



# ARSEN IM TUNNELAUSBRUCHMATERIAL – RISIKO FÜRS GRUNDWASSER?

**Bei Tunnelbauprojekten im Kanton Zürich fallen grosse Mengen an Ausbruchmaterial aus der Oberen Süsswassermolasse (OSM) an. Dieses Material soll u. a. zur Wiederauffüllung von Kiesgruben oder für Geländegestaltungen verwertet werden. Erfahrungsgemäss können OSM-Gesteine geogen belastet sein. Meist ist Arsen massgebend. Daher muss sichergestellt werden, dass keine Gefährdung des Grund- bzw. Trinkwassers erfolgt. In dieser Studie wurde die Freisetzung von Arsen aus OSM untersucht und eine Risikoabschätzung durchgeführt.**

*Isabel Baur, Jäckli Geologie AG*

*Michael Plötze, ETHZ Institut für Geotechnik; Andreas Voegelin, Eawag*

## **PRÉSENCE D'ARSENIC DANS LES DÉBLAIS DE TUNNEL: UN RISQUE POUR LES EAUX SOUTERRAINES?**

Les déblais de la molasse d'eau douce supérieure (OSM) provenant de projets de construction de tunnels sont destinés à être réutilisés pour le remblayage de gravières ou l'aménagement de terrains. Ces matériaux peuvent présenter des teneurs géogènes élevées en arsenic, dont la toxicité représente potentiellement un risque pour les eaux souterraines et donc pour la qualité de l'eau potable. Des essais réalisés sur 21 échantillons de roches ont permis d'étudier leur composition, la fixation de l'arsenic et son comportement de solubilité dans différentes conditions. Les essais indiquent que l'arsenic est principalement présent sous forme d'oxyanion et qu'il se lie facilement aux oxydes de fer. Une mobilisation de l'arsenic n'a été observée qu'en présence d'une source de carbone aisément disponible et de bactéries présentes dans le sol. Une mobilisation significative de l'arsenic dans des conditions naturelles lors du stockage de matériaux en OSM pure semble peu probable. Indépendamment de cela, la faible perméabilité hydraulique d'un remblai compacté limite aussi fortement la charge d'arsenic éventuelle. Par conséquent, aucun risque pour les eaux souterraines n'est à prévoir du fait des teneurs géogènes en arsenic présentes dans les remblais constitués de matériaux en OSM issue de l'excavation de tunnels.

## **EINLEITUNG**

Im Kanton Zürich sind diverse Tunnelbauprojekte in Planung (z. B. Mehrspurausbau Zürich-Winterthur, Ausbau Zürich Stadelhofen oder Zimmerberg-Basistunnel). Dabei fallen grosse Mengen an Tunnelausbruch an (vgl. Fig. 1). Längere Streckenabschnitte sind im Felsuntergrund der Oberen Süsswassermolasse (OSM) projektiert. Das anfallende Ausbruchmaterial eignet sich aus technischen Gründen kaum zur Wiederverwertung als Baustoff oder als mineralischer Rohstoff und soll daher anderweitig wiederverwertet (Kiesgrubenauffüllung, Terrainveränderungen, evtl. auch Seeschüttungen) oder in Deponien abgelagert werden. Insbesondere die allgegenwärtigen Feinsand- und Siltsteine sowie Mergel der OSM können geogen bedingt erhöhte anorganische Schadstoffgehalte aufweisen, v. a. in Bezug auf die Schwermetalle Nickel und Chrom und das Halbmetall Arsen [1–4]. Die OSM wird in eine untere, ältere, OSM I und eine obere, jüngere, OSM II unterteilt; wobei die OSM I in der Regel einen höheren Anteil an arsen-, chrom- und nickelhaltigen Mineralien aufweist als die OSM II. Die aktuellen Zürcher Tunnelbauprojekte tangieren überwiegend die OSM II.

Die zur Wiederauffüllung vorgesehenen Kiesgruben im Kanton Zürich liegen aufgrund der Entstehungsgeschichte der kiesigen

*Kontakt: Isabel Baur, baur@jaeckli.ch*

*(Titelfoto: © Jäckli Geologie AG)*



Fig. 1 Maschinell unterstützter Felsvortrieb (MUF) per Teilschnittfräse mit anfallendem «kleinstückigem» Tunnelausbruch.

Ablagerungen typischerweise über bedeutenden Grundwasservorkommen, die als Trinkwasserressource genutzt werden. Da Aufschüttungen für lange Zeit der Durchsickerung mit Niederschlagswasser ausgesetzt werden und der Abstand zwischen Abbaukote und Grundwasserleiter lokal gering ist, besteht ein Risiko, dass allfällig vorhandene Schadstoffe mobilisiert werden und ins Grundwasser gelangen. Eine potenzielle Gefährdung besteht insbesondere bzgl. Arsen, das eher mobil und vergleichsweise toxisch ist. Der Grenzwert der Verordnung des Eidg. Department des Innern EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) liegt bei  $10\mu\text{g}/\text{l}$ .

Gegenstand der Studie ist Tunnelausbruchmaterial aus der OSM II, das gemäss heutigem Stand der Technik «rein» und «trocken» gefördert wird (kein schlammartiges Material aus Erddruckschildvortrieb). Bautechnische Zusatzstoffe wie z. B. Spritzbeton müssen systematisch vom Ausbruch separiert werden. Zum möglichen Einfluss von Polymeren

und von Schäumen, wie sie zum Beispiel bei Bauhilfsmassnahmen eingesetzt werden, wurden in dieser Studie keine Untersuchungen durchgeführt.

### GEOCHEMIE DES ARSENS

Arsen (As) kommt in der Umwelt in geringen Mengen weit verbreitet vor. Das Löslichkeitsverhalten von Arsen wird durch seine geochemische Form bestimmt und hängt im Wesentlichen von den pH- und Redox-Bedingungen ab. In Sulfid-Mineralien kann Arsen in den Oxidationszuständen As(-I), As(0) und As(III) vorkommen. Bei der Gesteinsverwitterung wird Arsen i.d.R. zu Arsenat As(V) oxidiert. Arsenat bindet bei saurem bis neutralem pH stark an Metalloxide. Unter alkalischen Bedingungen ( $\text{pH} \gg 7$ ) kann Arsenat desorbiert und mobilisiert werden. Reduzierende Bedingungen, ausgelöst durch den Abbau organischer Substanz, können zur Auflösung von Metalloxiden und parallel zur Umwandlung von Arsenat in Arsenit As(III) führen, was eine höhere Löslichkeit von Arsen zur Folge hat.

### DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

Im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) hat die *Jäckli Geologie AG* 2023–2025 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik der ETH Zürich und der Eawag eine Studie durchgeführt [5]. Dabei wurden 22 stichprobenartig aus Kernbohrungen im Kanton Zürich gewonnene Proben der OSM II sowie eine Probe der Unteren Süsswassermolasse (USM) chemisch und mineralogisch untersucht. Zur Bestimmung der Einbindung und des Löslichkeitsverhaltens von Arsen wurden Eluat-, Extraktions- und Inkubationsversuche unter verschiedenen Bedingungen im Labor durchgeführt. Unter anderem wurde dabei in Inkubationsversuchen der Einfluss der Verfügbarkeit von abbaubarem organischem Kohlenstoff und Bodenbakterien auf die reduktive Arsenmobilisierung untersucht. Zusätzlich wurde das Auswaschverhalten in einem Muldenversuch im grösseren Massstab untersucht.

Vergleichbare Untersuchungen zur Löslichkeit von Arsen in Gehängelehm, Molassefels und Moräne des Zürcher Unterlands wurden 2017 von der *Eberhard Recycling AG* durchgeführt [6].

## ERGEBNISSE

### GESTEINSCHEMIE, ARSEN-EINBINDUNG

Bei den 21 untersuchten OSM II-Proben handelte es sich hauptsächlich um Mergel (13), um sandige Mergel bis mergelige Sandsteine (5) sowie um Sandstein (3). Zusätzlich wurde eine Probe der USM untersucht. Der Probensatz hat angesichts des grossen Gesteinsspektrum einen stichprobenartigen Charakter. Die Felsproben wiesen eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung auf und bestanden hauptsächlich aus Karbonaten (Ø50 Gew.-%), Tonmineralien (Ø30 Gew.-%, v.a. Smektit) und Quarz (Ø 17 Gew.-%). Aufgrund der grossen spezifischen Oberfläche (Ø 15 m<sup>2</sup>/g) und hohen Kationenaustauschkapazität (Ø 13 cmol/kg) führt ein hoher Anteil an Tonmineralien grundsätzlich zu einem hohen Bindevermögen für kationische Schadstoffe, aber weniger für das Oxyanion Arsenat (AsO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, im neutralen pH-Bereich ein- oder zweifach protoniert vorliegend). Dieses bindet andererseits stark an Metalloxyde, v.a. Eisenoxide. Der Eisengehalt lag bei durchschnittlich 2,6 Gew.-% mit geringen Schwankungen, was für

ein Sedimentgestein, das nicht als «eisenreich» gilt, im normalen Bereich liegt (eisenreich: Anteil Fe > 15%).

Der Arsengehalt der Proben lag zwischen 0,2 und 36 mg/kg (Median 7 mg/kg), wobei die Sandsteinproben vergleichsweise tiefe Gehalte aufwiesen (Fig. 2). Dies dürfte dadurch bedingt sein, dass Arsen hauptsächlich an Tonminerale gebunden vorliegt (Ausnahme: Vererzungen). Die USM-Probe wies einen deutlich höheren Gehalt auf. Der Grenzwert «unverschmutzt» gemäss Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) von 15 mg/kg wurde mehrheitlich eingehalten. Die gemessenen Gehalte liegen im Bereich der in der Literatur bisher dokumentierten Werte für die OSM [1, 3, 4]. Erfahrungsgemäss können lokal aber auch signifikante Abweichungen auftreten [6]. Die mineralogischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass Arsen nicht in Form von Sulfiden vorliegt, die unter oxischen Bedingungen instabil wären.

Das Verhältnis von Arsen zu Eisen (As/Fe) lag in allen Proben unter 1/1000 und war damit sehr tief. Saure Extraktionsversuche lassen vermuten, dass Arsen präferenziell mit in geringen Mengen vorhandenen, schwach kristallinen Eisenoxiden assoziiert ist, welche ihrerseits nur in geringen Anteilen extrahierbar waren. Weiter dürften die gemessenen geringen Porositäten (Ø 12%) und kleinen

Porengrössen (Ø Modal 8 µm) zu einer relevanten Retardation bei einer allfälligen Arsenatmobilisierung führen, die unter oxischen Bedingungen erwartet würde. Damit zeigen die untersuchten Proben grundsätzlich Eigenschaften, die auf eine eher starke Einbindung von Arsen im Molassegestein unter oxischen Bedingungen hinweisen [5].

### BEOBACHTETE ARSEN-LÖSLICHKEITEN

In den Inkubationsversuchen mit Calciumchlorid-Lösung erfolgte dann eine relevante Mobilisierung von Arsen bis zu Konzentrationen > 10 µg/l im Eluat, wenn sowohl eine Kohlenstoffquelle als auch Bodenmaterial als Quelle zusätzlicher Bakterien zugesetzt wurden und so der Übergang zu reduzierenden anoxischen Verhältnissen gefördert wurde (vgl. Fig. 3). Unter diesen Bedingungen war damit eine reduktive Arsenmobilisierung erkennbar. Eine analoge Versuchsreihe mit destilliertem Wasser ergab nur ohne Zusätze erhöhte Arsengehalte bis 12 µg/kg, mutmasslich bedingt durch die Dispersion von kolloidalen Gesteinspartikeln bei niedriger Ionenstärke und/oder den Anstieg des pH-Werts in den alkalischen Bereich (pH ~10). In den übrigen Laborversuchen (Langzeit-Eluattests sowie kurzzeitige Extraktionsversuche mit Calciumchlorid unter oxischen Bedingungen) wurden nur sehr geringe



Fig. 2 Arsengehalte in OSM-II-Proben gemäss XRF-Analysen der Eawag. Median über alle 22 Proben (inkl. USM): 7 mg/kg Arsen.

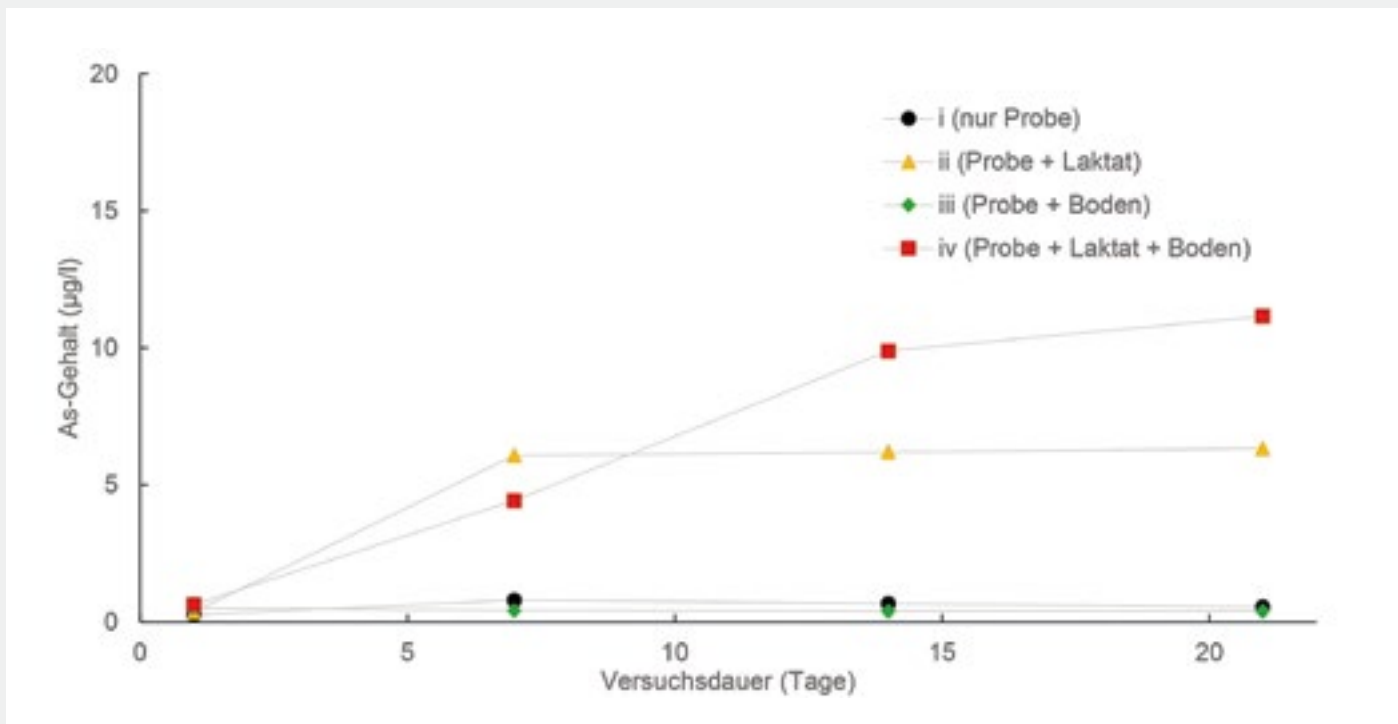


Fig. 3 Entwicklung des Arsengehalts der Probe 31 (21,5 mg/kg Arsen) bei anoxischer Inkubation mit Calciumchlorid-Lösung (Stabilisierung pH bei 7–8).

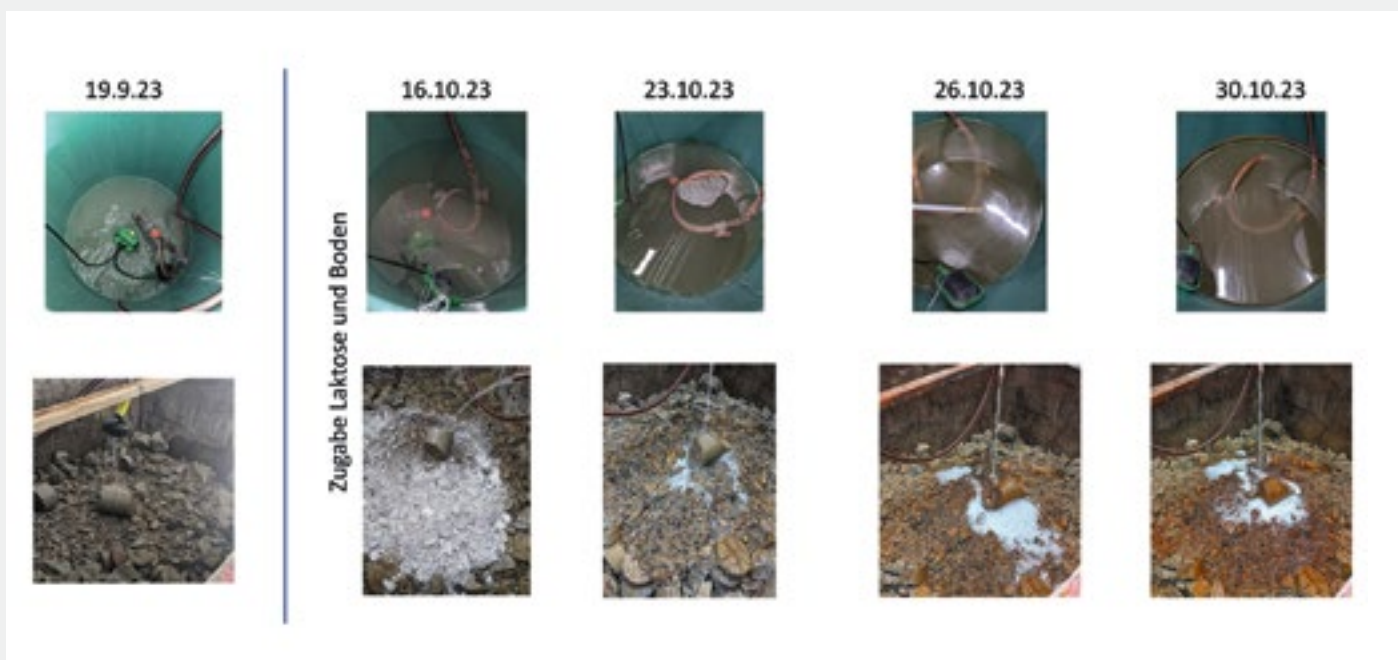


Fig. 4 Sechswöchiger Auswaschversuch in Minimulde mit rund 0,6 m<sup>3</sup> Molasseaufbruch über Sickerpackung.  
Fotos oben: Stapelbehälter mit Kreislaufwasser und Pumpe; Fotos unten: Aufsicht Mulde.

oder keine bestimmaren Arsengehalte gemessen.

Figur 4 zeigt einen grossmassstäblichen Muldenversuch. In diesem Versuch führte die Zugabe einer Kohlenstoffquelle (Laktose) und Bodenbakterien zu intensiver biologischer Aktivität zumindest an der Oberfläche und im Kreislaufwasser zu stark erhöhten Gehalten an Eisen und gelöstem Kohlenstoff (DOC) sowie erhöhten Gehalten an einigen Schwer-

metallen im Eluat (vermutlich durch Komplexbildung mit DOC). Die Konzentration von Arsen blieben hingegen konstant tief (~4 µg/l).

#### ELUATVERSUCHE EBERHARD RECYCLING AG

An vier Proben von Gehängelehm (entstanden aus der Verwitterung von OSM I), einer Probe aus Molassefels (OSM I) und einer Probe aus Moräne mit vergleichsweise hohen Arsengehalten

von 23–52 mg/kg hat die Eberhard Recycling AG mit DOC angereicherte, saure und neutrale Eluate sowie Inkubationen durchgeführt [6]. Auch diese ergaben keine Hinweise auf eine relevante Mobilisierung von Arsen aus Feststoffproben. Die in den Eluaten gemessenen Arsengehalte lagen mehrheitlich im Bereich der Bestimmungsgrenze (1 µg/l), teils leicht darüber (bis 7 µg/l bei tiefem Redox-Potenzial).

## EXTRAPOLATION AUF NATÜRLICHE BEDINGUNGEN

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den beschriebenen Feld- und Laborversuchen nur unter ausreichend stark reduzierenden Bedingungen eine messbare Arsenmobilisierung beobachtet wurde. Da in Sickerwasser von frisch aufgebrochenem Molassegestein, bedingt durch Smekтите, erhöhte pH-Werte (bis ca. 10) möglich bis wahrscheinlich sind, kann eine anfängliche Arsenmobilisierung nicht ausgeschlossen werden. Bei den in den Versuchen angetroffenen Arsengehalten dürfte diese jedoch kaum messbar sein. Längerfristig wird ein tieferer pH-Wert erwartet, unter welchen Bedingungen Arsen schlecht löslich ist. Ein relevanter mikrobieller Abbau in aufgebrochenem Molassegestein und damit verbunden eine reduktive Mobilisierung von Arsen ist mangels ausreichend vorhandener, mikrobiell verfügbarer Kohlenstoffquelle im Molassegestein nicht zu erwarten. Entsprechend erscheint es gemäss heutigem Kenntnisstand sehr unwahrscheinlich, dass aus reinem OSM-II-Tunnelausbruchmaterial langfristig Sickerwasser mit Arsengehalten  $> 10 \mu\text{g/l}$  eluiert. Dies gilt mutmasslich auch für OSM-I-Tunnelausbruchmaterial [6]. Untersuchungen an 16 Proben von Grund- und Quellwasser aus OSM-Gebieten und aus Bereichen von teils mit Molasseaufbruch aufgefüllten Kiesgruben im Kanton Zürich unterstützen diese Aussage [5]. Die dort gemessenen Arsengehalte lagen durchwegs unter  $1,5 \mu\text{g/l}$ .

## FREISETZUNGS- UND GEFÄHRDUNGSPOTENZIAL

Das Freisetzungspotenzial für anorganische Schadstoffe hängt von deren Löslichkeit unter natürlichen Bedingungen sowie dem Ausmass der Durchsickerung und der verfügbaren (wasserzugänglichen) Oberfläche des Materials ab.

Zwar werden in Schüttkörpern bei einem geringen Wasser-Feststoff-Verhältnis höhere Schadstoffgehalte im Sickerwasser als in den durchgeführten Versuchen erwartet. Da aber der Sickerwasserdurchfluss in verdichtetem Molasseausbruch von mehreren Metern Mächtigkeit aufgrund der niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit als sehr gering beurteilt wird (zu erwartender hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert  $K$  um  $10^{-10} \text{ m/s}$  [5]), wird

die gesamthaft austretende Arsenfracht auch bei einer grossflächigen Ablagerung als gering eingeschätzt. Wenn Molasseausbruch über bedeutenden Grundwasserleitern abgelagert wird, so ist das Grundwasser exponiert, da allfällig vorhandene Schadstoffe direkt ins Grundwasser gelangen können. Entscheidend für eine allfällige Gefährdung ist die Frachtbetrachtung resp. das Mengenverhältnis, in welchem potenziell schadstoffhaltiges Sickerwasser ins Grundwasser gelangt. Bei vergleichsweise geringen Mengen an Sickerwasserzutritten in ergiebige Grundwasserleiter mit hoher Durchlässigkeit (hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert  $K$  von  $10^{-3} \text{ m/s}$ ) ist die zu erwartende Arsenfracht aus Ablagerungen von OSM-II-Ausbruchmaterial mit geringen Gehalten abbaubaren organischen Materials als vernachlässigbar einzuschätzen. Entsprechend ist keine Gefährdung des Grundwassers durch natürliche Spurenelementgehalte im Schüttkörper zu erwarten.

Demgegenüber kann das Vorhandensein von substanziellen Mengen an abbaubaren organischen Substanzen in abgelagertem Tunnelausbruchmaterial zu reduzierenden Verhältnissen führen, was die Mobilisierung von geogenem Arsen begünstigen könnte. Entsprechend sollte ein Eintrag von organischen Substanzen (z. B. infolge Vermengung mit organischem Material wie abgetragenem Boden) bei der Ablagerung vermieden werden.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Tuchschnid, M./BUWAL (1995): *Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz*
- [2] Dr. Heinrich Jäckli AG (2004): *Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse (OSM). Dokumentation des Kenntnisstandes. NAGRA NAB 04-04*
- [3] Neros/BAFU (2019): *Geogene Belastungen in Gesteinseinheiten der Schweiz. Übersicht, Charakterisierung, Handlungspotenzial*
- [4] Universität Bern (2021): *Zusammenfassender Bericht über bestehende Studien und Untersuchungen zu geogenen Schadstoffgehalten in Böden und Gesteinen der Schweiz*
- [5] Jäckli Geologie AG (2025): *GeoTAM Kanton Zürich. Studie zur Ablagerung von geogen belastetem Tunnelausbruchmaterial in Gebieten mit nutzbarem Grundwasservorkommen*
- [6] Eberhard Recycling AG (2017): *Deponie Chalberhau, Gefährdungsabschätzung Aushubmaterial*

**WASSER ▼ BODEN ▼ LUFT**  
Analytische Untersuchungen und Beratung

**envilab**

ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT

ENVILAB AG

Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen  
T 062 745 70 50, [www.envilab.ch](http://www.envilab.ch)