

QUALITÄT DER BARRIERE

ZUSATZINFORMATIONEN ZUM STANDORTVORSCHLAG

Den zentralen Teil der geologischen Barriere bildet der Opalinuston. Er ist in allen drei Gebieten ähnlich ausgebildet. Die Sicherheitsanalysen zeigen, dass bereits der Opalinuston die radioaktiven Abfälle langfristig sehr gut einschliessen kann. Die an den Opalinuston angrenzenden Rahmengesteine sind ebenfalls sehr dicht und liefern einen zusätzlichen Beitrag zum Einschluss der radioaktiven Stoffe und damit zur Langzeitsicherheit. Die Rahmengesteine sind variabler als der Opalinuston und unterscheiden sich in den drei Gebieten stärker. Sie reichen bis zum nächsten darunter- und darüberliegenden Aquifer (grundwasserführende Schicht).

Die Distanz zwischen der Mitte des Opalinustons und dem nächsten Aquifer, bzw. die Mächtigkeit der geringdurchlässigen Gesteine, die das Lager umhüllen, sind ein Indikator für die Qualität der Barriere. Dieses Thema wird deshalb in einem ersten Teil des vorliegenden Dokuments anhand der wichtigsten Resultate aus den Tiefbohrungen im Detail beleuchtet.

Der zweite Teil des Dokuments vertieft das Thema uraltes Porenwasser aus dem Bericht zum Standortvorschlag der Nagra. Die Zusammensetzung des Grund- und Porenwassers zeigt die Isolationswirkung des geologischen Gesamtsystems (bis Oberfläche) in der Vergangenheit auf. Die diesbezüglichen Unterschiede zwischen den Standortgebieten werden anhand von verschiedenen Figuren aufgezeigt und eingestuft.

DISTANZ ZUM NÄCHSTEN AQUIFER

Basierend auf den hydrogeologischen Untersuchungen in den Tiefbohrungen lassen sich geringdurchlässige Gesteine von grundwasserführenden Schichten (Aquifere) unterscheiden (Abbildungen 1 und 2). Die Distanz zwischen der Mitte des Opalinustons und den darüber- und darunterliegenden Aquifern unterscheidet sich zwischen den drei Standortgebieten.

JURA OST

Unterhalb vom Opalinuston ist der Keuper-Aquifer die nächstliegende Zone mit Grundwasserfluss. Dies wird durch Beobachtungen in allen drei Tief-

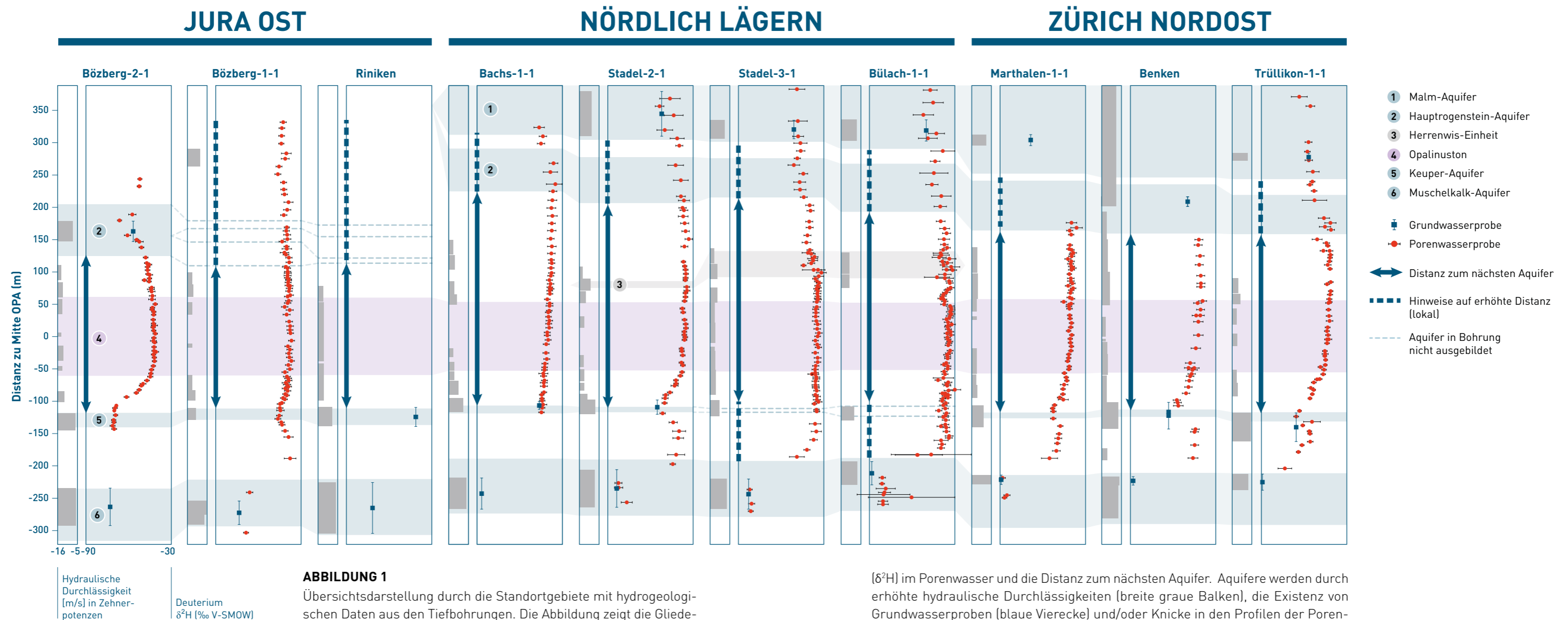
bohrungen angezeigt. Über dem Opalinuston ist die Situation komplizierter: Die Beobachtungen in der westlichsten Bohrung Bözberg-2-1 zeigen Grundwasserfluss im Haupttrogenstein an. In der Bohrung Bözberg-1-1 ist der Haupttrogenstein-Aquifer nicht nachgewiesen. Aus der älteren Bohrung Riniken gibt es in diesen geologischen Einheiten keine hydrogeologischen Untersuchungen. Die unterschiedlichen hydrogeologischen Beobachtungen in Bözberg-1-1 und Bözberg-2-1 gehen mit einer Änderung in der Gesteinsausbildung einher: Im Osten des Standortgebiets treten vermehrt tonmineralreiche/mergelige Gesteine (geringdurchlässig)

anstelle des im Westen beobachteten kalkigen Haupttrogensteins (durchlässiger) auf. Der Übergang zwischen den kalkigen und den tonmineralreichen/mergeligen Gesteinen ist komplex und geographisch im Detail schwierig einzugrenzen.

NÖRDLICH LÄGERN

In Nördlich Lägern bildet der Muschelkalk-Aquifer den regionalen Aquifer unter dem Opalinuston. Hinweise auf einen näher am Opalinuston liegenden Keuper-Aquifer gibt es nur aus den Bohrungen Stadel-2-1 und Bachs-1-1. Die Tiefengrundwasservorkommen sind an sandige Ablagerungen

gebunden, die nur lokal auftreten. Die Transportdistanz bis zum Aquifer unterhalb des Opalinustons ist damit zumindest lokal deutlich länger als in den anderen Gebieten, mindestens aber ähnlich gross. Oberhalb vom Opalinuston bildet der Malm-Aquifer den regionalen Grundwasserleiter über dem Wirtgestein, wobei die beobachteten durchlässigen Zonen alle im oberen Teil der Malmkalke liegen. Die Herrenwis-Einheit («Koralenriff») wird u.a. basierend auf den Befunden in den Bohrungen Bülach-1-1 und Stadel-3-1 nicht als Aquifer eingestuft.



($\delta^2\text{H}$) im Porenwasser und die Distanz zum nächsten Aquifer. Aquifere werden durch erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten (breite graue Balken), die Existenz von Grundwasserproben (blaue Vierecke) und/oder Knicke in den Profilen der Porenwasserzusammensetzung (vertikaler Verlauf der roten Punkte) angezeigt.

ZÜRICH NORDOST

In Zürich Nordost gibt es unter dem Opalinuston aus allen Bohrungen Hinweise auf einen Keuper-Aquifer. Dies trifft auch auf die nicht dargestellte Bohrung Rheinau zu. Der Keuper-Aquifer scheint hier flächig ausgebildet zu sein. Den nächstgelegenen Aquifer oberhalb des Opalinustons bilden die mächtigen Malmkalke (Malm-Aquifer in Abbildung 1), wie Beobachtungen aus den Bohrungen Benken, Trüllikon-1-1 und Marthalen-1-1 zeigen.

STANDORTE IM VERGLEICH

Gegen oben ist die Distanz zum nächsten Aquifer im Gebiet Jura Ost zumindest im Westen aufgrund des Hauptrogensteins deutlich kleiner als in den anderen Regionen. In Nördlich Lägern ist die Distanz nach oben im Vergleich am grössten.

Gegen unten gibt es in den Gebieten Jura Ost und Zürich Nordost unter dem Opalinuston aus allen Bohrungen Hinweise auf einen Keuper-Aquifer. In Nördlich Lägern wurde dieser Aquifer nur lokal beobachtet und ist an sandige Schichten gebunden, die nur lokal auftreten. Der Abstand zur nächsten wasserführenden Schicht unterhalb des Opalinustons ist hier im Vergleich mit Jura Ost und Zürich Nordost lokal grösser.

PROFILE DER NATÜRLICHEN TRACER IM PORENWASSER

Im Unterschied zum Grundwasser, welches in Aquiferen auftritt, kann das in geringdurchlässigen Gesteinen gespeicherte Porenwasser nicht aus der Bohrung gepumpt werden, sondern muss mit aufwendigen Experimenten aus Bohrkernen extrahiert werden.

Der Verlauf der Porenwasserzusammensetzung entlang einer Bohrung (Profil der natürlichen Tracer; rote Punkte in Abbildungen 1 und 2) liefert in Kombination mit der Zusammensetzung der Tiefengrundwässer (dunkelblaue Vierecke in Abbildungen 1 und 2) wichtige Informationen über Transportprozesse in der Vergangenheit (letzte Hunderttausende bis Millionen von Jahren). Wenn ein Tiefenaquifer aktiviert wird, kann oberflächennahes Grundwasser mit anderer Zusammensetzung in die Tiefe fließen. Dadurch kann z.B. ein ursprünglich marines Tiefengrundwasser durch meteorisches

Wasser ersetzt werden (Abbildung 2, Punkt b). Durch langsame Austauschprozesse zwischen Grund- und Porenwasser (v.a. Diffusion) gleicht sich über lange Zeiträume die Porenwasserzusammensetzung dem Grundwasser an, so dass auch die Porenwässer zunehmend einen höheren Anteil an meteorischem Wasser enthalten. Durch den langsamen Austauschprozess zwischen Grund- und Porenwasser entstehen bauchige Vertikalprofile der natürlichen Tracer (Abbildung 2, Punkt c).

Durch numerische Simulationen kann gezeigt werden, dass der Zeitraum für die Entstehung von solchen bauchigen Profilen typischerweise im Bereich von einigen Hunderttausend Jahren liegt. Die Profile zeugen demnach von einer effektiven Barrierenwirkung der tonreichen Gesteine über lange Zeiträume. Prominente Knickpunkte in den Vertikalprofilen der natürlichen Tracer weisen auf Aquifere hin (Abbildung 2, Punkt d).

KONZENTRATION NATÜRLICHER TRACER

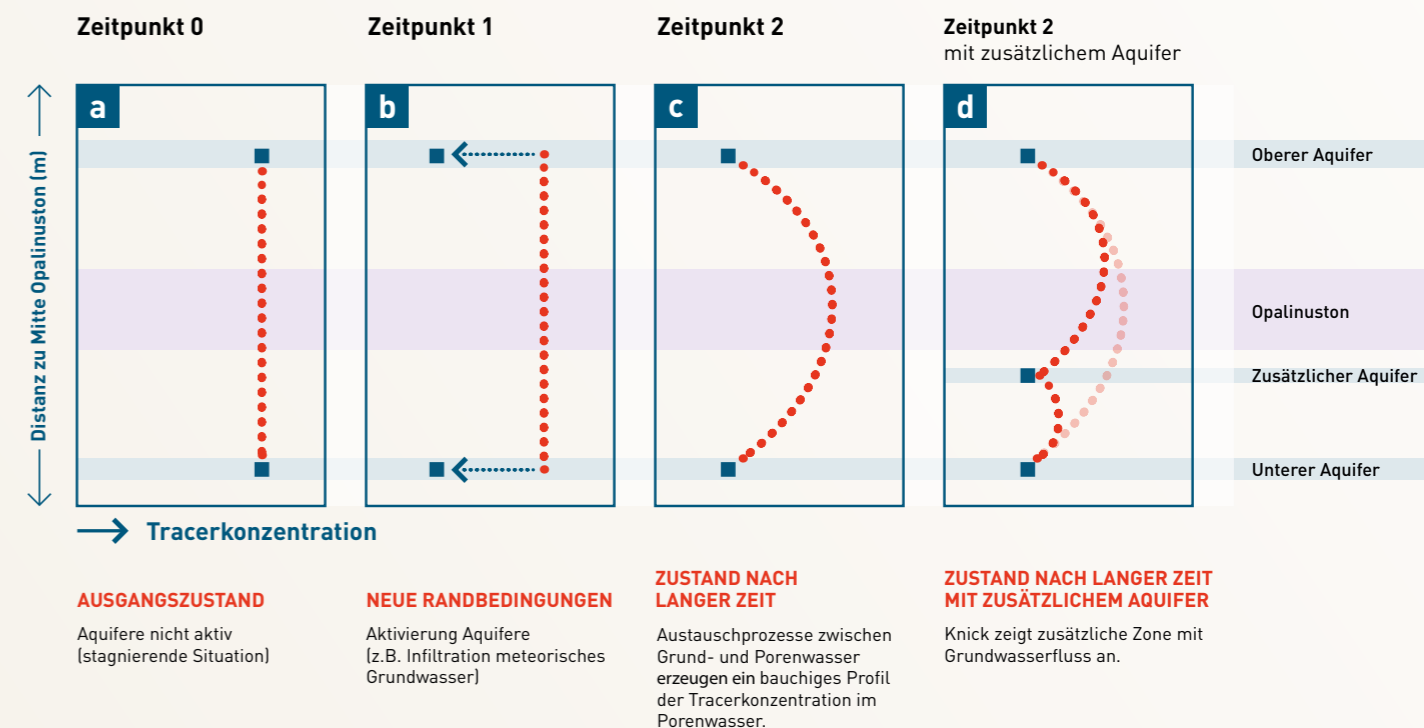


ABBILDUNG 2

Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Grund- und Porenwasserzusammensetzung. Auf der x-Achse ist jeweils die Konzentration eines natürlichen Tracers dargestellt, auf der y-Achse die für die Nordschweiz typische Gesteinssäule mit Opalinuston, angrenzenden geringdurchlässigen Gesteinen und den nächstliegenden Aquiferen.

ZUSAMMENSETZUNG VON GRUND- UND PORENWASSER

Die Isotopenzusammensetzung des Wassermoleküls (H_2O) von verschiedenen Proben kann in einem Diagramm visualisiert werden, in dem die Verhältnisse der Sauerstoff- ($\delta^{18}\text{O}$) und der Wasserstoffisotope ($\delta^2\text{H}$) dargestellt sind (Abbildung 3). In einer solchen Darstellung liegen Proben von Regenwasser und von oberflächennahem, jungem Grundwasser auf einer Geraden, der sogenannten Niederschlagsgeraden, man spricht von meteorischem Wasser. Die konkrete Zusammensetzung einer Probe ist dabei abhängig vom Klima: Niederschlag (Wasser, Schnee) aus vergangenen Kaltzeiten hat beispielweise eine deutlich andere Wasserisotopenzusammensetzung als heutiges Niederschlagswasser – Ersteres kommt ganz unten links zu liegen, Letzteres weiter oben auf der Niederschlagsgeraden. Im Porenwasser erhaltene, fossile Meerwasserkomponenten liegen nicht auf der Niederschlagsgeraden, sondern rechts davon. Werte, die nicht auf der Niederschlagsgeraden liegen, können alternativ auch auf sehr langsame Austauschprozesse zwischen Gestein und Porenwasser zurückzuführen sein. Porenwasserzusammensetzungen nahe an der Niederschlagsgeraden weisen auf einen intensiveren Austausch mit jüngeren, aus Niederschlag gebildetem Wasser hin (meteorisches Wasser).

Die Zusammensetzung des Porenwassers im Opalinuston ist das Resultat der geologischen Entwicklung der Nordschweiz und entwickelt sich durch die Wechselwirkung mit dem Wasser in den angrenzenden Aquiferen. Dabei spielen die Eigenschaften der geringdurchlässigen Schichten sowie die Distanz und Fliessdynamik in den Aquiferen eine Rolle.

Bei der Zusammensetzung des Porenwassers im Opalinuston werden Unterschiede zwischen den drei Standortgebieten beobachtet (Abbildung 3). Diese können erklärt werden durch eine unterschiedlich fortgeschrittene Mischung aus einem fossilen (besonders alten, rechts der Niederschlagsgeraden gelegenen) und einem jüngeren, meteorischen Wasser. In Nördlich Lägern werden die am weitesten rechts der Niederschlagsgeraden liegenden Isotopenzusammensetzungen des Opalinuston-Porenwassers beobachtet, in Zürich Nordost und insbesondere in Jura Ost liegen sie näher an der Niederschlagsgeraden und sind stärker durch die Wechselwirkung mit meteorischem Wasser überprägt.

OPALINUSTON PORENWASSER

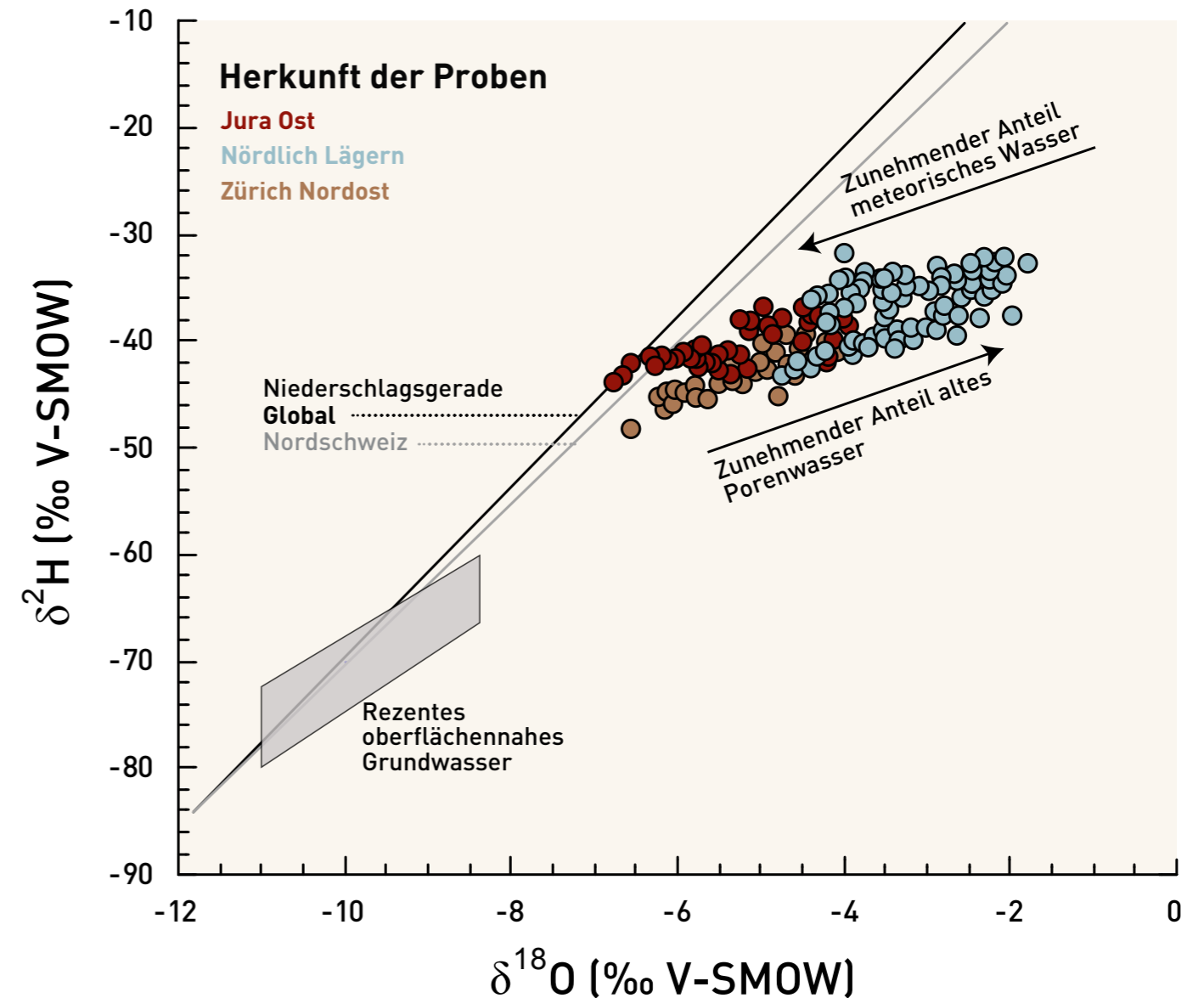


ABBILDUNG 3

Isotopenzusammensetzung des Wassermoleküls im Opalinuston-Porenwasser in den drei Standortgebieten im Vergleich.

Die Porenwasserzusammensetzung im Opalinuston ist beeinflusst durch sehr langsamen (diffusiven) Austausch des Porenwassers mit den naheliegendsten Grundwasserleitern. Für das Verständnis der vergangenen Transportprozesse und deren Unterschiede zwischen den Standortgebieten ist es deshalb wichtig, auch die Zusammensetzung des Grundwassers zu betrachten (Abbildung 4).

JURA OST

Hier geht die Porenwasserzusammensetzung im Opalinuston einher mit Grundwasserzusammensetzungen auf oder nahe an der Niederschlagsgeraden (Abbildung 4). Insgesamt zeigen die Grund- und Porenwasseruntersuchungen ein durch die Wechselwirkung mit oberflächennahem, meteorischem Wasser stark beeinflusstes System.

NÖRDLICH LÄGERN

Die Zusammensetzung des Opalinuston-Porenwassers geht hier einher mit einheitlichen, an $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ angereicherten Isotopenzusammensetzungen der Malm-Grundwässer (rechts der Niederschlagsgeraden; Abbildung 4); solche Zusammensetzungen deuten auf besonders hohe Verweilzeiten der Grund- und Porenwässer hin. Der Keuper-Aquifer konnte lediglich in zwei Bohrungen beprobt werden (vgl. Abbildung 1). Die Isotopenzusammensetzung liegt für diese Proben rechts der Niederschlagsgeraden. Insgesamt zeigen die Poren- und Grundwasserdaten aus Nördlich Lägern, dass hier besonders alte Grund- und Porenwasserkomponenten erhalten geblieben sind und vergleichsweise wenig Austausch mit oberflächennahem meteorischem Wasser stattgefunden hat.

ZÜRICH NORDOST

Hier zeigen die Porenwässer im Opalinuston in den unterschiedlichen Bohrungen nahezu identische Isotopenzusammensetzungen, die insbesondere durch die Wechselwirkung mit dem Grundwasser aus dem Keuper-Aquifer geprägt werden (Abbildung 4). Die Malm-Grundwässer zeigen zwischen den Bohrungen deutlich unterschiedliche Zusammensetzungen, die mit unterschiedlichen Anteilen von jüngerem meteorischem Wasser erklärt werden können: Trüllikon-1 zeigt eine ähnliche Isotopenzusammensetzung wie die Bohrungen in Nördlich Lägern. Demgegenüber zeigt das Malm-Grundwasser in Marthalen-1 eine Zusammensetzung ähnlich den rezenten Grundwässern. Insgesamt zeigen die Untersuchungen in Zürich Nordost die Bedeutung

des Keuper-Aquifers als Grundwasserleiter unterhalb des Opalinustons und eine im Vergleich mit Nördlich Lägern lokal höhere Fließdynamik des Malm-Aquifers.

STANDORTE IM VERGLEICH

Die Isotopenverteilung in den Wassermolekülen des Opalinuston-Porenwassers unterscheidet sich zwischen den Standortgebieten. Im Gebiet Nördlich Lägern liegt die Zusammensetzung von Poren- und Grundwässern am weitesten entfernt von der Niederschlagsgeraden – hier sind besonders alte Porenwasserkomponenten erhalten geblieben. Die Isolationswirkung des geologischen Gesamtsystems (Lagerebene bis Oberfläche) war hier in der Vergangenheit am effektivsten.

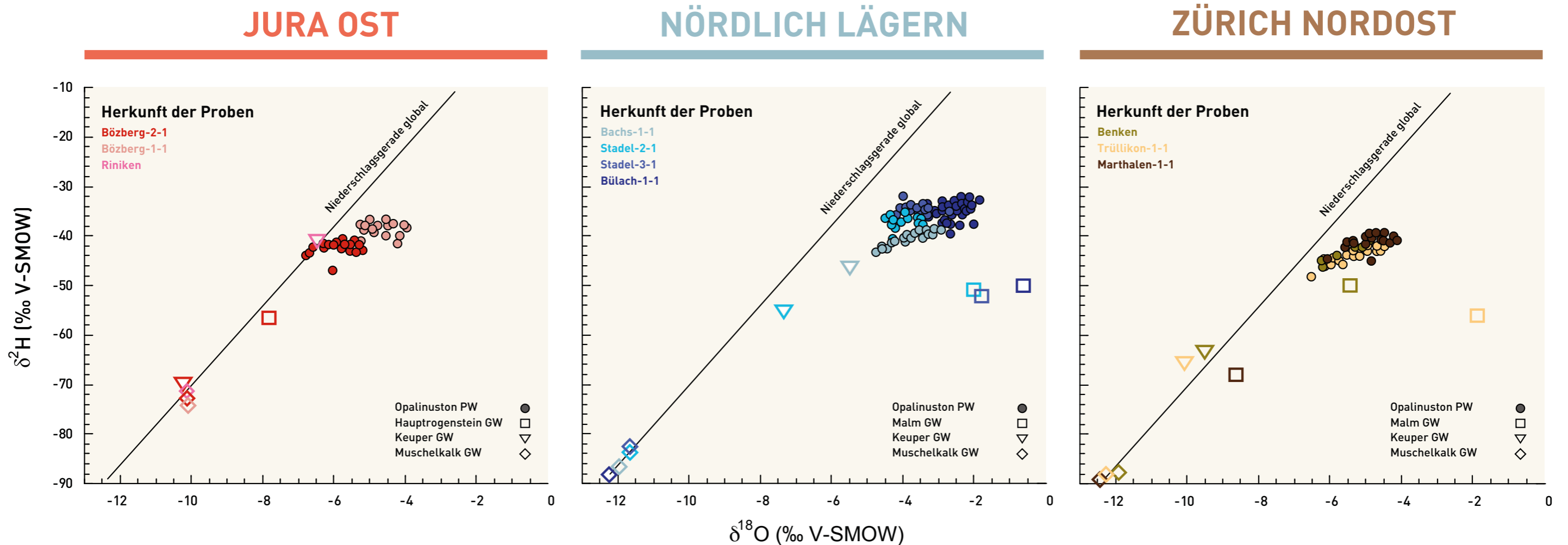


ABBILDUNG 4

Porenwasserzusammensetzung (PW) des Opalinustons in den Tiefbohrungen im Vergleich mit Grundwasserproben (GW) für die drei Standortgebiete.

nagra.



**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen

T. 056 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch