich erhöht. In der Nordost-Schweiz ist aufgrund der hydrogeologischen Entwicklung während des Tertiärs und Pleistozäns die Verkarstung und Klüftung wenig ausgebildet und die Malm-Kalke sind nur sehr gering durchlässig (vgl. Waber & Traber 2022). Insgesamt ist aber der Malm-Aquifer aufgrund der regionalen Verbreitung, Mächtigkeit und Kontinuität der Malm-Sedimente neben dem Muschelkalk (siehe unten) der bedeutendste Tiefenaquifer.
- Die *Effinger Schichten* (Unterer Malm, Unterjura) bilden aufgrund ihrer mächtigen Mergelabfolgen als hydrogeologische Einheit in der Nordostschweiz insgesamt einen Stauer

(Aquitard) unter dem Malm-Aquifer. Einschaltungen von geklüfteten Kalkbankabfolgen mit lokal erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten, welche gegen Westen zunehmen, können auch in dieser hydrogeologischen Einheit lokal zu einer v.a. Kluft-dominierten Wasserführung von lokaler Bedeutung führen.

- Der *Hauptrogenstein-Aquifer* (Oberer/Mittlerer Dogger) bildet als hydrogeologische Einheit im westlichen Tafeljura und im Faltenjura einen Kluft- und teilweise Karst-Aquifer, über dessen Bedeutung als Tiefenaquifer wenig bekannt ist. Zu dieser hydrogeologischen Einheit werden auch die Birmenstorfer Schichten (Unterer Malm) gezählt, welche im Faltenjura einen gering mächtigen Aquifer bilden können. In beiden Fällen findet die Wasserführung in kalkigen Lithologien statt (Spatkalk im Hauptrogenstein).
- Die hydrogeologische Einheit *Lias* (heute Staffelegg Formation) ist in der zentralen Nordschweiz allgemein gering durchlässig. Im Faltenjura können die geklüfteten, z.T. sandigen Kalkabfolgen im Bereich des unteren Lias (Arietenkalk) eine Wasserführung aufweisen.
- Der *Keuper-Aquifer* umfasst als hydrogeologische Einheit alle teils porösen, teils geklüfteten sandigen und dolomitischen wasserführenden Einheiten der Klettgau Formation (ehemals 'Oberer und Mittlerer Keuper') über der als Stauer wirkenden Bänkerjoch Formation (Gipskeuper, ehemals 'Mittlerer Keuper'). Die Wasserführung variiert schon auf lokalem Massstab stark entsprechend den rasch aufeinanderfolgenden lithologischen Veränderungen (z.B. durchlässige ehemalige Flussläufe).
- Der *Muschelkalk-Aquifer* beinhaltet als hydrogeologische Einheit die karbonatischen Abfolgen des Oberen Muschelkalks (Schinznach Formation, ehemals Trigonodus-Dolomit und Hauptmuschelkalk). In den von oben gegen unten von teilweise Anhydrit-führenden Dolomiten zu gebankten Kalken wechselnden Sedimentabfolgen findet die Wasserführung im verbundenen Porenraum und entlang von Klüften statt. Zum Muschelkalk-Aquifer wird auch der in Oberflächennähe oft poröse Dolomit der Anhydritgruppe (Zeglingen Formation, oberster Teil des Mittleren Muschelkalks) gezählt. Der Muschelkalk-Aquifer bildet – neben den Molasse-Einheiten und dem Malm-Aquifer – den wohl bedeutendsten Tiefenaquifer in der Schweiz. In der Nordostschweiz variiert seine Mächtigkeit von Norden nach Süden zwischen ~ 40–80 m.
- Der *Buntsandstein-Aquifer* umfasst als hydrogeologische Einheit die teils porösen, teils klüftigen Sand- und Siltsteine der Dinkelberg-Formation (ehemals 'Oberer' und 'Mittlerer Buntsandsteins'). Die Wasserführung findet v.a. im verbundenen Porenraum und entlang von Klüften statt. Der Buntsandstein-Aquifer ist über das ganze Juragebirge und Mittelland verbreitet, weist aber eine geringere Mächtigkeit (~ 10–20 m) als der Muschelkalk-Aquifer auf.
- Die hydrogeologische Einheit *Permokarbon* besteht aus einer Abfolge von Silt- und Sandsteinen mit lokalen Einschaltungen von Tonsteinen und Kohle, welche in den sog. Permokarbon-Trögen eine Mächtigkeit von > 1000 m aufweisen kann. Die Wasserführung ist hauptsächlich an Klüfte und Störungen gebunden. Ungeklüftete oder nicht gestörte Sand- und Siltsteine sind in der Regel diagenetisch stark zementiert und 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 der Nordschweiz. Das kristalline Grundgebirge stellt einen typischen Kluft-Aquifer dar und die Wasserführung findet ausschliessliche entlang von Klüften und Störungen statt.

Wie in Fig. 5-3 dargestellt, finden sich alle diese hydrogeologischen Einheiten auch in den zwischen 2019 und 2022 abgeteufte Tiefbohrungen der Nagra in der Nordschweiz. Grundwasser

wurde in diesen Bohrungen aus den Aquiferen Malm, Keuper und Muschelkalk entnommen, nicht aber aus dem Tertiär, Buntsandstein und Kristallin.

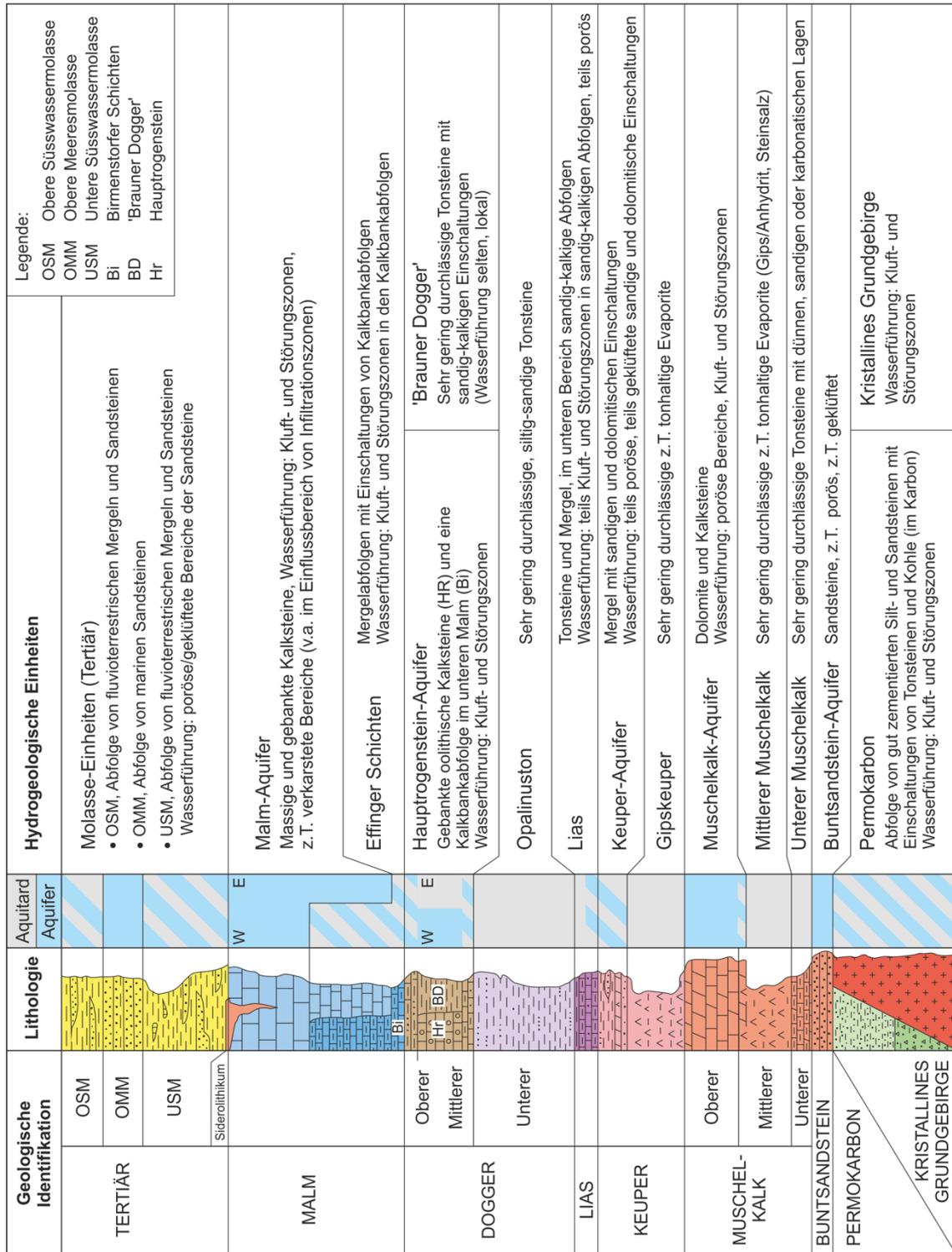


Fig. 5-2: Vereinfachter vertikaler hydrogeologischer Aufbau (hydrogeologische Einheiten) der Festgesteine der Nordschweiz.

Aus Waber & Traber 2022. Aquifere (bzw. Grundwasserleiter) in den quartären Lockergesteinen sind über allen Festgesteinseinheiten vorhanden (ausgenommen Karbon).

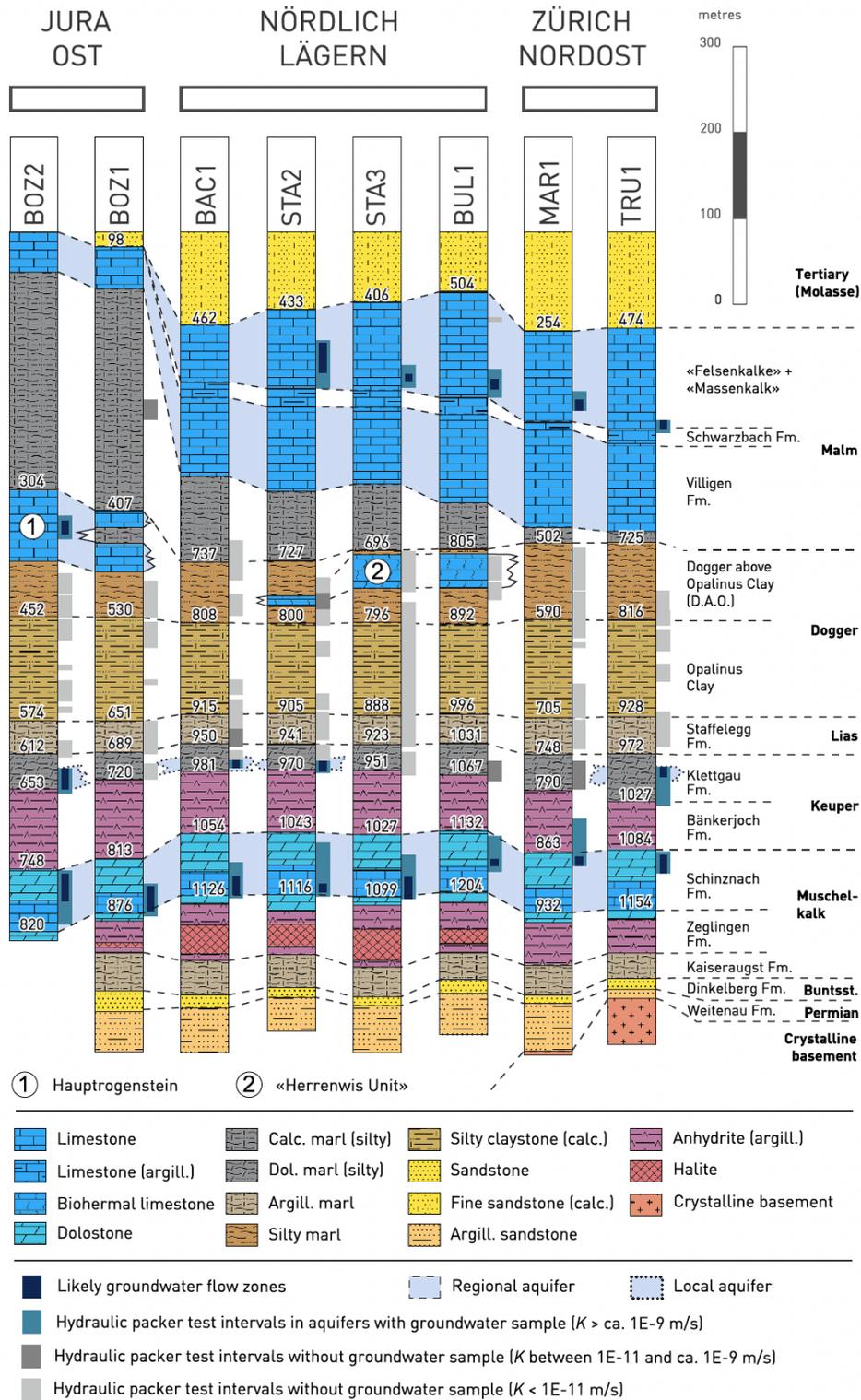


Fig. 5-3: Geologische Profile und Tiefenverteilung der Aquifere in den Tiefbohrungen der Nagra in der Nordschweiz von 2019 –2022.

Aus Mazurek et al. 2023. Abkürzungen der Bohrungen und Standorte: BOZ1&2: Bözberg, BAC1: Bachs, STA1&2: Stadel, BUL1: Bülach, MAR1: Marthalen, TRU1: Trüllikon.

## 5.2 Chemische Zusammensetzung von Tiefengrundwässern

Grundwasser, welches in grosse Tiefen infiltriert, stellt immer eine Mischung von verschiedenen Komponenten dar. Im Fall, dass die Tiefengrundwässer nur in einem bestimmten Aquifer zirkulieren, sind das Komponenten, welche unter verschiedenen klimatischen Bedingungen infiltrierten (z.B. heutiges Klima, glaziales Klima) und chemisch zwar sehr ähnlich, aber doch unterschiedlich weit entwickelt sind. Im anderen Fall sind das Komponenten von ganz unterschiedlicher Herkunft und geochemischer Entwicklung (z.B. Süsswasser und altes Meerwasser), welche sich durch formationsübergreifende Wasserzirkulation und/oder entlang von tektonischen Störungen mischen.

Im Folgenden sind die generelle chemische Charakterisierung, Redox-Bedingungen und die Spurenelement-Konzentrationen von Tiefengrundwässern entsprechend den geo-tektonischen Grossräumen von Fig. 5-1 und ihrem Auftreten in der Tiefe beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Datenlage für die hydrogeologischen Einheiten sehr unterschiedlich ist und die vorhandenen Daten keine umfassende Beschreibung der räumlichen Verteilung von Tiefengrundwasser in der ganzen Schweiz zulassen. Eine ausführliche Beschreibung der Tiefengrundwässer in der Nordschweiz mit Interpretation bezüglich Herkunft, Genese und Verweilzeiten im Untergrund ist in Waber & Traber (2022) gegeben.

### 5.2.1 Generelle chemische Charakterisierung

#### Tafeljura und Faltenjura

Im *Malm-Aquifer* des Tafeljuras und v.a. des Faltenjuras sind Tiefengrundwässer infolge der dort ausgeprägten Verkarstung der Malmkalke bis in Tiefen von gegen 600 m mehrheitlich Süsswasser mit einer Mineralisation von  $< 1$  g/L (Tab. 5-1). Diese Süsswässer sind vom generellen Ca-HCO<sub>3</sub>- und Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typ, wenn Karbonatlösung dominiert oder vom Na-HCO<sub>3</sub>-Typ, wenn Kationenaustausch-Reaktionen zu dominieren beginnen. Von einer Lokalität im Faltenjura (Courtemaiche) ist auch schwach mineralisiertes Grundwasser vom generellen Ca-[HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub>/Cl]-Typ bekannt, welches auf eine Mischung mit Grundwasser aus tiefer liegenden hydrogeologischen Einheiten hinweist. Malm-Tiefengrundwässer haben pH-Werte von 7.0–7.8 und hohe totale Alkalinitäten von 4.1–9.5 meq/L. Die Temperatur dieser Malm-Tiefengrundwässer aus Tiefen von 70–680 m variiert zwischen rund 16°C und 22°C.

Im *Hauptrogenstein-Aquifer* im Faltenjura, wo dieser als lokaler Karst-Aquifer vorliegt, finden sich in Tiefen von 90–370 m zuerst Süsswässer und mit zunehmender Tiefe vermehrt schwach bis stark mineralisierte Grundwässer (Tab. 5-1). Die Grundwässer sind vom Ca-HCO<sub>3</sub>- und Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Typ und bei höherer Mineralisierung vom Na-HCO<sub>3</sub>- oder Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Typ. Letztere Grundwässer stellen Mischungen mit höher mineralisiertem Grundwasser aus anderen hydrogeologischen Einheiten dar. Tiefengrundwässer im Hauptrogenstein haben pH-Werte von 7.1–8.2 und moderate totale Alkalinitäten von 3.6–5.4 meq/L bei Temperaturen von rund 17°C bis 22°C.

Aus dem *Keuper-Aquifer* sind aufgrund seines lokalen Auftretens nur wenige Analysen von Tiefengrundwässern aus dem tektonisch stark beanspruchten Gebiet im und an der Grenze zum Faltenjura vorhanden. Diese stammen aus Tiefen zwischen rund 100–660 m, sind stark mineralisiert bis salin (TDS bis 15.9 g/L) und von den generellen Na-SO<sub>4</sub>- und Na-SO<sub>4</sub>-Cl-Typen (Tab. 5-1). Die Grundwässer haben eine komplexe Entwicklung erfahren. Sie wurden mit höher mineralisiertem Grundwasser aus unterliegenden hydrogeologischen Einheiten, welche durch Lösung von Steinsalz beeinflusst sind, gemischt. Die Tiefengrundwässer im Keuper-Aquifer haben leicht basische pH-Werte (7.5–8.4), variierende totale Alkalinitäten (3.5–8.8 meq/L) und Temperaturen von 18–38°C.

Vom *Muschelkalk-Aquifer* liegen aufgrund seines regionalen Auftretens und der meist hohen Durchlässigkeit (Kluft- und Karst-strukturen) relativ viele Analysen von Tiefengrundwässern vor. Muschelkalk-Grundwässer sind aus Tiefen von rund 50–1550 m im Tafeljura und 0–580 m im Faltenjura bekannt. Im östlichen Faltenjura beinhaltet das auch artesisch an die Oberfläche aufstossende Thermalwässer (z.B. Baden/Ennetbaden, Schinznach Bad, Bad Lostorf). Muschelkalk-Tiefengrundwässer im Tafeljura weisen je nach Lage eine stark unterschiedliche Mineralisation auf (Tab. 5-1). Nahe den Infiltrationszonen sind meist Süswässer bis schwach mineralisierte Grundwässer vom für Evaporit-Mineralisierung typischen Ca-SO<sub>4</sub>-Typ vorhanden. Im Verbreitungsgebiet des triadischen Salzlagers werden für die Mineralisation mit zunehmender Tiefenzirkulation Salzauflösung in den unterliegenden Lithologien des Muschelkalks und Mischungen mit höher mineralisiertem Grundwasser aus unterliegenden hydrogeologischen Einheiten (Permkarbon, Kristallin) wichtig. Die Grundwässer sind dann stark mineralisiert bis salin und vom generellen Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>-Typ. Westlich im Faltenjura finden sich im tiefgelegenen Muschelkalk vorwiegend schwach bis stark mineralisierte Grundwässer vom Ca-SO<sub>4</sub>-Typ oder vom generellen Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>-Typ (Tab. 5-1). Tiefe Muschelkalk-Grundwässer haben mehrheitlich leicht saure pH-Werte, bei stark variierenden totalen Alkalinitäten und assoziiert mit einem hohen CO<sub>2</sub>-Partialdruck. Die Temperatur variiert dabei von rund 10 °C nahe der Infiltrationszone bis zu über 50 °C im tiefen Untergrund ab rund 1000 m unter der Oberfläche (Tab. 5-1).

### Mittelland

Für die tertiären Molasse-Einheiten liegt nur ein begrenzter Datensatz von Tiefengrundwasseranalysen vor (Tab. 5-2). Generell zeigt sich eine Tendenz für eine zunehmende Mineralisation mit der Tiefe und von der oberen Süswassermolasse (OSM) über die obere Meeresmolasse (OMM) in die untere Süswassermolasse (USM). In der OMM und USM nimmt die Mineralisation generell auch vom nördlichen Rand in Richtung Zentrum des Molassebeckens zu. Diese Tendenzen sind auf die hydraulische Verbundenheit und die Entwicklung der Molasse-Tiefengrundwässer zurückzuführen. In Analogie zum süddeutschen Molassebecken, wo ein viel grösserer Datensatz zur Verfügung steht, wird davon ausgegangen, dass Süswasser aus der OSM in die OMM migriert, sich dort mit dem ursprünglichen Meerwasser vermischt und dieses in die unterliegende USM und bis in den Malm-Aquifer verdrängt (z.B. Balderer 1990, Waber & Traber 2022 und dortige Referenzen).

In der *OSM* sind nur von einer Lokalität (Uetliberg) Daten eines Tiefengrundwassers bekannt. Bei diesem in mehr als 300 m Tiefe beprobten Grundwasser handelt es sich um ein Süswasser mit einer Mineralisation von < 1 g/L. Bei einer Temperatur von rund 17 °C hat das Na-HCO<sub>3</sub>-Typ Grundwasser einen leicht alkalischen pH bei einer hohen totalen Alkalinität, welche praktisch der Karbonat-Alkalinität entspricht (Tab. 5-2).

In der *OMM* liegen in Tiefen von rund 300–700 m unter der Oberfläche vornehmlich Süswässer bis stark mineralisierte Grundwässer (TDS = 0.8 –3.6 g/L) vom Na-HCO<sub>3</sub>- bis Na-Cl-Typ vor. Bei Temperaturen von rund 23–28°C weisen diese Grundwässer einen leicht alkalischen pH bei einer moderaten bis hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-2).

In der *USM* liegen in Tiefen von 100–2'400 m unter der Oberfläche Süswässer bis mehrheitlich saline Grundwässer (TDS = 0.6 –30 g/L) vom Na-HCO<sub>3</sub>-Typ und vor allem vom Na-Cl-Typ vor. Bei Temperaturen von 11–64 °C weisen diese Grundwässer leicht saure bis alkalische pH-Werte bei geringen bis hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-2).

Im *Malm-Aquifer im östlichen Mittelland* finden sich in Richtung Beckenzentrum vorwiegend stark mineralisierte bis saline Grundwässer (TDS = 3.5 –20.5 g/L) in Tiefen von 240–1'510 m unter der Oberfläche (Tab. 5-3). Diese werden als Mischung von meteorischem Wasser und ursprünglichem OMM Meerwasser interpretiert. Laut gängigen Modellvorstellungen infiltrierte dabei das meteorische Wasser via die überliegenden Obere Süswassermolasse unter den während

den Eiszeiten stark veränderten hydraulischen Bedingungen. Bei Temperaturen von 13–60 °C weisen diese Grundwässer heute leicht saure bis alkalische pH-Werte bei geringen bis sehr hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-3).

Im *Malm-Aquifer im westlichen Mittelland* finden sich zwei unterschiedliche Regionen: Entlang des Faltenjuras bis in die Nähe von Olten finden sich in Richtung Beckenzentrum in Tiefen von 20–350 m unter der Oberfläche Süss- und schwach mineralisierte Grundwässer vom Ca-HCO<sub>3</sub>- und Na-HCO<sub>3</sub>-Typ (TDS = 0.5–1.2 g/L), welche gegen Süden in saline Tiefengrundwässer vom Na-Cl-Typ übergehen (TDS = >18 g/L). Westlich von Neuenburg findet sich im Malm-Aquifer bis in Tiefen von rund 1500 m Süsswasser und bis rund 2120 m schwach mineralisiertes Grundwasser vom Ca-HCO<sub>3</sub>- und Na-HCO<sub>3</sub>-Typ (TDS = 0.3–1.3 g/L). Bei Temperaturen von 12–42 °C weisen diese Grundwässer neutrale bis leicht alkalische pH-Werte bei geringen bis hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-3).

Im *Keuper-Aquifer* finden sich in Tiefen von rund 700–2'100 m unter der Oberfläche ausschliesslich saline bis hoch-saline Grundwässer (TDS = 9.6–38 g/L) vom Na-SO<sub>4</sub>- und Na-Cl-Typ. Die Salinität dieser Grundwässer ist in den meisten Fällen auf die Lösung von Steinsalz zurückzuführen. Bei Temperaturen von 42–75 °C weisen diese Grundwässer leicht saure bis leicht alkalische pH-Werte bei meist moderaten totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-3).

Im *Muschelkalk-Aquifer* findet sich in Tiefen von rund 810–2'200 m unter der Oberfläche das ganze Spektrum von schwach mineralisiert über hoch-salin bis zu Solen (TDS = 2.2–145 g/L) als Folge von lokal vorhandener intensiver Salzlösung. Schwach mineralisierte Grundwässer sind vom Ca-SO<sub>4</sub>-Typ, während die hoch-salinen Grundwässer und Solen vom Na-Cl-Typ sind. Bei Temperaturen von 50–78 °C weisen diese Grundwässer entsprechend ihrer Salinität leicht saure bis alkalische pH-Werte bei geringen bis hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-3).

Im *Buntsandstein-Aquifer* finden sich in Tiefen von rund 40–1'500 m unter der Oberfläche und in Abhängigkeit der geographischen Lage Süsswasser bis salines Wasser (TDS = 0.7–15.8 g/L). Die als Na-HCO<sub>3</sub>-(Cl)-, NaCl-SO<sub>4</sub>- und seltener als Na-Cl-Typ vorliegenden Grundwässer weisen bei Temperaturen von 12–68 °C saure bis alkalische pH-Werte bei geringen bis hohen totalen Alkalinitäten auf (Tab. 5-3).

### Alpennordrand

Daten über Tiefengrundwässer liegen aus den Helvetischen Decken am Wellenberg, Oberbauenstock und Lötschbergtunnel vornehmlich aus Kalken der Kreide und des Juras und aus Sandsteinen des Nordhelvetischen Flyschs aus Tiefen von rund 70–1'500 m unter der Oberfläche vor (Tab. 5-4). Das dort vorhandene Grundwasser ist mehrheitlich Süsswasser bis schwach mineralisiert (TDS = 1.3 ± 0.7 g/L) und nur gerade zwei Vorkommen lieferten stark mineralisiertes Grundwasser (TDS = 3.4–4.7 g/L). Die Grundwässer sind mehrheitlich vom Na-HCO<sub>3</sub>-Typ, aber auch Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>- und komplexere Typen sind vorhanden. Bei Temperaturen von 10–53 °C weisen diese Grundwässer neutrale bis alkalische pH-Werte bei geringen bis sehr hohen totalen Alkalinitäten auf.

### Alpenraum

Daten über Tiefengrundwässer aus dem Alpenraum sind entsprechend ihrem Vorkommen und ihren unterschiedlichen Lithologien in den Kristallinmassiven und den penninischen und ostalpinen Decken eingeteilt (Tab. 5-4). Die tabellierten Grundwässer aus dem Aiguilles-Rouges-, Mont-Blanc- und Aar-Massiv (Grimselgebiet) zirkulieren rein in granitischen Gesteinen. Demgegenüber stammen die Grundwässer aus der Gotthardregion des Aar-Massivs neben granitischen Gesteinen auch aus (alten) Gneisen und Metasedimenten. Tiefengrundwässer aus den

penninischen und ostalpinen Decken im Alpenraum sind entsprechend ihrem Auftreten in kristallinen Gneis-Lithologien und in den mesozoischen Sedimentdecken unterteilt (vgl. Abschnitt 3.5).

Tiefengrundwässer im Aiguilles-Rouges- und Mont-Blanc-Massiv sowie im Grimselgebiet sind Süßwässer mit sehr geringer Mineralisation von durchschnittlich  $< 100$  mg/L (Tab. 5-4). Aufgrund der geringen Mineralisation ergeben sich viele (komplexe) chemische Typen. Bei Temperaturen von nur gerade  $1\text{--}28^\circ\text{C}$  weisen diese Grundwässer mehrheitlich alkalische pH-Werte und sehr geringe totale Alkalinitäten auf, wobei letztere nicht mehr nur der Karbonat-Alkalinität entspricht.

Tiefengrundwasser im Aar-Massiv der Gotthardregion ist mehrheitlich Süßwasser bis schwach mineralisiert ( $\text{TDS} = 1.1 \pm 1.4$  g/L, Tab. 5-4), wobei in den Gneisen und Metasedimenten vereinzelt auch stark mineralisierte Grundwässer auftreten ( $\text{TDS} = 3\text{--}4$  g/L). Die Grundwässer weisen in Tiefen von rund  $300\text{--}2350$  m unter der Oberfläche Temperaturen von  $21\text{--}46^\circ\text{C}$  auf. Die pH-Werte und die totale Alkalinität reflektieren ebenfalls die Lithologie, in welcher sich die Grundwässer entwickeln, und variieren von sauer bis alkalisch bzw. von gering bis hoch (Tab. 5-4).

In Gneisen der penninischen und ostalpinen Decken finden sich vornehmlich Süßwässer ( $\text{TDS} = 0.7 \pm 0.5$  g/L, Tab. 5-4), wobei auch schwach mineralisierte Tiefengrundwässer mit einer Mineralisation bis rund  $2.3$  g/L vorhanden sind. Bei Temperaturen von  $14\text{--}65^\circ\text{C}$  weisen diese Grundwässer mehrheitlich neutrale bis alkalische pH-Werte bei geringen totalen Alkalinitäten auf. Dabei entspricht die totale Alkalinität nicht mehr nur der Karbonat-Alkalinität.

In den mesozoischen Sedimenten der penninischen und ostalpinen Decken finden sich schwach bis stark mineralisierte Grundwässer ( $\text{TDS} = 2.2 \pm 1.1$  g/L Tab. 5-4). Die bekannten Tiefengrundwässer sind mehrheitlich vom  $\text{Ca-SO}_4$ - und  $\text{Ca-Na-SO}_4$ -Typ und stammen somit aus den Sedimenten der Trias dieser Decken. Die Grundwässer weisen in Tiefen von rund  $10\text{--}1600$  m unter der Oberfläche durchschnittlich geringere Temperaturen ( $15\text{--}37^\circ\text{C}$ ) auf, als die Grundwässer in den Gneisen der penninischen und ostalpinen Decken in ähnlichen Tiefen ( $10\text{--}1500$  m,  $14\text{--}65^\circ\text{C}$ ). Zudem weisen die Grundwässer aus den Sedimenten der penninischen und ostalpinen Decken gegenüber denjenigen aus den Gneislithologien auch eher saure bis neutrale pH-Werte und moderate Alkalinitäten auf (Tab. 5-4).

### Nordschweiz, Grundgebirge

Innerhalb der Untersuchungen der Nagra wurden in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts aus mehreren Tiefbohrungen auch Grundwasser aus dem unter die mesozoischen Sedimente abtauchenden kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz entnommen. Diese Grundwässer stammen vorwiegend aus Gneisen und etwas weniger häufig aus Graniten (vgl. Waber & Traber 2022 und dortige Referenzen).

Tiefengrundwasser im Kristallin der Nordschweiz ist meist von Süßwasser- bis schwach-mineralisierter Natur ( $\text{TDS} = 1.2 \pm 0.7$  g/L). Gelegentlich wurden auch stark mineralisierte Grundwässer angetroffen. Wie in den anderen Kristallin-Gesteinen ergibt sich durch die geringe Mineralisation eine Vielfalt von chemischen Typen (Tab. 5-4).

In Tiefen von rund  $250\text{--}1670$  m unter der Oberfläche weisen diese Grundwässer Temperaturen von  $17\text{--}66^\circ\text{C}$  und mehrheitlich alkalische pH-Werte bei geringen totalen Alkalinitäten, welche nicht mehr nur der Karbonat-Alkalinität entsprechen, auf (Tab. 5-4).

## **5.2.2 Redox-Bedingungen**

Die Redox Bedingungen in Tiefengrundwässern verändern sich mit zunehmender Verweilzeit im Untergrund und damit zunehmender Wechselwirkung mit dem Gestein. Unabhängig von ihrem Auftreten in geo-tektonischen Grossräumen und hydrogeologischen Einheiten weisen die

Tiefengrundwässer schwach oxidierende bis stark reduzierende Redoxpotentiale auf (vgl. Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Diese Redoxpotentiale gehen einher mit geringen Gehalten von gelöstem  $O_2$  von  $< 2$  mg/L bzw. mit einer vollständigen Sauerstoffzehrung. Eine Ausnahme stellen Tiefengrundwässer im granitischen Kristallin der Aiguilles-Rouges- und Mont-Blanc-Massive dar. Entlang von verbundenen Kluftnetzwerken und Störungszonen zirkulieren hier oxidierende Grundwässer mit teilweise grossen Schüttungen bis in mehrere 100 m Tiefe (Dubois 1991). In den deutlich weniger ergiebigen Vorkommen von Tiefengrundwasser im granitischen Kristallin des Grimselgebiets liegen demgegenüber aber mehrheitlich reduzierende Verhältnisse vor.

Mit zunehmend reduzierenden Bedingungen in den Tiefengrundwässern liegt gelöstes Eisen (Fe) in seiner reduzierten Form als  $Fe^{2+}$  vor. Die erhöhten  $Fe^{2+}$ -Gehalte von bis gegen 100 mg/L gehen mit der zunehmenden Mineralisation unabhängig von der geo-tektonischen Lage der Aquifere einher. Demgegenüber scheint eine gewisse Abhängigkeit von der Aquifer-Lithologie und den hydraulischen Bedingungen vorhanden zu sein. So werden die höchsten  $Fe^{2+}$ -Gehalte in den stark mineralisierten bis salinen Tiefengrundwässern im Malm- und Muschelkalk-Aquifer beobachtet, wo eine reduzierte hydraulische Dynamik vorherrscht. Demgegenüber finden sich in den kalkigen und sandigen Lithologien der hydrogeologischen Einheiten der OSM und OMM, im Malm-Aquifer des Tafeljuras und Faltenjuras, im Muschelkalk des Faltenjuras und besonders den Kristallingesteinen deutlich geringere Gehalte an gelöstem Fe (vgl. Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Im Unterschied zu gelöstem Fe liegen die Gehalte von gelöstem Mn in ähnlich geringen Bereichen, wie in den oberflächennahen Festgesteinen.

Während gelöstes Sulfat ( $SO_4^{-2}$ ) immer noch die dominierende Schwefel-Spezies ist, treten mit zunehmend reduzierenden Bedingungen vermehrt auch reduzierte Schwefel-Spezies (zusammengefasst als  $HS^-$ ) auf (vgl. Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Die weitaus höchsten Gehalte von  $SO_4^{-2}$  von mehreren g/L finden sich unabhängig von der geo-tektonischen Lage in den durch Sulfatmineralisierung geprägten Tiefengrundwässern der Aquifere in den Triasgesteinen. Gehalte von  $SO_4^{-2}$  von  $> 1$  g/L finden sich auch im Haupttrogenstein-Aquifer im Juragebirge und im Malm-Aquifer und der USM im Mittelland. Im tiefliegenden Malm-Aquifer im Mittelland ist in quasi-stagnierenden Tiefengrundwässern das gelöste  $SO_4^{-2}$  teilweise fast vollständig reduziert. In den Tiefengrundwässern aus Kristallingestein sind die Gehalte von  $SO_4^{-2}$  meist gering und liegen durchschnittlich deutlich unterhalb 0.5 g/L.

Die höchsten Gehalte von mehreren mg/L an gelöstem reduziertem Schwefel (zusammengefasst als  $HS^-$ ) sind über alle geo-tektonischen Grossräume in den tiefgelegenen Muschelkalk-Grundwässern zu beobachten (Tab. 5-5 bis Tab. 5-8), wie das aus den balneologisch genutzten Thermalwässern gut bekannt ist. Demgegenüber haben die ebenfalls hoch  $SO_4$ -haltigen Tiefengrundwässer im Keuper-Aquifer, wenn überhaupt, nur sehr geringe Gehalte an  $HS^-$ . In allen übrigen hydrogeologischen Einheiten werden in Abhängigkeit von der Ergiebigkeit des Vorkommens höchstens Spuren von  $HS^-$  beobachtet oder die Gehalte liegen unter der Nachweisgrenze.

Im Gegensatz zu den oberflächennahen Festgestein-Grundwässern sind die Gehalte von gelöstem Nitrat ( $NO_3^-$ ) in den Tiefengrundwässern viel geringer und liegen meist unter 1 mg/L (Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Ausnahmen hiervon sind Tiefengrundwässer mit kurzer Verweilzeit und guter Anbindung an die Oberflächenwässer. So werden z.B. im Malm-Aquifer im Faltenjura vereinzelt  $NO_3^-$ -Gehalte von bis zu 6 mg/L beobachtet. Entsprechend den mit zunehmender Wechselwirkung mit dem Gestein zunehmend reduzierenden Bedingungen weisen die Tiefengrundwässer erhöhte Gehalte an reduzierten Stickstoff-Spezies ( $NO_2^-$  und  $NH_4^+$ ) auf. Die höchsten Gehalte an Ammonium ( $NH_4^+$ ) von durchschnittlich bis gegen 10 mg/L sind in Grundwässern in den tiefliegenden Aquifere der USM und des Muschelkalks im zentralen Molassebecken im Mittelland vorhanden. Demgegenüber liegen die  $NO_2^-$ -Gehalte in allen Tiefengrundwässern meist deutlich unterhalb 0.1 mg/L (Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Zu erwähnen ist, dass aufgrund der langsamen Reaktionskinetik und ohne mikrobielle Aktivität das thermodynamische Gleichgewicht im Stickstoff-System kaum je erreicht ist.

Die Konzentrationen von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) liegen in den Tiefengrundwässern in einem Bereich von  $< 1$  mg/L bis rund 2 mg/L (Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Vereinzelt höhere Konzentration sollten mit einer gewissen Vorsicht genossen werden, da der Hauptanteil von vorhandenen Tiefengrundwässern aus Bohrungen entnommen wurde und hier auch Kontamination durch den Bohrprozess vorliegen kann. Die Gehalte von gelöstem totalem Phosphor sind in allen Tiefengrundwässern durchschnittlich deutlich kleiner als 0.1 mg/L (Tab. 5-5 bis Tab. 5-8). Ausnahmen hiervon sind wiederum Grundwässer in den tiefliegenden Aquiferen im Muschelkalk im zentralen Molassebecken im Mittelland und in den Trias-Aquiferen am Alpennordrand.

### 5.2.3 Metallische Spurenelemente

Analysen von metallischen Spurenelementen liegen praktisch nur von der hydrochemischen Datenbank der Nagra (v.a. Tiefbohrungen) und dem AQUITYP-Projekt für vereinzelte Elemente in Tiefengrundwässern aus Kristallingesteinen vor. Diese Analysen decken nicht alle geo-tektonischen Grossräume ab und sind statistisch nicht relevant. Besonders aus den Molasse-Einheiten im Mittelland, den mesozoischen Einheiten im westlichen Mittelland und dem Juragebirge sind nur sehr wenige oder gar keine Analysen vorhanden (Tab. 5-9 bis Tab. 5-12). Für aus Bohrungen gewonnene Tiefengrundwässer ist für die Buntmetalle wie Kupfer, Nickel, Blei und Zink zudem eine gewisse Vorsicht geboten, weil diese durchaus auch durch den Bohrprozess kontaminiert sein könnten. Eine solche Kontamination kann (muss aber nicht) durch eine Korrelation dieser Metalle in einer Grundwasseranalyse angezeigt sein und kann kaum korrigiert werden. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass die Konzentrationen dem in situ Tiefengrundwasser entsprechen, wenn genügend Wasser aus der Bohrung gefördert werden konnte und die Konzentrationen der künstlichen Tracer, welche der Bohrspülung zugegeben wurden, sehr tief sind. Dies wird durch sehr vergleichbare Spurenelementgehalte in Tiefengrundwasser von Mineralquellen bestätigt (z.B. Högl 1980).

Generell zeigen die Konzentrationen von metallischen Spurenelementen eine Abhängigkeit von der geo-tektonischen Lage und dem Aquifer-Gestein, aus welchem das Tiefengrundwasser gefördert wurde. Gegenüber den oberflächennahen Festgestein-Grundwässern liegen ähnliche geringe aber mehrheitlich doch erhöhte Konzentrationen vor. Einige typische Trends sind (vgl. Tab. 5-9 bis Tab. 5-12):

- Arsen (As) ist im Malm-Aquifer und Hauptrogenstein-Aquifer im Alpen Vorland, dem Juragebirge und dem westlichen Mittelland nicht nachweisbar oder in Konzentrationen von  $< 5$   $\mu\text{g/L}$  vorhanden. In der OMM und USM des östlichen Mittellands, im Keuper-Aquifer des Faltenjuras und dem Kristallin des Gotthardgebiets finden sich Konzentrationen von rund 5–15  $\mu\text{g/L}$ . Durchschnittliche As-Konzentrationen von 20–50  $\mu\text{g/L}$  sind in Tiefengrundwässern im Keuper- und Muschelkalk-Aquifer des Tafeljuras, des Faltenjuras, des östlichen Mittellands, des Alpennordrands und des granitischen Kristallins im Aiguilles-Rouges-, Mont-Blanc- und Aar-Massiv vorhanden. Höhere As-Konzentrationen von bis  $> 100$   $\mu\text{g/L}$  weisen Tiefengrundwässer im Malm- und Buntsandstein-Aquifer im östlichen Mittelland sowie im Kristallin des Nordschweizer Grundgebirges auf. Aufgrund der meist (stark) reduzierenden Verhältnisse in diesen Tiefengrundwässern liegt gelöstes As mehrheitlich als dreiwertiges  $\text{As}^{\text{III}}$  (Arsenit,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  oder  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) oder als  $\text{As}^{\text{III}}$ -Sulphid-Komplexe vor. Bei Veränderungen der Redox-Bedingungen wird dreiwertiges  $\text{As}^{\text{III}}$  leicht zu fünfwertigem  $\text{As}^{\text{V}}$  (Arsenat) oxidiert.
- Chrom (Cr) wurde nur in wenigen Tiefengrundwässern bestimmt. Im Keuper-Aquifer des Faltenjuras und des östlichen Mittellands und im Muschelkalk-Aquifer des Tafeljuras liegen die Konzentrationen bei rund 5–10  $\mu\text{g/L}$ . Deutlich höhere Cr-Gehalte von  $> 50$   $\mu\text{g/L}$  wurden

an tiefen Muschelkalk-Grundwässern im östlichen Mittelland bestimmt. Keine Analysen liegen aus den Molasse-Einheiten im Mittelland und aus dem Alpenraum vor.

- Kupfer (Cu) liegt im Malm-Aquifer und Hauptrogenstein-Aquifer des Tafeljuras, Faltenjuras und Mittellands, in der USM im östlichen Molassebecken und im Muschelkalk-Aquifer des Tafeljuras und Faltenjuras in Konzentrationen von durchschnittlich rund 5–10 µg/L vor. In der OMM des Mittellands, im tiefen Muschelkalk und Buntsandstein des Mittellands und am Alpennordrand liegen höhere Cu-Konzentrationen von > 30 µg/L vor.
- Nickel (Ni) liegt in den Tiefengrundwässern in den Molasse-Einheiten OSM, OMM und USM meist unterhalb von 5 µg/L vor. In den Grundwässern aus den Keuper-, Muschelkalk- und Buntsandstein-Aquiferen im Tafeljura, Faltenjura und Mittelland und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz sind die Ni-Gehalte eher zwischen 5–15 µg/L, gefolgt von noch höheren Gehalten im tiefen Muschelkalk-Aquifer im Mittelland und den Tiefengrundwässern am Alpennordrand (> 40 µg/L).
- Zink (Zn) kommt in Gehalten von < 10 µg/L einzig in den Tiefengrundwässern der USM im östlichen Mittelland vor. In allen übrigen Tiefengrundwässern liegen die Zn-Gehalte durchschnittlich über 20 µg/L und können im Muschelkalk-Aquifer und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz bis zu 500 µg/L erreichen.
- Uran (U) ist in den in den von Aluminosilikat-Mineralen dominierten Aquiferen des Buntsandsteins und der diversen Kristallingesteine deutlich angereichert und erreicht dort Konzentrationen von rund 10–180 µg/L. In allen anderen Tiefengrundwässern liegen die Konzentrationen mehrheitlich unterhalb 1 µg/L.

Tab. 5-1: Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, Pearson et al. 2003, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Waber & Rufer 2017. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Tiefen-interval	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
Tafeljura Malm	Analysen Total		2	2	2	2	2	Ca-HCO <sub>3</sub> Na-[HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl]
	Anzahl Messwerte		2	2	2	2	2	
	Anzahl Lokalitäten: 2	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	70-160	869	724	17.9	7.50	5.97	
	Standardabweichung		232	159	3.0	0.60	0.62	
	Minimum		705	612	15.8	7.07	5.53	
	Maximum		1033	837	20.0	7.92	6.41	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
Faltenjura Malm	Analysen Total		12	14	13	12	15	Ca-HCO <sub>3</sub> Mg-Ca-HCO <sub>3</sub> -(SO <sub>4</sub> ) Na-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		12	14	13	12	15	
	Anzahl Lokalitäten: 14	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	150-680	839	648	18.1	7.42	6.29	
	Standardabweichung		1062	505	4.1	0.19	2.26	
	Minimum		379	334	12.6	7.20	4.08	
	Maximum		4180	2290	22.2	7.75	9.49	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
Faltenjura Hauptrogenstein	Anzahl Messwerte		7	7	7	7	6	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-HCO <sub>3</sub> Na-HCO <sub>3</sub>
	Analysen Total		7	7	7	7	6	
	Anzahl Lokalitäten: 7	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	90-370	1433	1153	16.6	7.44	4.78	
	Standardabweichung		2191	1542	4.4	0.37	0.69	
	Minimum		319	322	12.0	7.13	3.56	
	Maximum		6390	4635	22.3	8.20	5.40	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
Tafeljura & Faltenjura Keuper	Analysen Total		3	3	3	3	3	Na-SO <sub>4</sub> -Cl Na-SO <sub>4</sub>
	Anzahl Messwerte		3	3	3	3	3	
	Anzahl Lokalitäten: 3	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	100-660	10515	10561	30.7	8.10	5.34	
	Standardabweichung		7459	7823	11.4	0.52	2.95	
	Minimum		2000	1540	17.6	7.50	3.53	
	Maximum		15894	15479	38.0	8.40	8.75	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
Tafeljura Muschelkalk	Analysen Total		23	24	24	23	22	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> Ca-SO <sub>4</sub> Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		23	24	24	23	22	
	Anzahl Lokalitäten: 24	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	50-1550	5728	4872	26.0	6.77	5.38	
	Standardabweichung		6719	4999	13.2	0.38	1.25	
	Minimum		750	739	12.4	5.74	3.29	
	Maximum		21400	16982	61.4	7.25	8.03	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
Faltenjura Muschelkalk	Analysen Total		37	37	37	36	35	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> Ca-SO <sub>4</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		37	37	37	37	35	
	Anzahl Lokalitäten: 37	m	µS/cm	mg/L	°C	-log <sub>a</sub> H <sup>+</sup>	meq/L	
	Durchschnitt	0-580	3181	2957	35.3	6.53	6.75	
	Standardabweichung		1947	1623	13.4	0.36	1.59	
	Minimum		523	495	8.8	6.15	4.38	
	Maximum		5540	4600	48.0	7.33	8.56	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							

Tab. 5-2: Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten im Mittelland der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Tiefen-interval	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
<b>Mittelland Ost Molasse alle</b>  Anzahl Lokalitäten: 15	Analysen Total		15	15	14	14	13	Na-Cl Na-HCO <sub>3</sub>  weniger häufig: Na-Cl-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		15	15	14	14	13	
		<b>m</b>	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>aH+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	100-2390	7945	5809	25.5	7.83	5.76	
	Standardabweichung		10581	7460	15.9	0.70	2.22	
	Minimum		557	611	11.8	6.32	2.51	
	Maximum		42000	29561	64.0	8.66	9.46	
Anzahl Analysen < BG							0	
Bestimmungsgrenze BG								
<b>Mittelland West Molasse alle</b>  Anzahl Lokalitäten: 3	Analysen Total		3	3	3	3	3	Na-Cl
	Anzahl Messwerte		3	3	3	3	3	
		<b>m</b>	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>aH+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	450-760	7677	5220	27.0	7.50	3.60	
	Standardabweichung		1181	1333	4.4	0.30	1.15	
	Minimum		6730	4218	22.0	7.15	2.39	
	Maximum		9000	6733	30.0	7.72	4.68	
Anzahl Analysen < BG							0	
Bestimmungsgrenze BG								
<b>Mittelland, OSM</b>  Anzahl Lokalitäten: 1	Analysen Total		1	1	1	1	1	Na-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		1	1	1	1	1	
		<b>m</b>	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>aH+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	315-322						
	Standardabweichung							
	Minimum		1000	881	17.3	8.18	8.22	
	Maximum		1000	881	17.3	8.18	8.22	
Anzahl Analysen < BG							0	
Bestimmungsgrenze BG								
<b>Mittelland, OMM</b>  Anzahl Lokalitäten: 3	Analysen Total		3	3	3	3	3	Na-HCO <sub>3</sub> Na-Cl Na-Cl-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		3	3	3	3	3	
		<b>m</b>	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>aH+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	330-716	2246	1847	25.1	8.36	6.32	
	Standardabweichung		1970	1569	3.0	0.51	1.28	
	Minimum		1037	830	23.0	7.77	4.84	
	Maximum		4520	3654	28.5	8.66	7.12	
Anzahl Analysen < BG							0	
Bestimmungsgrenze BG								
<b>Mittelland, USM</b>  Anzahl Lokalitäten: 14	Analysen Total		14	14	13	14	12	Na-Cl Na-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		14	14	13	14	12	
		<b>m</b>	<b>µS/cm</b>	<b>mg/L</b>	<b>°C</b>	<b>-log<sub>aH+</sub></b>	<b>meq/L</b>	
	Durchschnitt	100-2390	9604	6884	26.5	7.80	4.88	
	Standardabweichung		10298	7292	16.4	0.94	2.26	
	Minimum		557	611	11.8	6.32	2.39	
	Maximum		42000	29561	64.0	10.30	9.46	
Anzahl Analysen < BG							0	
Bestimmungsgrenze BG								

Tab. 5-3: Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Guglielmetti et al. 2022. Das einzige Buntsandstein-Grundwasser aus dem Tafeljura ist hier unter Mittelland Ost zusammengefasst. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Tiefen-interval	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
<b>Mittelland Ost Malm</b>	Analysen Total		7	9	9	9	9	Na-Cl Na-[HCO3-SO4-Cl]
	Anzahl Messwerte		7	9	9	9	9	
	Anzahl Lokalitäten: 9	m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>H+</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	240-1510	13835	9521	28.9	7.27	12.5	
	Standardabweichung		11125	5174	12.8	0.73	6.8	
	Minimum		4940	3593	16.0	6.39	3.1	
	Maximum		37800	20591	60.0	8.37	23.0	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland West Malm</b>	Analysen Total		11	14	12	10	12	Ca-HCO3 Na-HCO3 Na-Cl Na-[HCO3-SO4-Cl]
	Anzahl Messwerte		11	14	12	10	12	
	Anzahl Lokalitäten: 11	m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>H+</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	20-2120	1046	4159	27.8	7.56	4.98	
	Standardabweichung		763	6868	11.0	0.60	1.89	
	Minimum		234	222	12.0	6.95	2.07	
	Maximum		2500	18601	42.0	8.92	8.05	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland Ost Keuper</b>	Analysen Total		4	5	5	4	4	Na-SO4 Na-SO4-Cl Na-Cl
	Anzahl Messwerte		4	5	5	4	4	
	Anzahl Lokalitäten: 5	m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>H+</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	700-2090	25725	18762	55.9	7.14	8.37	
	Standardabweichung		17974	11757	11.9	0.49	6.18	
	Minimum		11590	9597	42.0	6.62	4.56	
	Maximum		49300	38093	75.0	7.80	17.60	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland Ost Muschelkalk</b>	Analysen Total		10	12	12	11	10	Ca-SO4 Na-Cl weniger häufig: Ca-Na-SO4-Cl
	Anzahl Messwerte		10	12	12	11	10	
	Anzahl Lokalitäten: 12	m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>H+</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	810-2190	22875	30016	57.5	6.41	5.78	
	Standardabweichung		35511	49155	8.1	0.81	3.37	
	Minimum		2360	2244	46.0	5.00	3.45	
	Maximum		107990	145231	78.0	8.14	14.76	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Mittelland Ost &amp; Tafeljura Buntsandstein</b>	Analysen Total		10	14	14	14	14	Na-Cl-SO4 weniger häufig: Na-HCO3-(Cl) Na-Cl
	Anzahl Messwerte		10	14	14	14	14	
	Anzahl Lokalitäten: 14	m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>H+</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	40-1500	6034	6643	28.1	7.02	9.17	
	Standardabweichung		5408	5274	18.9	0.66	3.17	
	Minimum		793	674	12.2	6.05	4.48	
	Maximum		15813	15854	68.0	8.08	14.04	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							

Tab. 5-4: Physikalisch-chemische Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, AQUITYP Projekt, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Waber et al. 2017, Stober et al. 2023. TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Tiefen-interval	Elektr. Leitfähigkeit	TDS	T	pH	Totale Alkalinität	Chem. Wasser Typ
<b>Alpennordrand Helvetikum &amp; Penninikum Kreide, Malm, Trias</b> Anzahl Lokalitäten: 53	Analysen Total		53	53	49	53	34	Na-HCO <sub>3</sub> Ca-SO <sub>4</sub>  weniger häufig: Na-[HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl] Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		53	53	49	53	34	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	71-1475	1668	1378	28.4	8.08	16.1	
	Standardabweichung		1078	864	14.3	0.74	9.55	
	Minimum		370	307	10.5	6.56	1.93	
	Maximum		5120	4706	53.2	9.30	39.1	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Alpenraum Kristallin I Aiguilles-Rouge, Mont-Blanc, Aar-Massiv (Grimmel)</b> Anzahl Lokalitäten: 111	Analysen Total		175	186	182	139	183	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-HCO <sub>3</sub> Na-SO <sub>4</sub> -TIC Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>  weniger häufig: Na-Ca-TIC-F Na-Ca-TIC-F-SO <sub>4</sub>
	Anzahl Messwerte		175	186	182	139	183	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	100-450	86	82	10.3	8.33	0.65	
	Standardabweichung		62	65	4.7	1.21	0.27	
	Minimum		20	22	0.2	5.90	0.15	
	Maximum		420	414	28.0	10.73	1.70	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Alpenraum Kristallin II Gothard- &amp; Aar-Massiv Kristallin &amp; Metasedimente</b> Anzahl Lokalitäten: 252	Analysen Total		252	252	252	252	239	Na-HCO <sub>3</sub> Na-SO <sub>4</sub> -TIC Na-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Na-Cl-HCO <sub>3</sub> Na-SO <sub>4</sub> -Cl weniger häufig: Na-TIC-F-SO <sub>4</sub> Ca-Na-SO <sub>4</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Na-Cl
	Anzahl Messwerte		252	252	252	252	239	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	305-2350	1076	753	37.0	8.68	2.56	
	Standardabweichung		1470	980	6.9	1.21	3.08	
	Minimum		120	103	21.4	5.45	0.02	
	Maximum		5980	4017	45.9	10.45	12.99	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Alpenraum Penninikum &amp; Ostalpin Gneise</b> Anzahl Lokalitäten: 40	Analysen Total		40	40	40	35	40	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Na-Ca-SO <sub>4</sub> Na-SO <sub>4</sub> -Cl
	Anzahl Messwerte		40	40	40	35	40	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	10-1500	847	708	28.4	7.77	2.18	
	Standardabweichung		547	451	14.1	0.55	0.96	
	Minimum		154	141	14.6	6.63	0.16	
	Maximum		2580	2304	65.3	9.07	4.97	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Alpenraum Penninikum &amp; Ostalpin Metasedimente</b> Anzahl Lokalitäten: 25	Analysen Total		22	25	25	21	25	Ca-SO <sub>4</sub> Ca-Na-SO <sub>4</sub> -Cl Ca-HCO <sub>3</sub>
	Anzahl Messwerte		22	25	25	21	25	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	10-1600	2557	2275	22.9	6.86	5.87	
	Standardabweichung		1680	1151	6.0	0.40	4.51	
	Minimum		432	416	14.7	6.25	1.47	
	Maximum		6400	4950	36.5	7.60	18.7	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							
<b>Nordschweiz Grundgebirge Schwarzwald-Kristallin Granit &amp; Gneise</b> Anzahl Lokalitäten: 29	Analysen Total		28	29	29	28	27	Na-SO <sub>4</sub> -[HCO <sub>3</sub> /Cl] Na-SO <sub>4</sub> Na-HCO <sub>3</sub> Na-Cl
	Anzahl Messwerte		28	29	29	27	27	
		m	µS/cm	mg/L	°C	-loga <sub>++</sub>	meq/L	
	Durchschnitt	250-1670	1485	1220	39.8	8.08	3.25	
	Standardabweichung		699	690	13.5	0.64	2.31	
	Minimum		730	619	17.1	6.28	0.52	
	Maximum		4685	4510	66.0	9.09	6.60	
	Anzahl Analysen < BG						0	
	Bestimmungsgrenze BG							

Tab. 5-5: Redox-Parameter von Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, Pearson et al. 2003, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Waber & Rufer 2017, Guglielmetti et al. 2022.

Redox-Spezien Eisen, Schwefel und Stickstoff sind nicht immer an allen Proben analysiert worden, so dass statistische Werte nicht zusammenpassen.

Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P
Tafeljura Malm	Analysen Total	0	0	0	2	0	2	0	2	2	2	0	1
	Anzahl Messwerte				2		2		1	0	1		0
	Anzahl Lokalitäten: 2	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt				0.03		148						
	Standardabweichung				0.01		124						
	Minimum				0.02		61		1.00		2.50		
Maximum				0.03		236		1.00		2.50			
Anzahl Analysen < BG				0	0	0		1	2	1	0	1	
Bestimmungsgrenze BG				<0.01				<0.1	<0.01	<0.5		<0.1	
Faltenjura Malm	Analysen Total	4	3	7	7	0	16	0	1	0	3	3	0
	Anzahl Messwerte	4	3	6	5		16	0	1		3	3	0
	Anzahl Lokalitäten: 14	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	8	1.95	0.037	0.25		52.37				1.99	1.08	
	Standardabweichung	95	0.61	0.014	0.29		45.30				3.29	1.33	
	Minimum	-45	1.60	0.026	0.00		3.30		1.00		0.08	0.11	
Maximum	150	2.65	0.066	0.62		116.00		1.00		5.78	2.60		
Anzahl Analysen < BG	0	0	1	2		0		0		0	0		
Bestimmungsgrenze BG													
Faltenjura Hauptrogenstein	Anzahl Messwerte	4	2	2	3	1	7	0	2	2	5	2	2
	Analysen Total	4	3	3	3	3	7	1	3	3	6	3	3
	Anzahl Lokalitäten: 7	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	98	9.40	0.072	4.5		364		1.75	0.07	6.1	1.4	0.0065
	Standardabweichung	273	0.00	0.068	7.7		701		1.91	0.06	4.2	0.1	0.0049
	Minimum	-294	9.40	0.024	0.0	0.950	16		0.40	0.02	1.0	1.3	0.0030
Maximum	335	9.40	0.120	13.4	0.950	1950		3.10	0.11	12.6	1.4	0.0100	
Anzahl Analysen < BG	0	1	1	0	2	0	1	1	1	1	0	1	
Bestimmungsgrenze BG							<1	<BG	<BG	<0.2		<0.05	
Tafeljura & Faltenjura Keuper	Analysen Total	2	3	3	2	3	3	2	3	3	3	1	3
	Anzahl Messwerte	2	0	3	2	3	3	1	3	1	2	1	2
	Anzahl Lokalitäten: 3	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-423		0.21	13.72	7.27	4858		5.45		1.25		0.0060
	Standardabweichung	40		0.15	3.51	5.06	3784		4.77		1.06		0.0014
	Minimum	-451		0.08	11.23	3.40	500	0.99	0.06	0.060	0.50	1.40	0.0050
Maximum	-394		0.38	16.20	13.00	7314	0.99	9.10	0.060	2.00	1.40	0.0070	
Anzahl Analysen < BG	0	3	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	
Bestimmungsgrenze BG		<0.1					<0.1		<0.1	<BG		<0.05	
Tafeljura Muschelkalk	Analysen Total	14	19	21	12	19	24	21	22	20	23	10	20
	Anzahl Messwerte	14	8	20	12	18	24	6	15	8	7	10	10
	Anzahl Lokalitäten: 24	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-124	0.9	0.106	3.64	4.63	1376	14.8	0.47	0.022	1.75	1.48	0.077
	Standardabweichung	126	2.5	0.172	4.22	6.27	1030	35.9	0.70	0.028	2.89	1.57	0.128
	Minimum	-396	0.0	0.006	0.02	0.17	175	0.0	0.00	0.006	0.10	0.27	0.003
Maximum	54	7.1	0.740	12.40	21.70	3011	88.0	2.50	0.090	8.20	4.70	0.430	
Anzahl Analysen < BG	0	11	1	0	1	0	15	7	12	16	0	10	
Bestimmungsgrenze BG			<0.03		<0.01		<0.02	<0.01	<0.01	<0.2		<0.02	
Faltenjura Muschelkalk	Analysen Total	18	32	33	32	33	37	33	33	32	33	18	20
	Anzahl Messwerte	18	15	27	29	23	37	29	28	4	7	18	17
	Anzahl Lokalitäten: 37	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-119	2.8	0.029	0.26	0.32	1045	6.6	1.47	0.026	0.88	0.97	0.009
	Standardabweichung	196	3.3	0.013	0.70	0.76	496	13.6	4.31	0.016	0.75	0.58	0.009
	Minimum	-353	0.0	0.008	0.01	0.01	90	0.0	0.04	0.014	0.11	0.05	0.001
Maximum	200	8.6	0.059	2.90	2.80	1500	51.0	23.40	0.050	2.30	2.50	0.036	
Anzahl Analysen < BG	0	17	6	3	10	0	4	5	28	26	0	3	
Bestimmungsgrenze BG			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<BG	<BG	<0.1	<0.1		<0.003	

Tab. 5-6 Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten im Mittelland der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra.

Redox-Spezien Eisen, Schwefel und Stickstoff sind nicht immer an allen Proben analysiert worden, so dass statistische Werte nicht zusammenpassen.

Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P
<b>Mittelland Ost Molasse alle</b>	Analysen Total	7	11	11	9	11	15	10	13	11	11	7	10
	Anzahl Messwerte	7	5	7	9	9	15	3	13	2	1	6	8
	Anzahl Lokaltäten: 15	<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Durchschnitt	-178	1.9	0.012	0.073	3.4	496	0.034	0.65	0.077			0.0115
	Standardabweichung	165	1.5	0.013	0.049	6.5	536	0.033	0.82	0.104			0.0078
	Minimum	-340	0.4	0.000	0.002	0.1	20	0.000	0.00	0.003	0.40	0.25	0.0020
	Maximum	110	3.8	0.035	0.130	19.0	1912	0.065	3.00	0.150	0.40	0.53	0.0228
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG	0 b.d.	6 <0.01	4 <0.01	0 <0.01	2 b.d.	0 b.d.	7 <0.02	0 <0.01	9 <0.01	10 <0.1	1 <0.5	2 <0.003
<b>Mittelland West Molasse alle</b>	Analysen Total	0	0	0	0	2	3	0	1	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte					2	3		1				
	Anzahl Lokaltäten: 3	<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Durchschnitt					1.0	821.3						
	Standardabweichung					0.0	1290.3						
	Minimum					1.00	25.0		1.0				
	Maximum					1.00	2310		1.0				
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG					0	0		0				
<b>Mittelland, OSM</b>	Analysen Total	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	Anzahl Messwerte		0	0	1		1	0	1	0	0	0	1
	Anzahl Lokaltäten: 1	<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Durchschnitt												
	Standardabweichung												
	Minimum		0.0		0.12		105		0.2				0.015
	Maximum		0.0		0.12		105		0.2				0.015
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG		1	1	0		0	1	0	1	1	1	0
<b>Mittelland, OMM</b>	Analysen Total	2	3	3	3	2	3	2	3	3	3	2	2
	Anzahl Messwerte	2	2	2	3	1	3	1	3	0	0	2	2
	Anzahl Lokaltäten: 3	<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Durchschnitt	-115	1.1		0.08		384		0.59			0.38	0.005
	Standardabweichung	318	0.9		0.07		441		0.62		0.18	0.004	
	Minimum	-340	0.5		0.00	0.1	113	0.065	0.17		0.25	0.002	
	Maximum	110	1.8	0.01	0.13	0.1	893	0.065	1.30		0.50	0.007	
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG		1	2	0	1	0	1	0	3	3	0	0
<b>Mittelland, USM</b>	Analysen Total	5	7	7	6	11	14	7	10	7	7	4	7
	Anzahl Messwerte	5	3	6	6	10	14	2	10	2	1	4	5
	Anzahl Lokaltäten: 14	<b>mV</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>	<b>mg/L</b>
	Durchschnitt	-239	2.3	0.07	3.28	3.2	583	0.019	0.94	0.077		0.81	0.041
	Standardabweichung	102	1.8	0.14	7.90	5.7	731	0.026	1.03	0.104		0.80	0.061
	Minimum	-360	0.4	0.00	0.02	0.1	4.7	0.000	0.00	0.003	0.40	0.30	0.007
	Maximum	-126	3.8	0.36	19.40	19.0	2310	0.037	3.00	0.150	0.40	2.00	0.150
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG		4	1	0	1	0	5	0	5	6	0	2

Tab. 5-7: Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Guglielmetti et al. 2022.

Das einzige Buntsandstein-Grundwasser aus dem Tafeljura ist hier unter Mittelland Ost zusammengefasst.

Redox-Spezien Eisen, Schwefel und Stickstoff sind nicht immer an allen Proben analysiert worden, so dass statistische Werte nicht zusammenpassen.

Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P	
Mittelland Ost Malm	Analysen Total	5	5	7	4	8	9	6	7	6	6	3	6	
	Anzahl Messwerte	5	1	7	4	8	9	1	6	5	1	2	3	
	Anzahl Lokalitäten: 9	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung	-414		0.87	38.2	28.5	324		3.1	0.08		4.4	0.68
		Minimum	53		0.45	15.5	30.7	497		1.7	0.07		3.0	0.72
		Maximum	-460	0.02	0.25	24.6	0.0	3	0.21	1.5	0.01	1.8	2.2	0.14
		Anzahl Analysen < BG	-353	0.02	1.70	54.0	84.2	1437	0.21	6.3	0.19	1.8	6.5	1.50
		Bestimmungsgrenze BG		4	0	0	0	0	5	1	1	5	1	3
				<0.1					<0.1	<0.1	<0.01	<0.5	<1	<0.05
Mittelland West Malm	Analysen Total	0	2	3	3	1	14	1	3	2	7	0	1	
	Anzahl Messwerte		1	3	3	1	12	0	3	0	2		0	
	Anzahl Lokalitäten: 11	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung						268					2.6	
		Minimum			0.07		2.20	0		2.90		0.2		
		Maximum		1.32	0.30		2.20	1576		10.00		5.0		
		Anzahl Analysen < BG		1	0		0	2	1	0	2	5		1
		Bestimmungsgrenze BG							<0.1		<0.01	<0.1		<0.03
Mittelland Ost Keuper	Analysen Total	3	3	4	2	5	5	4	5	4	4	3	4	
	Anzahl Messwerte	3	1	3	2	3	5	2	5	4	2	2	3	
	Anzahl Lokalitäten: 5	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung	-390		0.08	2.57	0.95	4460	0.04	8.43	0.060	0.16	1.66	0.127
		Minimum	83		0.05	2.45	0.84	2000	0.01	4.38	0.038	0.08	1.47	0.129
		Maximum	-449	0.01	0.04	0.84	0.05	1532	0.03	3.85	0.010	0.10	0.62	0.020
		Anzahl Analysen < BG	-296	0.01	0.13	4.30	1.70	5963	0.04	14.20	0.090	0.22	2.70	0.270
		Bestimmungsgrenze BG		2	1	0	2	0	2	0	0	2	0	1
				<0.1	<0.05		<0.02		<0.1			<0.5		<0.05
Mittelland Ost Muschelkalk	Analysen Total	8	8	10	7	11	12	7	12	10	10	3	10	
	Anzahl Messwerte	8	2	9	7	10	12	2	12	3	2	3	7	
	Anzahl Lokalitäten: 12	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung	-384	1.1	0.666	10.6	19.3	2378	2.0	8.7	0.030	0.78	2.23	0.191
		Minimum	97	1.2	0.607	10.9	31.2	1904	2.8	16.6	0.010	0.32	1.66	0.357
		Maximum	-475	0.2	0.150	0.09	1.90	866	0.03	0.08	0.020	0.55	0.70	0.027
		Anzahl Analysen < BG	-173	2.0	2.100	27.0	105	8097	4.0	56.0	0.040	1.00	4.00	1.000
		Bestimmungsgrenze BG		6	1	0	1	0	5	0	7	8	0	3
				<0.001		<0.02		<0.1		<0.1	<0.01	<0.5		<0.05
Mittelland Ost & Tafeljura Buntsandstein	Analysen Total	10	3	13	11	13	14	8	14	12	12	10	12	
	Anzahl Messwerte	10	3	12	9	11	14	8	12	4	4	8	11	
	Anzahl Lokalitäten: 14	Durchschnitt	mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
		Standardabweichung	-183	0.93	0.30	7.77	5.98	2035	0.06	0.96	0.15	0.43	1.42	0.050
		Minimum	101	1.62	0.39	11.51	10.57	1937	0.11	1.77	0.20	0.43	1.33	0.085
		Maximum	-340	0.00	0.02	0.65	0.0001	155	0.01	0.15	0.02	0.00	0.13	0.004
		Anzahl Analysen < BG	0	2.80	1.30	36.0	35.0	6235	0.32	6.50	0.45	1.00	3.90	0.300
		Bestimmungsgrenze BG		0	1	2	2	0	0	2	8	8	2	1
					< BG	< BG	< BG		<0.01	<0.01	<0.1	<0.5	< BG	

Tab. 5-8: Redox-Parameter von Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, AQUITYP Projekt, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Waber et al. 2017, Stober et al. 2023.

Redox-Spezien Eisen, Schwefel und Stickstoff sind immer an allen Proben analysiert worden, so dass statistische Werte nicht zusammenpassen.

Eh Ag/AgCl: Redox-Wert relativ zur Ag/AgCl-Elektrode; Mn-tot: totales Mangan; Fe-tot: totales Eisen; DOC: gelöster organische Kohlenstoff; BG: Bestimmungsgrenze

Region / Geologie	Statistik	Eh Ag/AgCl	O <sub>2</sub>	Mn-tot	Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HS <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DOC	P
<b>Alpennordrand Helvetikum &amp; Penninikum Kreide, Malm, Trias</b> Anzahl Lokaltäten: 53	Analysen Total	18	0	27	10	20	53	13	31	0	33	14	26
	Anzahl Messwerte	18		24	9	18	34	7	30		8	13	15
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-261		0.12	1.01	0.62	332.8	7.52	0.51		2.10	2.1	0.171
	Standardabweichung	105		0.20	0.85	0.68	536.0	14.51	0.32		2.46	1.1	0.124
	Minimum	-414		0.01	0.05	0.02	0.8	0.00	0.02	0.00	0.10	0.6	0.020
	Maximum	-31		0.72	2.40	1.70	2286	40.00	1.20	0.00	7.10	4.0	0.400
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG			3 <0.005	1 <0.02	2 <0.03	0	6 <0.01	1 <0.01	0	25 <0.1	1 <0.5	11 <0.1
<b>Alpenraum Kristallin I Aiguilles-Rouge, Mont-Blanc, Aar-Massiv (Grimse)</b> Anzahl Lokaltäten: 111	Analysen Total	103	0	100	102	0	186	0	103	0	133	100	0
	Anzahl Messwerte	103		50	63		186		1		100	50	
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-67					14				0.38		
	Standardabweichung	155					17			0.77			
	Minimum	-248					0			0.02			
	Maximum	447					93			5.00			
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG			50 <0.001	39 <0.005		0		102 <0.1		33 <0.016	50 <0.5	
<b>Alpenraum Kristallin II Gotthard- &amp; Aar-Massiv Kristallin &amp; Metasedimente</b> Anzahl Lokaltäten: 252	Analysen Total	0	0	0	252	0	252	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte				149		252						
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt				0.23		168						
	Standardabweichung				0.37		296						
	Minimum				0.02		1.1						
	Maximum				2.88		1801						
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG				103 <0.02		0						
<b>Alpenraum Penninikum &amp; Ostalpin Gneise</b> Anzahl Lokaltäten: 40	Analysen Total	5	9	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte	5	9				40						
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	76	2.34				278						
	Standardabweichung	271	2.40				251						
	Minimum	-215	0.01				36.0						
	Maximum	466	6.35				1315						
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG			0			0						
<b>Alpenraum Penninikum &amp; Ostalpin Metasedimente</b> Anzahl Lokaltäten: 25	Analysen Total	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte						25						
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt						1097						
	Standardabweichung						575						
	Minimum						27.0						
	Maximum						2062						
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG						0						
<b>Nordschweiz Grundgebirge Schwarzwald-Kristallin Granit &amp; Gneise</b> Anzahl Lokaltäten: 29	Analysen Total	24	10	27	26	22	29	6	27	26	28	23	28
	Anzahl Messwerte	24	7	26	13	12	29	6	22	3	5	23	23
		mV	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Durchschnitt	-196	1.0	0.13	2.7	1.1	352	0.21	0.19	0.05	3.1	0.86	0.081
	Standardabweichung	124	2.2	0.13	4.3	1.4	180	0.23	0.16	0.00	5.6	0.90	0.233
	Minimum	-385	0.0	0.01	0.01	0.01	128	0.01	0.06	0.05	0.1	0.10	0.000
	Maximum	70	5.9	0.61	16.1	4.4	999	0.60	0.74	0.05	13.0	4.00	1.140
	Anzahl Analysen < BG Bestimmungsgrenze BG		3 <0.1	1 <0.01	13 <1	10 <1	0	0	5 <0.1	23 <0.01	23 <0.2	0 <0.5	5 <0.1

Tab. 5-9: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser im Tafeljura und Faltenjura der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, Pearson et al. 2003, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Waber & Rufer 2017, Guglielmetti et al. 2022. BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
<b>Tafeljura Malm</b> Anzahl Lokaltäten: 2	Analysen Total	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0
	Anzahl Messwerte	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Durchschnitt																	
	Standardabweichung																	
<b>Faltenjura Malm</b> Anzahl Lokaltäten: 14	Analysen Total	4	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	Anzahl Messwerte	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	Durchschnitt	17.9		121														
	Standardabweichung	15.6	60	60														
<b>Faltenjura Hauptrogenstein</b> Anzahl Lokaltäten: 7	Analysen Total	3	2	3	0	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	0	2
	Anzahl Messwerte	3	2	3	0	2	2	0	2	2	2	2	0	2	3	2	2	2
	Durchschnitt	638		1392					5.0									18
	Standardabweichung	1093		2345					5.0									17
<b>Tafeljura &amp; Faltenjura Keuper</b> Anzahl Lokaltäten: 3	Analysen Total	3	2	3	3	1	2	1	3	0	2	3	0	2	3	1	0	1
	Anzahl Messwerte	2	2	3	1	0	2	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
	Durchschnitt	58	8.5	4677			5.4											10
	Standardabweichung	38	9.2	3655			4.7											10
<b>Tafeljura Muschelkalk</b> Anzahl Lokaltäten: 24	Analysen Total	19	18	20	9	3	5	2	17	0	11	17	0	9	21	2	0	16
	Anzahl Messwerte	7	16	20	1	0	1	0	3	0	6	7	0	0	4	0	0	13
	Durchschnitt	477	38	1196					7.0		12.5	6.4			0.7			117
	Standardabweichung	1158	41	1528					7.0		18.8	3.2			0.2			154
<b>Faltenjura Muschelkalk</b> Anzahl Lokaltäten: 37	Analysen Total	32	20	33	1	17	1	0	20	0	19	20	0	18	36	17	0	19
	Anzahl Messwerte	9	15	33	1	0	0	0	16	0	11	8	0	2	10	2	0	15
	Durchschnitt	15	18.1	1572					5.3		3.1	4.0			0.7			20
	Standardabweichung	18	19.9	1265					6.7		1.6	1.7			0.2			20



Tab. 5-11: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten im Mittelland in der Schweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, Muralt 1999, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney. & Vuataz 2008), Guglielmetti et al. 2022. Das einzige Buntsandstein-Grundwasser aus dem Tafeljura ist hier unter Mittelland Ost zusammengefasst. BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Crtot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
<b>Mittelland Ost</b> <b>Malm</b> Anzahl Lokaltäten: 9	Analysen Total	6	6	8	6	1	6	4	6	0	6	6	0	5	7	1	0	6
	Anzahl Messwerte	5	4	8	1	1	4	0	2	2	4	0	0	0	2	0	0	4
	Durchschnitt	996	127	11188	1501	167	10664	15	7	9	9	4	4	4	31	0	0	31
	Standardabweichung	1501	167	10664	10	10	1	10	1	6	4	4	4	4	19	0	0	19
	Minimum	15	11	3374	3	10	1	25	8	6	14	14	14	14	3	0	0	3
Maximum	3600	375	34000	3	10	25	4	4	8	14	14	6	6	44	5	1	44	
Anzahl Analysen < BG	1	2	0	5	0	0	4	4	4	4	2	6	6	5	5	1	2	4
Bestimmungsgrenze BG	<5	<2	0	<1	<1	<2	<2	<5	<2	<2	<1	<1	<1	<1	<0,1	<BG	<1	<1
<b>Mittelland West</b> <b>Malm</b> Anzahl Lokaltäten: 11	Analysen Total	2	2	3	0	0	1	0	2	0	1	1	0	1	1	1	0	2
	Anzahl Messwerte	1	1	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2
	Durchschnitt	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453	1453
	Standardabweichung	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254	254
	Minimum	11.2	1.8	1160	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	3.2	3.2	3.2	20.7
Maximum	11.2	1.8	1600	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	3.2	3.2	3.2	27.3	
Anzahl Analysen < BG	1	1	0	3	0	0	1	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	
Bestimmungsgrenze BG	<5	<1	0	<1	<1	<2	<1	<2	<2	<1	<1	<1	<1	<1	<0,1	<BG	<1	
<b>Mittelland Ost</b> <b>Keuper</b> Anzahl Lokaltäten: 5	Analysen Total	4	4	5	4	0	3	2	3	0	4	4	0	3	4	0	0	3
	Anzahl Messwerte	3	4	5	1	1	2	0	2	0	4	2	0	1	1	1	0	3
	Durchschnitt	1573	31.7	25184	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
	Standardabweichung	2665	39.4	22062	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
	Minimum	30	3.9	3847	1.0	1.0	1.0	1.0	5	5	2.4	2.0	2.0	2.0	1.0	0.2	0.2	9
Maximum	4650	90.0	57873	1.0	1.0	1.0	1.0	5	5	20.0	10.0	10.0	10.0	1.0	0.2	0.2	20	
Anzahl Analysen < BG	1	0	0	3	1	2	2	2	2	0	0	2	2	2	3	2	0	
Bestimmungsgrenze BG	<10	0	0	<1	<1	<2	<2	<5	<2	<2	<1	<1	<1	<2	<0,1	<BG	<1	
<b>Mittelland Ost</b> <b>Muschelkalk</b> Anzahl Lokaltäten: 12	Analysen Total	10	8	11	8	1	6	6	9	0	9	9	0	9	10	1	0	7
	Anzahl Messwerte	9	8	11	2	0	5	1	5	0	5	5	0	3	2	0	0	6
	Durchschnitt	257	50.8	13648	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Standardabweichung	349	44.6	28209	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
	Minimum	13	2.5	175	2	2	2	2	3	3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.9	0.2	0.2	1
Maximum	1100	130.0	88645	77	77	77	77	220	220	250	250	250	250	250	0.5	0.5	250	
Anzahl Analysen < BG	1	0	0	6	1	5	4	4	4	4	4	4	4	6	8	1	1	
Bestimmungsgrenze BG	<BG	0	0	<0,2	<2	<BG	<2	<2	<5	<2	<1	<1	<1	<1	<0,1	<BG	<1	
<b>Mittelland Ost &amp; Tafeljura</b> <b>Buntsandstein</b> Anzahl Lokaltäten: 14	Analysen Total	11	11	11	5	3	0	3	11	0	10	10	0	1	11	3	0	10
	Anzahl Messwerte	10	11	11	2	2	0	0	5	5	4	7	0	1	7	0	0	7
	Durchschnitt	65	87	2880	0.3	0.3	0.3	0.3	27	27	7.8	8.3	8.3	8.3	19.7	19.7	19.7	56
	Standardabweichung	124	93	3255	0.1	0.1	0.1	0.1	52	52	5.7	9.5	9.5	9.5	28.2	28.2	28.2	45
	Minimum	410	260	9739	0.4	0.4	0.4	0.4	120	120	2.0	2.0	2.0	2.0	0.01	0.01	0.01	10
Anzahl Analysen < BG	1	0	0	3	3	3	3	6	6	14.0	27.0	27.0	27.0	60.0	60.0	3	3	
Bestimmungsgrenze BG	<2	0	0	<0,1	<3	<BG	<2	<3	<5	<5	<5	<2	<2	<BG	<BG	<BG	<3	

Tab. 5-12: Konzentrationen von metallischen Spurenelementen in Tiefengrundwasser in den mesozoischen Einheiten am Alpennordrand, dem Kristallin und den Metasedimenten im Alpenraum in der Schweiz und dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz.

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, AQUITYP Projekt, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Bucher et al. 2012, Schneeberger 2017, Waber et al. 2017, Stober et al. 2023. BG: Bestimmungsgrenze.

Region / Geologie	Statistik	Al	As	B	Cd	Co	Cr-tot	Cr-VI	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	W	Zn
Alpennordrand Helvetikum & Penninikum Kreide, Malm, Trias Anzahl Lokaltäten: 53	Analysen Total	13	21	27	7	0	0	0	20	0	19	18	0	16	3	0	0	21
	Anzahl Messwerte	11	5	27	6	0	0	0	14	0	7	15	0	0	3	0	0	5
	Durchschnitt	401	33	1592	1.0	0	0	0	26	74	40	10	0	100	100	0	0	140
	Standardabweichung	448	71	2222	1.2	0	0	0	51	44	40	8	0	173	173	0	0	202
	Minimum	5	1.2	65	0.2	0	0	0	1	0.4	5	1	0	0.6	0	0	0	30
Maximum	1040	160	11190	3.0	0	0	0	200	140	119	24	0	300	300	0	0	500	
Anzahl Analysen < BG	2	16	0	1	0	0	0	6	0	12	3	0	0	0	0	0	0	16
Bestimmungsgrenze BG	<10	<1	0	<2	0	0	0	<5	0	<10	<5	<5	<1	<1	<5	<5	<20	<20
Alpenraum Kristallin I Aiguilles-Rouge, Mont-Blanc, Aar-Massiv (Grimmel) Anzahl Lokaltäten: 111	Analysen Total	101	73	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	76	0	0	0
	Anzahl Messwerte	63	73	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	76	0	0	0
	Durchschnitt	94	24	0	0	0	0	0	34	34	0	0	0	163	163	0	0	0
	Standardabweichung	248	36	0	0	0	0	0	44	44	0	0	0	439	439	0	0	0
	Minimum	3.6	0.1	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0	0	0.6	0.6	0	0	0
Maximum	1572	225	0	0	0	0	0	140	140	0	0	0	2093	2093	0	0	0	
Anzahl Analysen < BG	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<5	<2	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<1	<5	<5	<20	<20
Alpenraum Kristallin II Gotthard- & Aar-Massiv Kristallin & Metasedimente Anzahl Lokaltäten: 252	Analysen Total	251	122	122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte	245	8	122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Durchschnitt	212	10.0	1350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Standardabweichung	389	2.4	1226	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Minimum	6	5.4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	4912	12.2	5724	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anzahl Analysen < BG	6	114	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<5	<2	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<1	<5	<5	<20	<20
Alpenraum Penninikum & Ostalpin Gneise Anzahl Lokaltäten: 40	Analysen Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Durchschnitt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Standardabweichung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anzahl Analysen < BG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<5	<2	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<1	<5	<5	<20	<20
Alpenraum Penninikum & Ostalpin Metasedimente Anzahl Lokaltäten: 25	Analysen Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Anzahl Messwerte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Durchschnitt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Standardabweichung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anzahl Analysen < BG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bestimmungsgrenze BG	<5	<5	<5	<2	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<1	<5	<5	<20	<20
Nordschweiz Grundgebirge Schwarzwald-Kristallin Granit & Gneise Anzahl Lokaltäten: 29	Analysen Total	25	26	27	4	6	0	3	25	0	25	25	0	22	28	6	0	24
	Anzahl Messwerte	18	26	27	0	1	0	0	6	6	3	11	0	3	6	0	0	11
	Durchschnitt	41	144	834	0.2	7.9	0.2	0.2	7.9	14.0	14.0	4.1	0.2	7.9	14.1	0.2	0	141
	Standardabweichung	57	124	697	0.2	4.6	0.1	0.1	12.5	17.4	17.4	4.6	0.2	12.5	22.6	0.2	0	226
	Minimum	2	6	79	0	0	0	0	0	2.0	2.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1
Maximum	200	510	3794	4	5	0	0	19	34.0	34.0	16.0	0.5	30.0	57.0	6	0	570	
Anzahl Analysen < BG	7	0	0	4	5	0	0	3	19	22	14	0	19	22	6	0	13	
Bestimmungsgrenze BG	<10	<10	<10	<0.2	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<20	<20

### 5.3 Verweilzeit und Erneuerung von Tiefengrundwässern

Die Verweilzeit von Tiefengrundwässern hängt von der Topographie, der räumlichen Anordnung, der tektonischen Beanspruchung und der chemischen Verwitterung der Grundwasserleiter ab und muss demzufolge von Fall zu Fall bestimmt werden. Generell erreicht Grundwasser im Tafeljura, am Alpennordrand und im Alpenraum aufgrund der ausgeprägten Topographie und der durch Verfaltung und Überschiebungen häufig steilgestellten Lithologien in kürzerer Zeit grössere Tiefen als in den relativ flachliegenden Lithologien im Tafeljura und Molassebecken des Mittellands. Zudem führten in diesen Regionen Verfaltung und Überschiebungen zu tektonischen Störungszonen (Klüfte, Brüche etc.), welche wasserführend wirken (vgl. Kap. 3). Besonders bei den Karbonatgesteinen aus der Kreide und dem Jura und bei den Evaporitgesteinen der Trias führte die Freilegung an die Oberfläche zusammen mit den tektonischen Strukturen zu einer intensiven chemischen Verwitterung, der Verkarstung, welche die Infiltration von Oberflächenwasser in grosse Tiefen begünstigt.

Die Bestimmung der Verweilzeit eines Grundwassers im Untergrund erfolgt mittels verschiedener radioaktiver Isotope, welche im Grundwasser in geringsten Mengen gelöst sind. Detaillierte Untersuchungen über die Verweilzeit von Tiefengrundwässern wurden besonders von der Nagra im Rahmen der geologischen Tiefenlagerung von radioaktivem Abfall durchgeführt. Diese noch andauernden Untersuchungen resultieren in einem guten Verständnis über die Tiefengrundwässer in den diversen hydrogeologischen Einheiten in im Faltenjura, Tafeljura und dem distalen Molassebecken in der Nordschweiz (Pearson et al. 1991, Waber & Traber 2022), sowie der Region um den Wellenberg am Alpennordrand (Scholtis et al. 1997, Nagra 1997). Ähnliche, aber mehr lokale Untersuchungen wurden und werden im Zusammenhang mit Aspekten der Wasserversorgung (Trinkwasser, Mineralwasser, Thermalwasser) und der Geothermie durchgeführt (z.B. Mazor et al. 1986, Muralt 1999, Waber et al. 2017, Guglielmetti et al. 2022).

Aus dem Faltenjura, dem Alpennordrand und dem Alpenraum sind in den jeweiligen hydrogeologischen Einheiten Tiefengrundwässer mit durchschnittlichen Verweilzeiten von wenigen Monaten bis wenigen Jahren bis in Tiefen von mehreren hundert Metern bekannt (z.B. Schmassmann 1990, Muralt 1999, Dubois 1991, Schneeberger 2017). In diesen Gebieten findet demzufolge auch eine rasche Erneuerung des Tiefengrundwassers statt.

Demgegenüber stellen die Malm-Grundwässer im Molassebecken im östlichen Mittelland quasi-stagnierende Grundwässer mit mittleren Verweilzeiten im Bereich von mehreren 100 ka bis > 1 Mio. Jahre dar (Pearson et al. 1991, Waber & Traber 2022). Kürzliche Datierungen dieser Malm-Grundwässer mit langlebigen Radioisotopen zeigen, dass sie eine Mischung von tertiärem Meerwasser (OMM) und während Interglazialstadien des Pleistozäns infiltriertem Süsswasser darstellen (z.B. Waber et al. 2022, 2023).

Die für etliche Tiefengrundwässer angezeigten langen Verweilzeiten im Untergrund lassen aber nicht direkt Schlüsse auf die Erneuerung von Grundwasser in tiefen Aquiferen zu. So weisen die meisten Grundwässer im Muschelkalk-Aquifer der Nordschweiz an der Beprobungstelle auf eine Infiltration während der letzten Phase der letzten Eiszeit und somit auf mittlere Verweilzeiten im Bereich von rund 12–25 ka (Pearson et al. 1991, Waber & Traber 2022, Waber et al. 2022, 2023). Diese Grundwässer sind aber in der Nordabdachung des Schwarzwalds infiltriert und haben sehr lange Fliesswege im Untergrund von rund 20–50 km oder mehr hinter sich. Wie die hydrologischen Untersuchungen zeigen, sind diese Grundwässer mit grosser Wahrscheinlichkeit mit dem Infiltrationsgebiet verbunden und es findet also Erneuerung statt.

Ein gutes Beispiel für die Erneuerung von Tiefengrundwasser geben auch die diversen Thermalwässer, welche u.a. für balneologische Zwecke genutzt werden. So weisen die Thermalwässer von Baden/Ennetbaden im Minimum gleiche Verweilzeiten wie die oben beschriebenen anderen Muschelkalk-Grundwässer auf. Die artesisch aufstossenden Thermalwässer treten aus natürlichen

Quellen aus und sind mindestens seit der Römerzeit bekannt. Ähnliches gilt z.B. auch für die Thermalwässer von Scuol-Tarasp (Bissig et al. 2006) und Vals (Hartmann 1998).

Ein weiteres Beispiel, dass von der Verweilzeit nicht direkt auf die Erneuerung von Tiefengrundwasser geschlossen werden kann, zeigen die schwach mineralisierten Tiefengrundwässer vom Na-HCO<sub>3</sub> Typ (TDS = 1.0 – 1.4 g/L) in den tertiären Flyschablagerungen in der Region des Weltenbergs am Alpennordrand (vgl. Fig. 3-5; Nagra 1997). In Tiefen von rund 1180 – 1370 m unter der Oberfläche stehen diese Grundwässer unter artesischen Druckverhältnissen, weisen aber entsprechend ihrer Isotopenzusammensetzung auf eine Infiltration in den höheren, südlich gelegenen Voralpen während der letzten Glazialzeit hin. Die natürliche Exfiltration dieser Tiefengrundwässer ist offensichtlich stark eingeschränkt. Es ist nicht bekannt, wie dynamisch das System und die Erneuerung würde, falls die Exfiltration künstlich provoziert würde.

Alle diese Beispiele zeigen, dass ähnlich wie für die Verweilzeit auch die Erneuerung von Tiefengrundwasser von Fall zu Fall abgeklärt werden muss.

## 6 Heutige Nutzung von Tiefengrundwässern in der Schweiz

Tiefengrundwässer werden in der Schweiz in mehreren Hinsichten genutzt. Die wohl ältesten Anwendungen sind die Nutzung von Tiefengrundwässern als Trinkwasser, als sogenannte Heilwässer und für balneologische Zwecke. Erst viel später folgten die Nutzungen von Tiefengrundwässern für den kommerziellen Vertrieb von Mineralwasser und als Energielieferant (Geothermie).

### 6.1 Trinkwasserversorgung

Im Juragebirge, den Voralpen und dem Alpenraum wurden Tiefengrundwässer seit Menschengedenken als Trinkwasser benutzt. Bis in mehrere hundert Meter zirkulierende Karst- und Kluftgrundwässer wurden an ihren Quellen zur Trinkwasserversorgung gefasst, wohl mehrheitlich ohne genau zu wissen, in welche Tiefen das Grundwasser vor dem Austritt an die Oberfläche vorstösst.

Auch heute werden in diesen geo-tektonischen Grossräumen Tiefengrundwässer zur Trinkwasserversorgung genutzt. Dabei erfolgt dies häufig auch zusätzlich zur Nutzung von oberflächennahem Grundwasser. Dies kann einerseits anhand von gefassten, natürlichen Quellen oder durch speziell angelegte Tiefbohrungen erfolgen. Bekannte Beispiele hierfür finden sich im Tafeljura (z.B. aus dem Muschelkalk der Trias in Frenkendorf, Pratteln Arisdorf; Biehler et al. 1993), im Faltenjura (z.B. aus dem Malm bei Delsberg; Muralt 1999) und in Gemeinden abseits von grösseren Fliessgewässern mit Lockergestein-Aquiferen am Alpennordrand und im Alpenraum.

Im Mittelland wird die Grundwasser-basierte Trinkwasserversorgung heute (noch) zum weitaus grössten Teil aus oberflächennahen Lockergestein- und Festgestein-Grundwässern abgedeckt. Die zusätzliche Verwendung von Grundwasser aus Tiefen bis gegen 150 m ist aber auch bekannt (z.B. Kanton Zürich) und könnte in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

### 6.2 Mineral- & Heilwässer

Die Nutzung von Tiefengrundwasser als Mineral- und Heilwasser hat in der Schweiz eine lange Tradition und geht vielerorts bis ins frühe Mittelalter und sogar bis in die Römerzeit zurück. Anhäufungen von solchen frühen Nutzungen finden sich vor allem dort, wo Tiefengrundwasser aus den Evaporitgesteinen der Trias und den Bündnerschiefern des Lias in Quellen natürlich an der Oberfläche austritt (Tab. 6-1). Weniger häufig scheinen solche Vorkommen in den Karbonatlithologien von Kreide und Jura, in den tertiären Molassegesteinen und in Kristallingesteinen zu sein. Mehrere der Vorkommen besonders von sog. Heilwässern beinhalten auch eine thermale Komponente und werden häufig auch als Thermalwasser bezeichnet.

Aufgrund ihres geologischen Auftretens erhielten Mineral- und Heilwässer besonders im Alpenraum in Graubünden/Engadin und im Faltenjura schon früh grosse Aufmerksamkeit. Detaillierte Zusammenfassungen über diese Vorkommen inklusive der Geologie und chemischen Analysen finden sich u.a. in Nussberger (1914), Cadisch (1937), Nussberger et al. (1937), Högl (1980), Schmassmann (1990), Biehler et al. (1992), Bissig et al. (2006) und Burger (2011).

Heute kommerziell vertriebenes Mineralwasser, welches als Tiefengrundwasser zu bezeichnen ist, stammt aus rund 19 Einzugsgebieten, welche sich über alle geo-tektonischen Grossräume verteilen (Tab. 6-1). Die Verbreitung heute bekannter Mineral- und Heilwasser mit vorhandenen chemischen Analysen und vielfach auch Isotopendaten ist in Figur 6-1 dargestellt.

### 6.3 Thermalwässer: Balneologie & Geothermie

Als Thermalwasser wird gemeinhin Grundwasser bezeichnet, welches eine Jahresdurchschnittstemperatur von  $> 20\text{ °C}$  und '*gegenüber Oberflächenwasser eine signifikant erhöhte Temperatur*' aufweist (Carlé 1975, Högl 1980). Wenn nur letztere Bedingung erfüllt ist, wird das Grundwasser häufig als '*subthermal*' bezeichnet. Thermale und subthermale Grundwässer erhalten ihre Temperatur während der tiefreichenden Zirkulation im Untergrund und stellen somit Tiefengrundwässer dar.

Die Nutzung von Tiefengrundwasser als Thermalwasser zu balneologischen Zwecken führt besonders in der Region Baden bis in die Römerzeit zurück (z.B. Burger 2009, 2011). Demgegenüber wurde die Nutzung von tiefem Thermalwasser als Energielieferant (Geothermie) erst in den letzten Jahrzehnten aktuell.

In der Schweiz sind rund 450 Zutritte bzw. artesische Ausflüsse von tiefem Thermalwasser, welche sich über alle geo-tektonischen Grossräume verteilen, bekannt (Tab. 6-2). Mehr als die Hälfte dieser Vorkommen stammt aus Tunneln, vor allem dem Gotthard NEAT Basistunnel. Dabei variieren die Schüttungen zwischen  $< 1\text{ L/min}$  und  $> 100\text{ L/min}$ , was auf die Nutzung solcher Thermalwässer einen wichtigen Einfluss hat. Meist sehr geringe Schüttungen sind vor allem im Kristallin im Alpenraum und in der Nordschweiz vorhanden, welche aber mehr als die Hälfte der bekannten Vorkommen ausmachen (Tab. 6-2). Lokal weisen kristalline Thermalwässer aber auch grosse, nutzbare Schüttungen auf, wie das z.B. durch die Vorkommen von Lavey-les-Bains und Zurzach angezeigt wird. Ebenfalls geringe, nicht nutzbare Schüttungen sind im Malm des Tafeljuras und östlichen Mittellands vorhanden. Demgegenüber weisen die Malm- und Kreidekalke im westlichen Mittelland durchaus nutzbare Schüttungen von tiefem Thermalwasser auf, wie das durch die Vorkommen bei Meyrin, Yverdon-les-Bains und Thonex angezeigt wird.

Einzugsgebiet, Tiefenzirkulation und Erneuerung von Thermalwässern sind unterschiedlich und hängen von den geo-tektonischen und topographischen Bedingungen ab. Die lange Bekanntheit und Nutzung von artesisch aus dem Muschelkalk austretendem Tiefengrundwasser von Baden/Ennetbaden, Schinznach Bad und Lostorf weist darauf hin, dass es sich dort um grosse Einzugsgebiete handeln dürfte, in welchen durchaus Erneuerung stattfindet (vgl. Waber & Traber 2022 und dort zitierte Literatur). Ähnliches dürfte auch für andere als Mineralwasser oder balneologisch genutzte, thermale Tiefengrundwässer zutreffen (z.B. Vals, Hartmann 1998).

Viele der thermalen Tiefengrundwässer stellen Mischungen einer in grossen Tiefen zirkulierenden wärmeren Komponente und einer kühleren oder kalten, oberflächennahen Komponente(n) dar. So wird für die tiefe thermale Komponente in kristallinem Thermalwasser im Grimsel- und Gotthardgebiet ein grosses Einzugsgebiet und eine Zirkulation bis in rund 10 km Tiefe prognostiziert (z.B. Waber et al. 2017, Diamond 2018, Wanner et al. 2020). Ähnliche Mischungen dürften auch andere Thermalwässer im Rhonetal (z.B. Brigerbad, Leukerbad) darstellen. Auch die thermalen Tiefengrundwässer von Baden/Ennetbaden, Schinznach-Bad und Lostorf stellen Mischungen zwischen einer tiefen thermalen Komponente, welche sich beim Aufstieg mit kühlerem Wasser mischt, dar. Noch nicht abschliessend geklärt ist hier, ob sich die tiefe thermale Komponente im Muschelkalk selbst oder auch im unterliegenden kristallinen Grundgebirge entwickelt (vgl. Waber & Traber 2022 und dort zitierte Literatur). In den mesozoischen Malm- und Kreide-Aquiferen in der Westschweiz scheint die Zirkulation der thermalen Tiefengrundwässer demgegenüber vorwiegend in den Formationen, aus welchen sie entspringen, stattzufinden (vgl. Muralt 1999, Guglielmetti et al. 2022).

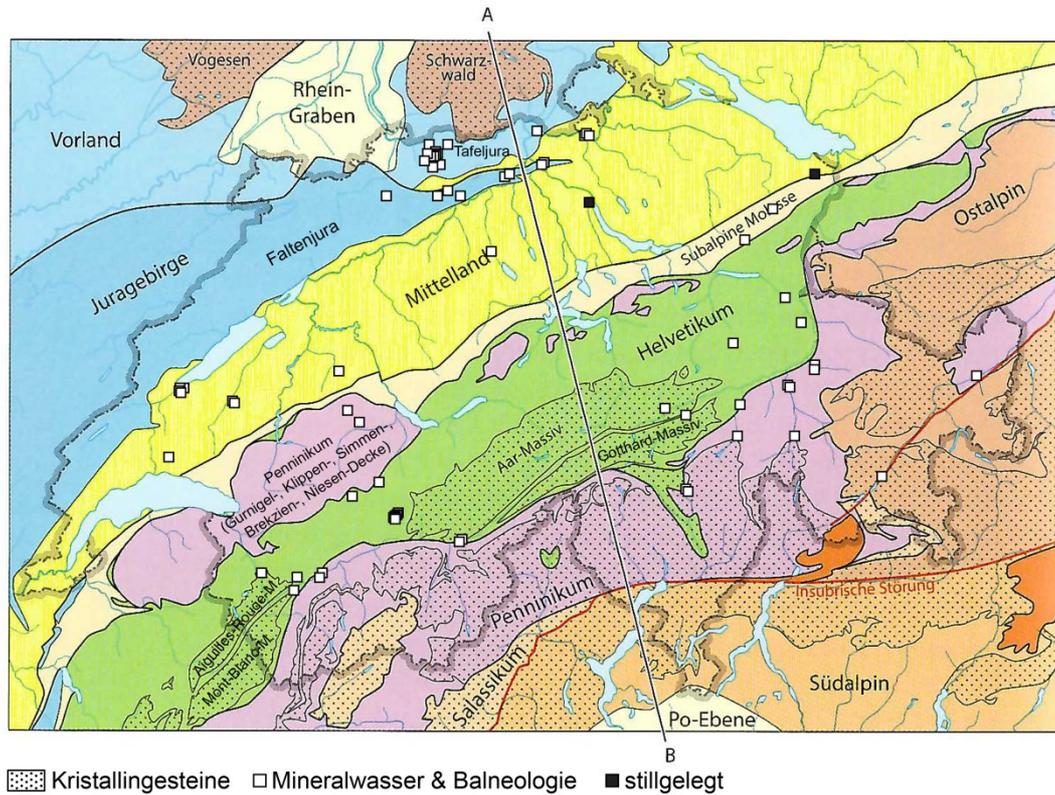


Fig. 6-1: Vorkommen von bekannten Mineralwässern und balneologisch genutzten Thermalwässern mit chemischer Charakterisierung in den geo-tektonischen Grossräumen der Schweiz.

(geo-tektonische Grossräume nach Pfiffner 2019, Karte leicht modifiziert).

Tab. 6-1: Bekannte Lokalitäten von Tiefengrundwässern in der Schweiz, welche als Mineral- und Heilwässer genutzt werden/wurden.

Grau hinterlegt: heute kommerziell vertriebenes Mineralwasser

Datenbasis: Nussberger 1914, Cadisch 1937, Nussberger et al. 1937, Högl 1980, Schmassmann 1990, Biehler et al. 1992, Bissig et al. 2006, Burger 2011 und darin zitierte Literatur. Kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Region & Geologie / Lokalität	Ort	Kanton	Probenursprung	Anzahl Zufüsse bzw. Quellen	System	Serie	Lithologie
<b>Tafeljura; Anzahl Vorkommen: 12</b>							
Feldschlösschen Bohrungen	Magden u. Umgeb.	AG	Bohrung	7	Trias	Keuper&Muschelkalk	Evaporite
Magden, Magdalenenquelle	Magden	AG	Quelle	1	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Rheinfelden, Kapuzinerquelle	Rheinfelden	AG	Quelle	1	Trias	Keuper&Muschelkalk	Evaporite
Rheinfelden, Sole	Rheinfelden	AG	Quelle	1	Trias	Keuper&Muschelkalk	Evaporite
Sissach, Alpbadquelle	Sissach	AG	Quelle	1	Trias	Keuper	Evaporite
Wintersingen «In den Gipsi»	Wintersingen	AG	Quelle	1	Trias	Keuper	Evaporite
<b>Faltenjura; Anzahl Vorkommen: 29</b>							
Baden/Ennetbaden, genutzte Quellen	Baden / Ennetbaden	AG	Quelle	18	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Eptingen, Mineralquellen	Eptingen	BL	Quelle & Bohrung	2	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Ramsach-Bad	Häfeltingen	BL	Quelle	1	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Bad Lostorf, Thermalwässer	Lostorf	SO	Quelle & Bohrung	2	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Meltingen, Quelle Bünthen&Neubau	Meltingen	SO	Quelle	2	Trias	Keuper&Muschelkalk	Evaporite
Schinznach-Bad, Schwefeltherme	Schinznach	AG	Bohrung	3	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Schinznach-Dorf, Schenkenbergquelle	Schinznach	AG	Quelle	1	Trias	Muschelkalk	Evaporite
<b>Mittelland Ost; Anzahl Vorkommen: 8</b>							
Eglisau, Quellen	Eglisau	ZH	Bohrung	2	Tertiär	USM	Sandstein (?)
Eglisau, Bohrungen	Eglisau	ZH	Quelle	4	Tertiär	USM / Malm	Sandstein & Karbonate
Knutwil, ehemaliges Stahlbad	Knutwil	AG	Bohrung	1	Tertiär	OSM	Sandstein (?)
Zürich, Thermalquelle Aqwi	Zürich	ZH	Bohrung	1	Tertiär	OMM	Sandstein
<b>Mittelland West; Anzahl Vorkommen: 12</b>							
Henniez, Quellen	Henniez	VD	Quelle	4	Tertiär	USM	Sandstein (?)
Romanel, Source Providence	Romanel	VD	Quelle	1	Tertiär	Subalpine Molasse	Sandstein (?)
Yverdon, Source «Bel Air»	Yverdon	NE	Quelle	1	Jura	Malm	Karbonat
Yverdon-les-Bains (früher Arkina)	Yverdon-les-Bains	NE	Bohrung	5	Jura	Malm	Karbonat
Yverdon-les-Bains, STH	Yverdon-les-Bains	NE	Brunnen	1	Jura	Malm	Karbonat
<b>Alpennordrand Helvetikum, Ultrahelvetikum &amp; Penninikum; Anzahl Vorkommen: 25</b>							
Adelboden, Oeybad-Quelle	Adelboden	BE	Quelle & Bohrung	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite & Karbonate
Bad Ragaz-Pfäfers, Thermalquelle	Bad Ragaz	SG	Quelle	1	Kreide/Jura	U.Kreide/Malm	Karbonat
Elm, Quelle MW 3	Elm	GL	Quelle & Bohrung	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite & Karbonate
Rietbad, Schwefelquelle	Ennetbühi	SG	Quelle	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite
Gontenbad, obere Quelle	Gontenbad	AI	Quelle	1	Tertiär	Subalpine Molasse	Evaporite & Karbonate
Lenk i.S., Balmquelle	Lenk	BE	Quelle	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite & Karbonate
Leukerbad, Thermalquellen	Leukerbad	VS	Quelle	6	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite
Leytron - Ovronnaz	Leytron	VS	Quelle	2	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite
Mels, Mineralquellen Heidiland	Mels	SG	Quelle	1	Kreide/Jura	U.Kreide/Malm	Karbonat
Saillon Mineral- & Thermalwasser	Saillon	VS	Quelle & Bohrung	4	Trias & Kristallin		Evaporite, Karbonate, Kristallin
Saxon, anciens bains	Saxon	VS	Brunnen	2	Trias & Kristallin		Evaporite, Karbonate, Kristallin
Riedquelle, ehemals Buttigenbad	Schwarzenburg	BE	Quelle	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite
Schwefelbergbad	Schwefelbergbad	BE	Quelle	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite & Karbonate
Walzenhausen	Walzenhausen	AR	Quelle	1	?	?	Evaporite
Weissenburg, Mineraltherme	Weissenburg	BE	Brunnen	1	Trias	Muschelkalk (?)	Evaporite
<b>Alpenraum Kristallin Massive; Anzahl Vorkommen: 21</b>							
Brigerbad	Brig	VS	Quelle & Bohrung	6	Kristallin	Aar Massiv	Gneis
Lavey-les-Bains, Quelle	Lavey-les-Bains	VS	Quelle	1	Kristallin	Aiguilles Rouges M.	Gneis & Granit
Lavey-les-Bains, Bohrungen	Lavey-les-Bains	VS	Bohrung	16	Kristallin	Aiguilles Rouges M.	Gneis & Granit
Saxon, Bohrungen	Saxon	VS	Bohrung	2	Kristallin	Mont Blanc M.	Gneis
<b>Alpenraum Penninikum &amp; Ostalpin; Anzahl Vorkommen: 52</b>							
Acquarossa, Thermalquellen	Acquarossa	TI	Quelle	3	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Andeer-Bad, Subtherme «Bogn»	Andeer	GR	Quelle	1	Trias	Muschelkalk	Evaporite & Karbonate
Aproz, Quellen	Aproz	VS	Quelle & Bohrung	6	Trias	Muschelkalk	Evaporite & Karbonate
Disentis, St.Placidusquelle	Disentis	GR	Quelle	1	Lias	Bündnerschiefer	
Bad Passugg, Quellen	Passugg	GR	Quelle	5	Lias	Bündnerschiefer	
Peiden-Bad, Markusquelle	Peiden	GR	Quelle	1	Lias	Bündnerschiefer	
Rhâzüns (Rhâzünser, Arkina)	Rhâzüns	GR	Quelle	1	Lias	Bündnerschiefer	
Rothbrunnen	Rothbrunnen	GR	Quelle	1	Lias	Bündnerschiefer	
Sassal, mehrere Quellen	Sassal	GR	Quelle	6	Lias	Bündnerschiefer	
Bad Scuol, Quellen	Scuol	GR	Quelle	6	Lias	Bündnerschiefer	
St. MoritzBad, Quellen	St. Moritz	GR	Quelle	5	Trias & Kristallin	Kristallin	
Bad Tarasp-Valpera, Quellen	Tarasp	GR	Quelle	5	Lias	Bündnerschiefer	
Tenigerbad, Quelle I	Tenigerbad	GR	Quelle	1	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Bad Vals, Quellen	Vals	GR	Quelle	7	Trias	Muschelkalk	Evaporite
Bad Vals	Vals	GR	Bohrungen	3	Trias	Muschelkalk	Evaporite
<b>Nordschweiz Grundgebirge, Schwarzwald Kristallin; Anzahl Vorkommen: 3</b>							
Bad Zurzach, Thermalwasser	Zurzach	AG	Bohrung	3	Kristallin	Kristallin (Anteil Trias)	Gneis

Tab. 6-2: Bekannte Lokalitäten von Thermalwässern in der Schweiz.

Grau hinterlegt: für balneologische Zwecke genutztes Thermalwasser; Orange hinterlegt: zur Energiegewinnung genutztes Thermalwasser (inkl. Pilotprojekten)

Datenbasis: Hydrochemische Datenbank der Nagra, BDF\_Geotherm Datenbank (Sonney & Vuataz 2008), Vuataz 1982, Pfeifer et al. 1992, Hartmann 1998, Murali 1999, Bucher et al. 2012, Waber et al. 2017, Guglielmetti et al. 2022, Stober et al. 2023 und darin zitierte Literatur.

TDS: total gelöste Stoffe (Mineralisation), T: Temperatur, B = Bohrung, Br = Brunnen, Q = Quelle, T = Tunnel/Galerie

Kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Region & Geologie / Lokalität	Ort	Kanton	Probenursprung	Anzahl Zuflüsse	System	Serie	Mittlere Teufe (m)	TDS (g/L)	T (°C)
<b>Tafeljura; Anzahl Vorkommen: 17</b>									
Riniken: Sondierbohrung RIN	Riniken	AG	B	1	Trias	Keuper	516	15.5	38
Arischhof: Feldschlösschen Bohrung	Arisdorf	BL	B	1	Trias	Muschelkalk	265	1.6	24
Böttstein: Sondierbohrung BOE	Böttstein	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	167	6.3	21
Beznau: Bohrung NOK Nr.7904	Döttingen	AG	B	2	Trias	Muschelkalk	262-301	6.3-6.7	26.3-27.3
Frenkendorf: Bohrung 34.J.1	Frenkendorf	BL	B	1	Trias	Muschelkalk	270	0.7	22
Ittingen: Bohrung 59.Z.2 (IT 1)	Ittingen	BL	B	1	Trias	Muschelkalk	281	4.4	21.5
Magden: Feldschlösschen Bohrungen	Magden	AG	B	3	Trias	Muschelkalk	203-249	0.8-1.4	20.4-22.1
Reinach, F1	Reinach	BL	B	1	Trias	Muschelkalk	1793	44.0	77.6
Riehen: Geothermiebohrung 1 & 2	Riehen	BS	B	1	Trias	Muschelkalk	1175-1492	14.1-17.0	51.2-61.4
Riniken: Sondierbohrung RIN	Riniken	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	657	14.5	45
Zurzach: Thermalwasserbohrung 3	Zurzach	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	245	3.6	28
Böttstein: Sondierbohrung BOE	Böttstein	AG	B	1	Trias	Buntsandstein	313	2.0	27
Riniken: Sondierbohrung RIN	Riniken	AG	B	1	Trias	Buntsandstein	807	10.4	50
Sibilingen: Sondierbohrung SIB	Sibilingen	SH	B	1	Trias	Buntsandstein	341	0.7	24.8
<b>Faltenjura; Anzahl Vorkommen: 37</b>									
Bözberg: Sondierbohrung BOZ2-1	Bözberg	AR	B	1	Jura	Hauptrogenstein	350	4.6	22.2
Wisenbergertunnel: Bohrung RB 29	Wisenbergertunnel	BL	T & B	1	Jura	Hauptrogenstein	231	0.8	22.3
Courtemaiche, Basse-Fin	Courtemaiche	JU	B	1	Jura	Malm	400	2.3	22.2
Delémont: S2	Delémont	JU	B	1	Jura	Malm	414	0.4	21.3
Delémont: S3	Delemont	JU	B	1	Jura	Malm	415	0.4	21.7
Mont Terri URL, Bohrung BDB-1	St. Ursanne	JU	B	3	Jura	Malm	200	0.8	22
Bözberg: Sondierbohrung BOZ2-1	Bözberg	AR	B	1	Trias	Keuper	645	1.5	36.6
Baden / Ennetbaden, Thermalquellen	Baden	AG	Q	19	Trias	Muschelkalk	0	4.4-4.6	45.4-48.0
Bözberg: Sondierbohrung BOZ2-1	Bözberg	AR	B	1	Trias	Muschelkalk	777	12.6	40.7
Densbüren: Felsbohrung Asp	Densbüren	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	101	0.8	16.6
Hausen: Bohrung HH 1	Hausen	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	347	0.9	29.3
Lostorf: Bohrung 3, oberer Aquifer	Lostorf	SO	B	3	Trias	Muschelkalk	367-559	0.8-2.5	28
Schinznach Bad: Bohrung S2	Schinznach-Bad	AG	Q & B	3	Trias	Muschelkalk	0-368	1.7-2.6	28.5-43.4
<b>Mittelland Ost; Anzahl Vorkommen: 33</b>									
Berlingen-3	Berlingen	TG	B	1	Tertiär	OSM	416	0.5	29
Kreuzlingen: Geothermiebohrung II	Kreuzlingen	TG	B	1	Tertiär	OMM		0.8	28.5
Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen	Zürich	ZH	B	1	Tertiär	OMM	543	3.7	23.8
Thermalwasserbrunnen Aqwi	Zürich	ZH	B	1	Tertiär	OMM	398	1.1	23.0
Berlingen: Erdölbohrung 1	Berlingen	TG	B	1	Tertiär	USM	1437	29.6	55.0
Boswil: Erdölbohrung 1	Boswil	AG	B	1	Tertiär	USM	1097	11.4	30.0
Hünenberg: Erdölbohrung 1	Hünenberg	ZG	B	1	Tertiär	USM	2375	10.3	64.0
Benken: Sondierbohrung	Benken	ZH	B	1	Jura	Malm	387	10.2	24.0
Berlingen: Erdölbohrung 1	Berlingen	TG	B	1	Jura	Malm	1494	6.0	60.0
Bülach: Sondierbohrung BUL1-1	Bülach	ZH	B	1	Jura	Malm	625	12.3	32.4
Marthalen: Sondierbohrung MAR1-1	Marthalen	ZH	B	1	Jura	Malm	344	5.1	22.4
Stadel: Sondierbohrung STA3-1	Stadel	ZH	B	1	Jura	Malm	514	20.6	27.4
Stadel: Sondierbohrung STA2-1	Stadel	ZH	B	1	Jura	Malm	508	12.3	28.2
Trüllikon: Sondierbohrung TRU1	Trüllikon	ZH	B	1	Jura	Malm	595	8.8	30.5
Bachs: Sondierbohrung BAC1	Bachs	B	B	1	Trias	Keuper		21.0	54.9
Benken: Sondierbohrung	Benken	ZH	B	1	Trias	Keuper	719	9.9	42
Berlingen: Erdölbohrung 1	Berlingen	TG	B	1	Trias	Keuper	2073	38.1	75
Stadel: Sondierbohrung STA2-1	Stadel	ZH	B	1	Trias	Keuper	962	15.2	55.1
Trüllikon: Sondierbohrung TRU1	Trüllikon	ZH	B	1	Trias	Keuper	1025	9.6	52.7
Bachs: Sondierbohrung BAC1	Bachs	B	B	1	Trias	Muschelkalk	1105	4.7	61.4
Benken: Sondierbohrung	Benken	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	820	2.2	46
Berlingen: Erdölbohrung 1	Berlingen	TG	B	1	Trias	Muschelkalk	2182	53.4	78
Birmenstorf: BT4	Birmenstorf	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	241	9.1	23.2
Bülach: Sondierbohrung BUL1-1	Bülach	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	1156	145.2	58
Marthalen: Sondierbohrung MAR1-1	Marthalen	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	849	3.1	49.6
Schlattingen GTB 1/2011	Schlattingen	TG	B	1	Trias	Muschelkalk	1149	3.3	62
Stadel: Sondierbohrung STA3-1	Stadel	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	1078	9.3	55.6
Stadel: Sondierbohrung STA2-1	Stadel	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	1088	3.5	58.4
Trüllikon: Sondierbohrung TRU1	Trüllikon	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	1098	2.6	54.8
Weiach: Sondierbohrung WEI	Weiach	ZH	B	1	Trias	Muschelkalk	859	3.3	50
Benken: Sondierbohrung	Benken	ZH	B	1	Trias	Buntsandstein	979	1.4	50.6
Schlattingen GTB 1/2011	Schlattingen	TG	B	1	Trias	Buntsandstein	1255	19.4	65
Weiach: Sondierbohrung WEI	Weiach	ZH	B	1	Trias	Buntsandstein	985	14.8	53

Tab. 6-2: ff

Region & Geologie / Lokalität	Ort	Kanton	Proben- ursprung	Anzahl Zuflüsse	System	Serie	Mittlere Teufe (m)	TDS (g/L)	T (°C)
<b>Mittelland West; Anzahl Vorkommen: 17</b>									
Pfaffnau: Erdölbohrung 1	Pfaffnau	LU	B	1	Tertiär	USM	450	4.2	22.0
Pfaffnau: Erdölbohrung Pfaffnau Süd 1	Pfaffnau	LU	B	1	Tertiär	USM	701	4.7	29.0
Pfaffnau: Erdölbohrung Pfaffnau Süd 5	Richenthal	LU	B	1	Tertiär	USM	761	6.7	30.0
Schafisheim: Sondierbohrung SHA	Schafisheim	AG	B	1	Tertiär	USM	558	8.8	30.0
Meyrin: GEO-01	Meyrin	GE	B	1	Kreide & Jura	U.Kreide, Malm	600	0.3	29.8
Yverdon-les-Bains: Noreaz-1	Yverdon-les-Bains	VD	B	1	Cretace	U.Kreide	571	0.3	29.5
Thonex-01 Well	Thonex	GE	B	2	Jura	Malm	2120–2530	1.1–5.9	42–70
Yverdon-les-Bains, Thermalquellen	Yverdon-les-Bains	VD	Br & B	5	Jura	Malm	14–1479	0.3–0.9	24.4–20.9
Pfaffnau: Erdölbohrung 1	Pfaffnau	LU	B	1	Trias	Keuper	1401	76.7	54
Pfaffnau: Erdölbohrung 1	Pfaffnau	LU	B	1	Trias	Muschelkalk	1551	114.2	59
Schafisheim: Sondierbohrung SHA	Schafisheim	AG	B	1	Trias	Muschelkalk	1233	15.2	57.5
Schafisheim: Sondierbohrung SHA	Schafisheim	AG	B	1	Trias	Buntsandstein	1488	15.9	68
<b>Alpenorrand, Helvetikum, Ultrahelvetikum &amp; Penninikum; Anzahl Vorkommen: 18</b>									
Gontenbad, obere Quelle	Gontenbad	AI	Q	1	Tertiär	Subalpine Molasse	0	1	34
Bad Ragaz - Pfäfers	Bad-Ragaz	SG	Q	1	U.Kreide/Jura	U.Kreide/Malm	0	0.4	36.5
Heidiland (Castels)	Mels	GR	Q	1	U.Kreide/Jura	U.Kreide/Malm	0	0.5	36.5
Rawiltunnel: S2830	Rawyl	VS	T	4	Jura	?	900–1100	0.3–0.5	24.3–29.2
Saillon, P2	Saillon	VS	B	1	Jura	?	75	1.0	23.4
Leukerbad, Thermalquellen	Leukerbad	VS	Q	6	Trias	Muschelkalk	0	1.8–2.1	31.4–51.0
Leytron: STH	Leytron	VS	Q	1	Trias	Muschelkalk	0	1.0	24.2
Saillon, Jafe	Saillon	VS	B	1	Trias	Muschelkalk	929	4.7	30.1
Saxon, Puits	Saxon	VS	Br	1	Trias	Muschelkalk	7	1.3	24
Weissenburg: STH	Weissenburg	BE	Br	1	Trias	Muschelkalk	10	1.7	25.9
<b>Alpenraum, Kristallin Massive; Anzahl Vorkommen: 281</b>									
Bonvemier: STH	Bonvemier	VS	Q	1	Kristallin	Mont-Blanc-M.	0	0.3	21.1
Brigerbad, Thermalquellen	Brig	VS	T	6	Kristallin	Aar-Massiv	0–?	0.6–1.4	20–50.2
Epinassey: E2	Epinassey	VS	B	1	Kristallin	Aiguilles-Rouges-M.	216	0.6	21.7
Furkatunnel: S8737	Furka	VS	T	1	Kristallin	Aar-Gotthard-M.	1400	0.2	21.7
Gotthard Neat Tunnel	Gotthard	UR & TI	T	252	Kristallin	Aar-Gotthard-M.	755	0.1–4.0	21.4–45.2
Grimsel Gasstollen: S11 & S12	Grimsel	BE	T	2	Kristallin	Aar-Massiv	ca. 200	0.3–0.5	22.5–27
Lavey-les-Bains: Thermalwasser	Lavey-les-Bains	VD	Br & B	16	Kristallin	Aiguilles-Rouges-M.	23–517	0.3–1.5	20–65.3
Lötschbergtunnel: S83370	Lötschberg	VS	T	1	Kristallin	Aar-Massiv	1500	0.7	25.8
Saxon: F3	Saxon	VS	B	1	Kristallin	Mont-Blanc-M.	318	0.7	25.1
<b>Alpenraum, Penninikum &amp; Ostalpin; Anzahl Vorkommen: 14</b>									
Acquarossa, Thermalwasser	Acquarossa	TI	Q	3	Trias	Muschelkalk	0	2.6–2.9	23.8–24.9
Combioula, Thermalwasser	Combioula	VS	Q & B	5	Trias	Muschelkalk	0–438	2.9–5.0	23.1–29.4
Val d'Illeiez, Thermalwasser	Val d'Illeiez	VS	Q & B	1	Trias	Muschelkalk	0–120	1.4–1.9	23.1–30
Vals Thermalwasser	Vals	GR	B	3	Trias	Muschelkalk	47–116	1.9–2.0	24.9–29.6
Simplon: F3	Simplon	VS	B	1	Kristallin	Kristallin	65	0.9	40.3
St. Moritz: Pro San Gian	Saint-Moritz	GR	B	1	Kristallin	Kristallin	1600	13.3	29
<b>Nordschweiz Grundgebirge Schwarzwald Kristallin; Anzahl Vorkommen: 33</b>									
Böttstein: Sondierbohrung BOE	Böttstein	AG	B	6	Kristallin	Kristallin	400–1326	1.1–13.3	29.5–60
Kaisten: Sondierbohrung KAI	Kaisten	AG	B	6	Kristallin	Kristallin	310–1272	1.4–1.6	25–58
Leuggern: Sondierbohrung LEU	Leuggern	AG	B	9	Kristallin	Kristallin	251–1666	1.0–1.4	20–66
Rheinfelden: Bohrung Engerfeld	Rheinfelden	AG	B	2	Kristallin	Kristallin	468–600	4.2–4.5	25.8–26.8
Sibingen: Sondierbohrung SIB	Sibingen	SH	B	4	Kristallin	Kristallin	479–1496	0.6–1.0	28–57
Zurzach: Thermalwasserbohrung 1&2	Zurzach	AG	B	2	Kristallin	Kristallin	416–454	0.8–1.0	37.7–39.6
Schafisheim: Sondierbohrung SHA	Schafisheim	AG	B	2	Kristallin	Kristallin	1571–1888	8.2–8.5	72–85
Weiach: Sondierbohrung WEI	Weiach	ZH	B	2	Kristallin	Kristallin	2267–2218	6.4–8.0	112

## 7 Zusammenfassung & Schlussfolgerungen

Grundwasser wird in der Schweiz generell in die zwei Tiefenbereiche "*oberflächennahes Grundwasser*" und "*tiefes Grundwasser*" unterteilt, wobei heute noch keine einfach anwendbare Definition dieser Bereiche vorliegt. Auf gesetzlicher Ebene regelt das Gewässerschutzgesetz (GSchG) den Schutz aller ober- und unterirdischen Gewässer unabhängig vom Auftreten des Grundwassers in der Tiefe und auch unabhängig von Nutzungskriterien.

Die Grundwasserführung im Untergrund wird durch die lokal und regional stark variierenden (hydro)geologischen Verhältnisse nahe der Oberfläche und im tiefen Untergrund bestimmt. Aufgrund dieser werden die Grundwasservorkommen gemeinhin in Poren-, Kluft- und Karst-Grundwasserleiter (bzw. Aquifere) unterteilt. Poren-Grundwasserleiter kommen sowohl in Lockergestein als auch in Festgestein vor, während Kluft- und Karst-Grundwasserleiter auf Festgestein beschränkt sind. Alle diese Typen finden sich sowohl an oder nahe der Oberfläche und in grossen Tiefen bis in mehrere tausend Meter.

Für die Trinkwasserversorgung wird heute zum weitaus grössten Teil oberflächennahes Grundwasser aus Lockergestein- und Festgestein-Grundwasserleitern genutzt, wobei die ersteren den grössten Anteil ausmachen. Die Nutzung der porösen Lockergestein- und Festgestein-Grundwasserleiter ist mehrheitlich auf das oberste Stockwerk in diesen Leitern beschränkt. Es liegt wenig bis keine Information über das Grundwasser in tieferen Stockwerken vor. Dies gilt besonders für die tiefen (glazial übertiefen) Talfüllungen entlang der heutigen Flüsse (z.B. Aare, Glatt, Reuss, Rhein, Rhone) aber auch für die mächtigen Sedimentablagerungen der tertiären Molasse im Mittelland. In Kluft- und Karst-Grundwasserleitern im Jura, am Alpennordrand und im Alpenraum wird nicht selten auch Grundwasser, welches bis in mehrere hundert Meter Tiefe zirkuliert zur Trinkwasserversorgung genutzt.

Allen für die Trinkwasserversorgung genutzten oberflächennahen Grundwässern und in Kluft- und Karst-Grundwasserleitern auch tief-zirkulierenden Grundwässern ist gemeinsam, dass sie eine geringe Mineralisation (Süsswasser bis schwach mineralisiert) und oxidierende Bedingungen (Sauerstoffhaltig) aufweisen. Diese Grundwässer haben meist circa-neutrale pH-Werte und weisen eine hohe (Kalk-führende Gesteine) oder geringe (kristalline Gesteine) pH-Pufferkapazität auf. Die Gehalte an metallischen und nicht-metallischen Spurenelementen liegen mehrheitlich deutlich unter den Grenzwerten für eine Nutzung als Trinkwasser. Aufgrund der geologischen Bedingungen können aber regional (z.B. in der Oberen Meeressmolasse in der Westschweiz, am Alpennordrand und im Alpenraum) besonders die Gehalte von sog. Oxianionen (z.B. Chromat, Arsenat, Molybdat) nahe an die vorgeschriebenen Maximalwerte herankommen oder diese sogar überschreiten.

Tiefengrundwasser im eigentlichen Sinne kommt in der ganzen Schweiz unabhängig der geotektonischen Lage in den gleichen hydrogeologischen Einheiten vor. Die wichtigsten dieser Einheiten sind die tertiären, sandigen Molasse- und Flyschablagerungen, die kalkigen, dolomitischen und sandigen Gesteine des Mesozoikums (Kreide, Jura, Trias) und die Kluftaquifere in kristallinen und in metamorphen Gesteinen im Alpenraum und im Basement. Die Mineralisation und Zirkulation von Tiefengrundwasser hängen in grossem Masse von den hydrogeologischen Verhältnissen ab. Generell zirkuliert Grundwasser in den gleichen hydrogeologischen Einheiten in Regionen mit ausgeprägter Topographie (Juragebirge, Alpennordrand, Alpenraum) dynamischer und in deutlich grössere Tiefen als in den mehr flachen Regionen (Tafeljura, Molassebecken im Mittelland). So finden sich im kalkigen Malm-Aquifer (im Westen auch Kreide-Aquifer) und dem dolomitischen Muschelkalk-Aquifer im Juragebirge, am Alpennordrand und im Alpenraum bis in mehrere hundert Meter Tiefe Süss- und schwach mineralisiertes Wasser von Trinkwasser- und Mineralwasserqualität. Demgegenüber finden sich in den gleichen Aquiferen im Tafeljura und Mittelland die heute bekannten höchst mineralisierten Tiefengrundwässer mit den längsten

Verweilzeiten. Bezüglich der Vorkommen und besonders der Zusammensetzung von Tiefengrundwasser in tieferen Stockwerken von glazial übertieften Tälern und in den Molasseablagerungen im Mittelland ist sehr wenig, öffentlich zugängliche Information vorhanden.

Der Grad der Mineralisierung von Tiefengrundwässern deckt das ganze Spektrum von Süsswasser bis zu richtigen Solen ab. Dabei variieren die pH-Werte mit zunehmender Mineralisation meist von circa-neutral bis zu leicht sauer, wobei schwach bis stark mineralisierte Tiefengrundwässer in Kristallingesteinen auch deutlich alkalische pH-Werte ( $> 9$ ) aufweisen können. Im Unterschied zu oberflächennahen Grundwässern weisen Tiefengrundwässer zum grössten Teil eine vollständige Sauerstoffzehrung auf und haben ein reduzierendes Redoxpotential. Die meisten der bekannten Tiefengrundwässer haben Gehalte an metallischen und nicht-metallischen Spurenelemente, welche häufig diejenigen von oberflächennahen Grundwässern nur leicht überschreiten oder in deren Bereich liegen. Gemeinhin haben aber Tiefengrundwässer gegenüber oberflächennahen Grundwässern (stark) erhöhte Gehalte an gelösten Gasen.

Entgegen einer weit verbreiteten Meinung, dass Tiefengrundwasser aufgrund seiner Mineralisation, Verweilzeit und Erneuerung wenig Nutzungspotential aufweist, zeigen die – wenn auch wenigen – gut charakterisierten Beispiele, dass Tiefengrundwasser in der Schweiz je nach hydrogeologischer Situation durchaus ein Nutzungspotential aufweisen kann. Seit langem gut bekannt ist in der Schweiz die lokale Nutzung von Tiefengrundwasser als Trinkwasser, Mineralwasser und Thermal- und Heilwasser zu balneologischen Zwecken. In der jüngeren Vergangenheit erhielt auch die Nutzung von Tiefengrundwasser zu energetischen Zwecken mehr Aufmerksamkeit.

Für die Abklärung eines möglichen Nutzungspotentials (unabhängig von der Art der Nutzung) ist zu beachten, dass von der mittels Isotopen für ein Tiefengrundwasser abgeleiteten Verweilzeit nicht direkt auf dessen Erneuerungsrate geschlossen werden sollte, da die natürliche Zirkulation im Untergrund limitiert und kaum oder keine natürliche Exfiltration vorhanden sein kann. Mit wenigen Ausnahmen ist heute nicht bekannt, was eine Stimulation der Zirkulation (z.B. durch Pumpen) von Tiefengrundwasser im Untergrund auf die Dynamik und Erneuerungsrate des Systems für Auswirkungen hat. Diese Auswirkungen können sowohl positiv als auch negativ sein und sollten von Fall zu Fall abgeklärt werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist der Kenntnisstand über Zusammensetzung, Verweilzeit, Erneuerung und möglicher Nutzung von Tiefengrundwasser regional begrenzt. Im Hinblick auf die energetische Nutzung des geologischen Untergrundes bestehen besonders Wissenslücken bezüglich des Systemverständnisses von Tiefengrundwasservorkommen in den in tieferen Stockwerken von glazial übertieften Tälern und in den Molasseablagerungen im Mittelland.

Die hier für oberflächennahe Grundwässer und Tiefengrundwässer tabellierten chemischen und physikalischen Daten können zumindest teilweise für Grundwasserleiter und Aquifere, für welche genügend untersuchte Lokalitäten vorliegen, als Referenzwerte für durch thermische Nutzung des Untergrunds noch unbeeinflusste Grundwässer verwendet werden. Für mehrere hydrogeologische Einheiten in den diversen geotektonischen Grossräumen ist aber die hier vorliegende Datenlage bezüglich der Anzahl Lokalitäten u/o der Vollständigkeit der Analysen zu gering für eine Definition von Referenzwerten (z.B. oberflächennahes Grundwasser im Alpenraum, Tiefengrundwasser in den Molasse-Einheiten).

## 8 Literatur

- BAFU (2009) Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung. Umwelt-Vollzug Nr. 0910. Bundesamt für Umwelt, Bern, 51 S.
- BAFU (Hrsg.) (2019) Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Umwelt-Zustand Nr. 190, Bundesamt für Umwelt, Bern, 138 S.
- BAFU (Hrsg.) (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101, 134 S.
- BAFU (2023) Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2022. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. 39 S.
- Balderer W. (1990) Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse der Nordostschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 41, 35-104.
- Basabe-Rodriguez P. (1992) Typologie des eaux souterraines du Flysch de la nappe tectonique du Niesen (Préalps, Suisse). Dissertation EPFL Lausanne, These N°1073.
- Bianchetti G., Zuber F., Vuataz F.-D., Rouiller J.-D. (1993) Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Geotechnische Serie 88, 1-75.
- Biehler D., Schmassmann H., Schneemann K.-U. & Sillanpää J. (1993) Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. Nagra Technischer Bericht NTB 92-08.
- Bissig P., Goldscheider N., Mayoraz J., Surbeck H. & Vuataz F.-D. (2006) Carbogaseous spring waters, coldwater geysers and dry CO<sub>2</sub> exhalations in the tectonic window of the Lower Engadine Valley, Switzerland. *Eclogae Geol. Helv.* 99, 143–155.  
<https://doi.org/10.1007/s00015-006-1184-y>
- Bitterli T. et al. (2007) Grundwasservorkommen. Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500 000, Swisstopo, Bern.
- Bucher K., Stober I. & Seelig U. (2012) Water deep inside the mountains: Unique water samples from the Gotthard rail base tunnel. *Chem. Geol.* 334, 240–253.
- Büchi U.P., Wiener G. & Hofmann F. (1965) Neue Erkenntnisse im Molassebecken auf Grund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. *Eclogae Geol. Helv.* 58/1, 87-108.
- Burger H. (2009) Vorkommen, Nutzung und Schutz von Thermalwässern und Mineralwässern im Kanton Aargau: eine Übersicht. *Swiss Bull. angew. Geol.* 14, 13-27.
- Burger H. (2011) Die Thermalwässer und Mineralwässer im Kanton Aargau und seiner Umgebung. *In: Natur im Aargau 2011 – Jubiläumsband*, 91-111.

- Burger H. (2016) Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen. *Swiss. Bull. Angew. Geol.* 21/1, 69-90.
- BUWAL (2004) Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 141 S.
- Cadisch J. (1937) Geologie der Schweizer Mineral- und Heilquellen. *In*: Nussberger et al.: Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Zimmermann & Co, Bern.
- Cadisch J. (1959) Geologische Ergebnisse der Mineralquellenbohrung Eglisau II. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. und -Ing.* 26/70, 5-8.
- Carlé W. (1975) Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa – Geologie, Chemismus, Genese. Bücher der Zeitschrift Naturwissenschaftliche Rundschau. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH Stuttgart, 643 pp.
- Diamond L.W., Wanner C. & Waber H.N. (2018) Penetration depth of meteoric water in orogenic geothermal systems. *Geology*, <https://doi.org/10.1130/G45394.1>
- Dematteis A. (1995) Typologie géochimique des eaux des aquifères carbonatés des chaînes alpines d'Europe central et Méridionale. Dissertation EPFL Lausanne, These N°1419.
- Dubois J.D. (1991) Typologie des aquifères du Crystallin: Exemple des Massives des Aiguilles-Rouges et du Mont-Blanc (France, Italie et Suisse). Dissertation EPFL Lausanne, These N°950.
- Epting J. Walde M.A. & Schilling O.S. (2024) Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen und Definition Tiefengrundwasser – Hydrogeologische Grundlagen. Bericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt, BAFU, Bern, 58 S.
- Garefalakis P. & Schlunegger F. (2019) Tectonic processes, variations in sediment flux, and eustatic sea level recorded by the 20 Myr old Burdigalian transgression in the Swiss Molasse basin. *Solid Earth* 10, 2045-2072. <https://doi.org/10.5194/se-10-2045-2019>.
- Gübeli O. (1959) Zum Chemismus der erbohrten Mineralquellen in Eglisau. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. und -Ing.* 26/70, 9-14.
- Guglielmetti L., Heidinger M., Eichinger, F. & Moscariello A. (2022) Hydrochemical Characterization of Groundwaters' Fluid Flow through the Upper Mesozoic Carbonate Geothermal Reservoirs in the Geneva Basin: An Evolution more than 15,000 Years Long. *Energies* 2022, 15, 3497. <https://doi.org/10.3390/en15103497>.
- Hantke R., Wyssling G & Schlanke S. (2009) Blatt 1132 Einsiedeln. *Geol. Atlas der Schweiz* 1:25'000, Erläuterungen 129. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.
- Hartmann, P. (1998) Mineralwasservorkommen im nördlichen Bündnerschiefergebiet mit Schwerpunkt Valsertal. Dissertation Nr. 12'632, ETH Zürich, 195 S.
- Hesske S. (1995) Typologie des eaux souterraines de la molasse entre Chambéry et Linz (France, Suisse, Allemagne, Autriche). Dissertation EPFL Lausanne, These N°1417.

- Högl O.H. (1980) Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart, 302 pp.
- Hunziker J.C., Martinotti G., Marini L., Principe C. (1990) The waters of the Simplon tunnel (Swiss-Italian Alps) and of the adjacent Ossola district (Italy): geothermal considerations. Geothermal Resources Council Transactions 14-II, 1477±1482.
- Interreg IIIA (2008) Alpenrhein – Bodensee – Hochrhein Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau – Schaffhausen 2003-2007, Abschlussbericht. Unveröff. EU Projektbericht, 85 pp.
- Jäckli H. (1970) Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen. Eclogae geol. Helv. 63/2, 389-434.
- Kälin, K. & Kempf, O. (2009) High-resolution stratigraphy from the continental record of the Middle Miocene Northern Alpine Foreland Basin of Switzerland. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 254/1-2, 177-235. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2009/0010>.
- Kilchmann S. (2001) Typology of recent groundwaters from different aquifer environments based on geogenic tracer elements. Dissertation EPFL Lausanne, These N°2411.
- Kilchmann S, Waber H.N., Parriaux A. & Bensimon M. (2004) Natural Tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers. Hydrogeol J 12, 643-661. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0366-9>.
- Kuhlemann J. & Kempf O. (2002) Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. Sed. Geol. 152, 45-78.
- Lemcke K., Büchi U.P. & Wiener G. (1968) Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz. Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Ing. 35/87, 15-34.
- Magma (2012) Bemessung von Grundwasserkörpern in der Schweiz. Bericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt, BAFU, Bern, 74 S.
- Mandia Y (1991) Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le Bassin Lémanique du Rhone. Dissertation EPFL Lausanne, These N°948.
- Maréchal J.C., 1998. Les Circulations d'Eau dans les Massifs Cristallins Alpains et Leurs Relations avec les Ouvrages Souterrains. Dissertation EPFL Lausanne, Thesis No. 1769.
- Maréchal J.C. & Etcheverry D. (2003) The use of <sup>3</sup>H and <sup>18</sup>O tracers to characterize water inflows in Alpine tunnels. Appl Geochem 18, 339-351.
- Mazor E., Jaffé F.C., Fluck J. & Dubois J.D. (1986) Tritium corrected <sup>14</sup>C and atmospheric noble gas corrected <sup>4</sup>He applied to deduce ages of mixed groundwaters: Examples from the Baden region, Switzerland. Geochimica Cosmochim. Acta 50/8, 1611-1618.
- Mazurek M., Gimmi T., Zwahlen C., Aschwanden L., Gaucher E., Kiczka M., Rufer D., Wersin P., Marques-Fernandes M., Glaus M., Van Loon L.R., Traber D., Schnellmann M. & Vietor T., (2023) Swiss deep drilling campaign 2019–2022: Geological overview and rock properties with focus on porosity and pore-space architecture. Appl Geochem, 105839. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105839>.

- Muralt R. (1999) Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains). Beiträge zur Geologie der Schweiz 82, Schweiz. Geotechnische Kommission, Zürich, 253 S.
- Nagra (1997) Geosynthese Wellenberg 1996. Nagra Technischer Bericht NTB 96-01, 511 S. & Beilagen.
- Nagra (2008) Vorschlag geologischer Standorte für das SMA- und das HAA-Lager: Geologische Grundlagen. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04, 439 S. & Beilagen.
- Nussberger G. (1914) Heilquellen und Bäder im Kanton Graubünden. Verkehrsverein Graubünden, Chur 138 S.
- Nussberger G., Cadisch J., Keller A., Nussberger A. & Werder J. (1937) Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Verlag Zimmermann & Co, Bern.
- Parriaux A., Dubois J.D., Mandia Y., Basabe P. & Bensimon M. (1990) The AQUITYP project: towards an aquifer typology in the alpine orogen. - 22<sup>e</sup> Congrès de l'AIH, mémoires, vol. XXII/1, p. 254-262, Lausanne (Suisse).
- Pastorelli S, Marini L, Hunziker J. (1999) Water chemistry and isotope composition of the Acquarossa thermal system, Ticino, Switzerland. Geothermics 28, 75-93.
- Pastorelli S, Marini L, Hunziker J. (2001) Chemistry, isotope values (dD, d18O, d34 SSO4) and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps. Applied Geochemistry 16: 633-649.
- Pearson F.J., Balderer W., Loosli H.H., Lehmann B.E., Matter A., Peters Tj., Schmassmann H., & Gautschi A. (1991) Applied Isotope Hydrogeology – A case study in Northern Switzerland. Studies in Environmental Science 43, Elsevier, Amsterdam, 481 pp.
- Pearson F.J., Arcos, D., Bath A., Boisson J.-Y., Fernández A.M., Gaebler H.E., Gaucher E., Gautschi A., Griffault L., Hernan P. & Waber H.N. (eds.) (2003) Mont Terri Project – Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory – Synthesis Report. Reports of the Swiss Federal Office for Water and Geology, Geology Series, No. 5, Bern, Switzerland, 319 p, erhältlich unter [www.mont-terri.ch](http://www.mont-terri.ch).
- Pfeifer HR, Sanchez A. & Degueldre C. (1992) Thermal springs in granitic rocks from the Grimsel Pass (Swiss Alps): The late stage of a hydrothermal system related to Alpine Orogeny. In: Kharaka YK & Maest AS (eds.) Proceedings of Water-Rock Interaction WRI-7, Park City, Utah, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands; 1992. p. 1327-1330.
- Pfiffner O.A. (2014) Geologie der Alpen. UTB/Haupt Verlag Bern, 3. Auflage, 397 S.
- Pfiffner O.A. (2019) Landschaften und Geologie der Schweiz. Haupt Verlag Bern, 1. Auflage, 358 S.
- Preusser F., Graf, H.R., Keller O., Krayss E. & Schlüchter C. (2011) Quaternary glaciation history of northern Switzerland. E&G Quaternary Science Journal 60, 282-305.  
<https://doi.org/10.3285/eg.60.2-3.06>.

- Schlüchter C., Akçar N. & Ivi-Ochs S. (2021) The Quaternary Period in Switzerland. *In*: Reynard E. (ed.), *Landscapes and Landforms of Switzerland*, World Geomorphological Landscapes, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_4).
- Scholtis A., Pearson F.J., Loosli H., Eichinger L., Waber H.N. & Lehmann B. (1995) Integration of environmental isotopes, hydrochemical and mineralogical data to characterise groundwaters from a potential repository site in Central Switzerland. *Isot. Water Resour. Management., Proc. Symp., IAEA-SM 336/39*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 263-280.
- Schmassmann H. (1990) *Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere*. Nagra Technischer Bericht NTB 88-07. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Schmassmann H., Balderer W., Kanz W. & Pekdeger A. (1984) *Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten*. Nagra Technischer Bericht NTB 84-21. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Schmassmann H., Kullin M. & Schneemann K. (1992) *Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere*. Nagra Technischer Bericht NTB 91-30. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Schneeberger R.B. (2017) *Interplay in 3D between faults and water flow paths in crystalline bedrock (Grimsel, Switzerland)*. Dissertation Universität Bern, 146 S.
- Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Löw S. & Stauffer F. (2012) *Grundwasserressourcen in der Schweiz. Abschätzung von Kennwerten*. *Aqua & Gas* 9/12, 16-28.
- Sommaruga A., Eichenberger U. & Marillier F. (2012) *Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin*. Edited by the Swiss Geophysical Commission. – *Matér. Geol. Suisse, Géophys.* 44. Federal Office of Topography, swisstopo, Wabern, 86 S. and enclosures and appendices.
- Sonney R. & Vuataz F.D. (2008) *Properties of geothermal fluids in Switzerland: A new interactive database*. *Geothermics* 37, 496–509.
- Sonney R. & Vuataz F.D. (2009) *Numerical modelling of Alpine deep flow systems: a management and prediction tool for an exploited geothermal reservoir (Lavey-les-Bains, Switzerland)*. *Hydrogeology Journal* (2009) 17, 601–616.
- Sonney R., Ornstein P., Mage R., Sartori M. & Rouiller J.-D. (2020) *Potentiel géothermique des conduits à perméabilité élevée à la base de la vallée du Rhône*. *Aqua & Gas* 6, 58-63.
- Stober I., Giovanoli F., Wiebe V. & Bucher K. (2022) *Deep hydrochemical section through the Central Alps: evolution of deep water in the continental upper crust and solute acquisition during water–rock–interaction along the Sedrun section of the Gotthard Base Tunnel*. *Swiss Journal of Geosciences* 115:9, 23p.
- Stumm W. and Morgan J.J. (1996) *Aquatic Chemistry*, 3rd edition. Wiley-Interscience, New York, 1022 pp.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1991) *Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG), SR 814.20, Stand 1.2.2023*, Bern.

- Traber D., Waber H.N., Eichinger L. & Heidinger M. (2002) Hydrochemie und Isotopenhydrologie von Tiefengrundwässern in der Region Lägern – Zürcher Weinland – Hegau. Unpubl. Nagra Interner Bericht.
- Vuataz F.-D. (1982) Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Matériaux pour la géologie de la Suisse, Hydrologie 29, 174 p.
- Waber H.N., Bissig P., Huggenberger P. Meylan B., Milnes E., Schürch M. & Walter U., (2015) Tiefengrundwasser – Vorkommen, Nutzungspotenzial und Schutzwürdigkeit. Aqua & Gas 4/15, 32-41.
- Waber H.N. and Rufer, D. (2017) Porewater Geochemistry, Method Comparison and Opalinus Clay – Passwang Formation Interface Study at the Mont Terri URL. NWMO Technical Report TR-2017-10, NWMO, Toronto, Canada: 216 pp, erhältlich unter [www.nwmo.ca](http://www.nwmo.ca).
- Waber H.N., Schneeberger R., Mäder U.K. & Wanner C. (2017) Constraints on Evolution and Residence time of Geothermal Water in Granitic Rocks at Grimsel (Switzerland). Procedia Earth Plan Sci 17: 774-777.
- Waber H.N. & Traber D. (2022) Die Tiefengrundwässer in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland: Beschaffenheit, Herkunft und unterirdische Verweilzeit. Nagra Technischer Bericht NTB 19-02. Nagra, Wettingen, 577 S. erhältlich unter [nagra.ch](http://nagra.ch).
- Waber H.N., Traber D. & Stopelli E. (2022) TBO Bülach-1-1: Groundwater Hydrogeochemistry. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-39, Nagra, Wettingen, 85 S.
- Waber H.N., Traber D. & Stopelli E. (2023) TBO Trüllikon-1-1: Groundwater Hydrogeochemistry. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-24, Nagra, Wettingen, 124 S.
- Wanner C., Waber H.N. & Bucher K. (2020) Geochemical evidence for regional and long-term topography-driven groundwater flow in an orogenic crystalline basement (Aar Massif, Switzerland). Journal of Hydrology 581, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124374>.
- Wanner C., Camesi, L. & Waber H.N. (2023) Hintergrundwerte in oberflächennahen Grundwasservorkommen der Schweiz. Bericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt, BAFU, Bern, 163 S. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/studien.html>.