
Geotechnische Untersuchungen

I. Tunnelausbruch mit veränderlichen Abfalleigenschaften – Umgang mit pyrithaltigen Erdmassen im Projekt Stuttgart–Ulm

Jörg-Rainer Müller, Thomas Mußotter, Katrin Schumacher

Die Neubaustrecke Wendlingen–Ulm mit einer Streckenlänge von ca. 60 km wird rund zur Hälfte in Tunneln geführt und zu einem Großteil mit der Tunnelvortriebsmaschine (TVM) aufgefahen. Während der Bauausführung wurde festgestellt, dass der Sulfatgehalt des Tunnelausbruchmaterials zwischen Ausbruch und Ablagerung durch Pyrit-Oxidation zunimmt. Daher wurden mit den Behörden und allen anderen Beteiligten für die Entsorgung des Tunnelausbruchmaterials verschiedene Lösungen wie die Verwertung im Projektgebiet sowie in der keramischen Industrie entwickelt. Mit dem Ziel, trotz der zeitlichen Veränderlichkeit des Sulfatgehalts eine Ablagerung der Tunnelausbruchmassen auf Verwertungsstellen gemäß Erstdeklaration zu ermöglichen, wurde zusätzlich vom Umweltministerium von Baden-Württemberg am 7. April 2017 der sogenannte Pyriterlass veröffentlicht. Damit wurde in Abstimmung mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg ein Weg für die fachlich und rechtlich sinnvolle und sichere Bewertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial mit veränderlichen Eigenschaften (Sulfat) geschaffen. Beim Bau des Boßlertunnels sowie des Albvorlandtunnels konnten umfangreiche Erfahrungen bei der Umsetzung des Pyriterlasses und der Ausweitung auf andere veränderliche Parameter sowie bei der Verwertung im Projektgebiet gesammelt werden.

Tunnel spoil with changeable waste properties – dealing with earth masses containing pyrite on the Stuttgart–Ulm project

About half of the new line from Wendlingen to Ulm with a length of about 60 km will run in tunnels, which are mostly being bored with tunnel boring machines (TBM). During construction, it was discovered that the sulphate content of the material excavated from the tunnel increases between excavation and deposition due to pyrite oxidation. Therefore, various solutions were developed with the authorities and all other involved parties for the disposal

of the tunnel spoil like reuse in the project area and in the ceramics industry. Furthermore, the so-called pyrite decree was published by the environment ministry of Baden-Württemberg on 7 April 2017 with the objective of enabling the deposition of tunnel spoil at reuse sites in accordance with an initial declaration despite the temporal changeability of the sulphate content. Thus, a way was found in agreement with the environment ministry of Baden-Württemberg for the proper and legally sensible and safe recycling of the soil material classified as waste with changeable properties (sulphate content). For the construction of the Boßler Tunnel and the Albvorland Tunnel, extensive experience could be gained with the implementation of the pyrite decree and its extension to other changeable parameters as well as reuse within the project area.

1 Die TVM-Tunnel der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm

Das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm gliedert sich in zwei Teilprojekte:

- Das Projekt Stuttgart 21 mit insgesamt acht Planfeststellungsabschnitten (PFA),
- Die Neubaustrecke Wendlingen–Ulm mit insgesamt fünf PFA [1].

Die Hälfte der 60 km langen Neubaustrecke führt durch neun Tunnel, ansonsten folgt sie in enger Bündelung der parallelen Bundesautobahn (BAB) A8.

An der Neckarbrücke bei Wendlingen beginnt der erste PFA der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm, der PFA 2.1 a/b (Bild 1). Die beiden eingleisigen Tunnelröhren des 8,2 km langen Albvorlandtunnels werden von zwei parallel bohrenden Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) aufgefahren und unterqueren die BAB A8. Anschließend folgt der 5 km lange Planfeststellungsabschnitt PFA 2.1c.

Im darauffolgenden 15 km langen PFA 2.2 (Bild 2) erklimmt die Neubaustrecke die Schwäbische Alb. Zunächst erfolgt der Anstieg im 8,8 km langen Boßlertunnel, anschließend im 4,8 km langen Steinbühlertunnel. Zwischen den beiden Tunneln quert die Strecke bei Mühlhausen im Täle das Filstal. Der Boßlertunnel wurde mit einer TVM aufgefahren, die beide Röhren nacheinander hergestellt hat.

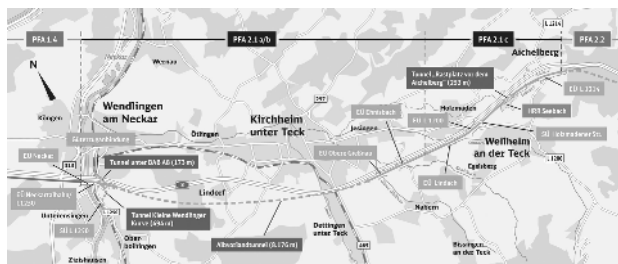


Bild 1. Übersichtskarte PFA 2.1

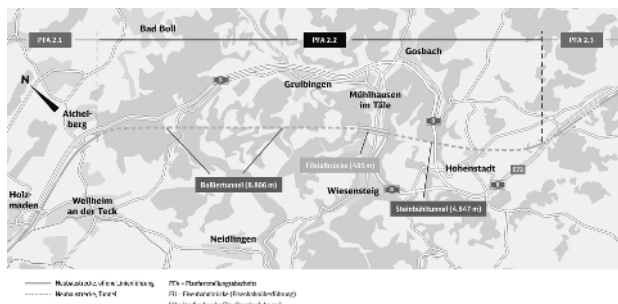


Bild 2. Übersichtskarte PFA 2.2

Die beiden TVM-Tunnel der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm durchfahren Schichten des Braunen, Schwarzen und des unteren Weißen Juras und weisen dabei bindige Ton- und Mergelschichten mit reduzierendem Milieu auf. Bei beiden Tunnelbaumaßnahmen fallen ca. 10 Mio. t Tunnelausbruchmaterial an, das einer Beseitigung bzw. Verwertung zugeführt werden muss.

2 Herausforderung der Verwertung bzw. Beseitigung chemisch veränderlicher Tunnelausbruchmassen

Im Sommer 2016 nach rund 70 % Vortrieb in der Oströhre des Boßlertunnel und der damit verbundenen Verwertung von rund 1,5 Mio. t Material erfolgte die Rückmeldung einer Verwertungsstelle, dass die Sulfatgehalte des bereits eingelagerten Materials nicht mehr der ursprünglichen Deklaration Z0 (Sulfat < 50 mg/l) entsprechen und das Material höhere Sulfatgehalte aufweist als für diesen Standort zulässig.

Mit diesem Wissen erfolgten zunächst mehrere Nachkontrollen und Überprüfungen der Laborergebnisse, die jedoch alle den Sachverhalt des erhöhten Sulfatgehalts in dieser spezifischen Verwertungsstelle bestätigten. Als erster Maßnahmenschritt wurde die Entsorgung von der Baustelle eingestellt und der Vortrieb bis zur Klärung der Ursache für zwei Wochen unterbrochen. Darüber hinaus wurden bei weiteren Verwertungsstellen Laboruntersuchungen durchgeführt und alle bisher angefahrenen Standorte zur Fremdüberwachung aufgefordert. In Summe war nach allen Untersuchungen vor Ort, Laboruntersuchungen sowie mineralogischen Untersuchungen festzustellen, dass es sich bei dem Sulfatgehalt im Ausbruch des Boßlertunnel um einen veränderlichen Parameter handelt und sich die Einstufung der Verwertung im Laufe der Zeit verändern kann.

Das Material der Oströhre war in über 30 Standorten verteilt. Etwa ein Drittel der Menge (0,5 Mio. t) wurde in Baden-Württemberg und ca. zwei Drittel (1 Mio. t) in Bayern mit Entfernungen von 15 bis über 250 km vom Entstehungsort abgelagert. Ein Großteil dieser Mengen hatte nach Überprüfung der Fremdüberwachung erhöhte Sulfatgehalte gegenüber den Erstdeklarationen auf der Baustelle. Die Ursache dafür war die sog. Pyritoxidation, und dieser Umstand war zudem unabhängig von den verschiedenen geologischen Einheiten im Boßlertunnel. Diese geologischen Einheiten enthalten Pyrit (Eisensulfid, FeS_2) in Zehntelmillimeter bis millimeterfeinen Konkretionen (Bild 3), Aggregaten oder Überzügen von Mineralkörnern (z. B. Quarz), das sich zu Sulfat umwandelt.

Mit diesem vertieften Wissen waren nunmehr zwei Hauptthemen zu lösen.

- Der technische und umwelt-/abfallrechtliche Umgang mit dem Material in den bereits belieferten Verwertungsstellen bei Überschreitungen des zulässigen Sulfatgehalts.
- Die Lösungsfindung für die Verwertung des noch auszubrechenden Materials der Oströhre und der kompletten Weströhre mit rund 3 Mio. t Ausbruchmaterial sowie des Materials des Albvorlandtunnels entsprechend der Gesetzeslage.

Als Grundlage dafür musste für das Ausbruchmaterial zunächst ein Prozessverständnis für die veränderlichen Sulfatgehalte und den zu erwartenden Einfluss auf das Schutzgut Grundwasser geschaffen werden.



Bild 3. Pyritknollen auf einzelnen Bruchstücken des Tunnelausbruchmaterials des Albvorlandtunnels

3 Sulfatentstehung und Freisetzung durch Pyritoxidation

In den angetroffenen Formationen ist das sulfidische Mineral Pyrit über geologische Zeiten stabil. Insoweit erbrachte die Bodenuntersuchung zur Deklaration des Ausbruchmaterials im Hinblick auf den Sulfatgehalt in der Planungsphase der Trasse keine Auffälligkeiten.

Durch den Abbau während des Tunnelvortriebs wird das Pyrit stark mechanisch beansprucht, die feinkörnigen Pyritaggregate werden weiter zerkleinert und die reaktiven Oberflächen vergrößert. Durch diese mechanische Beanspruchung wird die Oxidation aktiviert, die sich durch die Lagerung an der Luft, durch Niederschläge und ggf. unterstützt durch Aufheizung durch Sonneneinstrahlung fortsetzt. Aus FeS_2 entsteht durch die Reaktion mit Sauerstoff Sulfat $[\text{SO}_4]^{2-}$. Dieser Prozess kann nach den bisher gemachten Erfahrungen nach mehreren Tagen bis wenigen Wochen beginnen, sodass ihn die zeitnah durchzuführende Beprobung für die Erstdeklarationsanalyse noch nicht bzw. noch nicht im vollen Umfang erfasst. Die Deklarationsergebnisse für Sulfat waren i. d. R. auf der Baustelle Z0. Je nach Randbedingungen kann sich das nach mehreren Tagen bis Wochen ändern, und bei Kontrollanalysen wurden z. T. deutlich höhere Sulfatgehalte im Bereich von Z1.2 bis Z2 ($\leq 150 \text{ mg/l}$), teils auch über Z2 ($> 150 \text{ mg/l}$) festgestellt.

Mineralogische Untersuchungen haben ergeben, dass z. B. der Impressamergel des unteren Weißen Jura lediglich ca. 0,8 M.-% Pyrit enthält, aus dem theoretisch ca. 1,2 M.-% Sulfat entstehen können, d. h. je Tonne feuchten Bodens ca. 11 kg. Die vollständige Umwandlung des Pyrits in Sulfat im wieder eingebauten Zustand des Bodens würde selbst in geologischen Zeiträumen einen nicht zu erwartenden absoluten Worst Case darstellen. Offensichtlich ist nicht unbedingt ein hoher Pyritgehalt im Bereich mehrerer Masseprozent für die Höhe der Sulfatfreisetzung primär entscheidend, sondern eher eine feine Verteilung und damit einhergehend große Oberflächen.

Nach der Feststellung der Pyritthematik wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (u. a. Probefelder), um den zeitliche Verlauf, die Randbedingungen und die zu erwartenden Konzentrationen an Sulfat einordnen zu können. Als Ergebnis von weit über hundert

Sulfatanalysen in Zeiträumen von einigen Tagen nach Ausbruch bis über ein Jahr zurückliegend bleibt festzuhalten, dass je nach Randbedingungen eine relativ große Streuung zwischen Z0 und > Z2 festzustellen war. Im Mittel war am Boßlertunnel mit Z2 bis 150 mg/l zu rechnen, Einzelwerte lagen zwischen 200 und 300 mg/l.

Einflussfaktoren sind, neben dem Pyritgehalt, vor allem wie feinkörnig das Pyrit aufgeschlossen ist (Oberflächen), die Lagerungsdichte (verdichtet oder locker eingebaut), die Exposition der Lagerung (flächige Schicht oder Halde, oberflächennah oder in größerer Tiefe) und als Folge ungehinderte oder behinderte Sauerstoff- und Niederschlagswasserzutritte sowie der zeitliche Verlauf von Entnahme, Zwischenlagerung und Einbau.

Insgesamt blieb die Interpretation der breit streuenden Sulfatgehalte im Einzelfall schwierig. Es kristallisierte sich jedoch heraus, dass diese durch die Milieuänderung vom reduzierenden zum oxidierenden Milieu stattfindende Oxidation von Pyrit, verbunden mit der Sulfatfreisetzung, am besten minimiert werden kann, wenn das bindige Bodenmaterial möglichst kompakt und verdichtet eingebaut und von weiteren möglichst bindigen Bodenschichten überdeckt wird. Durch die sehr geringen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte werden aus dem bindigen Bodenmaterial sehr geringe Frachten bereits gebildeten Sulfats ausgetragen und die Neuentstehung von Sulfat aus Pyrit durch weitestgehenden Sauerstoffabschluss minimiert bzw. unterbunden.

Der Grenzwert für die Verwertung des Materials liegt für Sulfat bei 150 mg/l und entspricht damit der Klasse Z2 gemäß Verwaltungsverordnung Boden Baden-Württemberg [2]. Sulfaten im Allgemeinen werden sogar heilende Eigenschaften zugesprochen, z.B. die Förderung der Funktion der Bauchspeicheldrüse und Gallenblase. Sulfat gilt als geeignet zur Reduzierung von erhöhten Blutfettspiegeln. In der Mineralwasserindustrie werden zudem Mineralwässer mit deutlich höheren Sulfatgehalten als hier angeboten, z.B. San Pellegrino mit 430 mg/l oder noch extremer bei Sportmineralwässern mit 1.535 mg/l (Enzinger). Im Bereich der deutschen Trinkwasserverordnung liegt der Grenzwert für Sulfat auch höher, nämlich bei 250 mg/l. Die Grenzwertdefinition beruht hierbei einerseits auf der Thematik

des Schutzes der Leitungen und Armaturen vor Korrosion als auch auf der Thematik der Geschmacksbeeinflussung.

4 Verwertungsmöglichkeiten des veränderlichen Tunnelausbruchmaterials

Allein schon aufgrund der großen Menge an Tunnelausbruch, die in sehr kurzer Zeit anfällt, wurden im Zuge der Planung und Planfeststellung der Baumaßnahme die Verwertungsmöglichkeiten für den Tunnelausbruch untersucht und so weit wie möglich planerisch umgesetzt. In den erstellten Abfallkonzepten für die Verwertung und Beseitigung des Aushubmaterials für die Ausschreibung gab es Angaben zu den voraussichtlichen abfallrechtlichen Einstufungen des Tunnelausbruchs. In den Gutachten wurde auch auf die geogenen Belastungen durch Sulfat eingegangen, jedoch nicht auf die durch die Baumaßnahme bedingte Veränderlichkeit der Sulfatgehalte. Die darauf basierenden Abfallkonzepte waren nunmehr durch die Veränderlichkeit des Materials im Parameter Sulfat, neu zu erstellen und an die aktuellen Rahmenbedingungen anzupassen.

Um hinsichtlich der Verwertung des pyrithaltigen Tunnelausbruchs eine einheitliche Regelung zu finden, hat das Umweltministerium Baden-Württemberg nach umfassender fachlicher Diskussion am 7. April 2017 den sogenannten Pyriterlass [3] veröffentlicht. Dieser Pyriterlass war die Basis für die Verwertung in Verwertungsstellen entsprechend der Erstdeklaration (Abschnitt 6), die Verwertung direkt im Projektgebiet (Abschnitt 7) und die Verwertung in der keramischen Industrie (Abschnitt 8).

5 Der Pyriterlass

Grundlage für den Pyriterlass des Umweltministeriums Baden-Württemberg war dabei ein von der ICP erstelltes Gutachten über die Randbedingungen und Auswirkungen der Verwertung von pyrithaltigem Material aus dem Tunnelbau der Neubaustrecke Wendlingen–Ulm [4]. Die wesentlichen Inhalte des Gutachtens werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

5.1 Voraussetzungen

5.1.1 Grundannahmen und Analyseerkenntnisse

Die Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14. März 2007 (VwV Boden) gilt als maßgebliche und anerkannte Konvention zum Ausgleich der Interessen von Abfallwirtschaft, Boden- und Grundwasserschutz. Mit dieser Konvention wird hinreichender Schutz von Mensch und Umwelt garantiert. Jegliche Verwertung von Bodenaushubmaterial in Baden-Württemberg hat sich also an der VwV Boden als maßstabsbildende Anforderung zu orientieren. Die VwV wird mittelfristig von der Neufassung der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung abgelöst. In dieser Neufassung ist dem Referentenentwurf des Bundesumweltministeriums zufolge Sulfat kein Grenzwert mehr, sondern ein Screening-Parameter. Dies bedeutet, im Hinblick auf Sulfat werden künftig ohnedies Einzelfallbetrachtungen anzustellen sein, in der Art, wie nachfolgend beschrieben.

Bezüglich des hier relevanten Parameters Sulfat ist damit die freie und unbedingte Verwertbarkeit von Bodenaushubmaterial bei einem Eluatwert von 50 mg/l Sulfat (= Z0 nach VwV Bodenverwertung) als Konvention anerkannt. Somit gilt es, bei Bodenmaterial, das die potenzielle Sulfatquelle Pyrit enthält, gleichwertige Situationen dauerhaft wie folgt herzustellen.

Durch zusätzliche technische und betriebliche Maßnahmen ist der Sulfataustrag aus dem pyrithaltigen Bodenmaterial geringer oder gleich demjenigen aus Bodenmaterial mit dem Laborergebnis 50 mg/l Sulfat in Verwertungskonfigurationen ohne zusätzliche technische und betriebliche Maßnahmen zu gewährleisten.

Aus zahlreichen Untersuchungen zu Tunnelausbruchmaterial aus dem Boßlertunnel am Alaufstieg konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund des bindigen Charakters (hoher Fein- und Feinstkornanteil: ca. 30 bis 100 M.-% Schluff, ca. 20 bis 50 M.-% Ton) das Material insbesondere bei lagenweisem, verdichtetem Einbau sehr dicht (wasserundurchlässig) ist.

5.1.2 Randbedingung kompakter und verdichteter Einbau

Aufbauend auf mehreren Gefährdungsabschätzungen zum Thema Sulfatfreisetzung konnte herausgearbeitet werden, dass die pyrit-haltigen bindigen Böden bereits bei schwach verdichtetem Einbau (Verdichtungsgrad $D_{Pr} \approx 90\%$ der einfachen Proctordichte) Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von $k_f \approx 1 \cdot 10^{-9}$ m/s aufweisen (sehr schwach durchlässig nach DIN 18130). Bei einem lagenweisen, verdichteten Einbau ($D_{Pr} \geq 95$ bzw. 97 %) werden Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte im Bereich $k_f \approx 10^{-10}$ bis 10^{-11} m/s erreicht.

Überträgt man die in Laborversuchen ermittelte Kornverteilung (grau hinterlegter Bereich) in das Diagramm der Korngrößenklassen und Durchlässigkeiten der Lockergesteine nach *Krapp*, ergibt sich Bild 4. Das Tunnelausbruchmaterial kann daher als Grundwasserhemmer mit sehr geringer Durchlässigkeit eingestuft werden.

Bei kompaktem Einbau (nicht großflächig verteilt, sondern mit einem optimalen Dicke-Fläche-Verhältnis) durchsickern Niederschlagswasser entsprechend dicht eingebaute und undurchlässige Schichten kaum und infolgedessen bildet sich entsprechend wenig Sickerwasser.

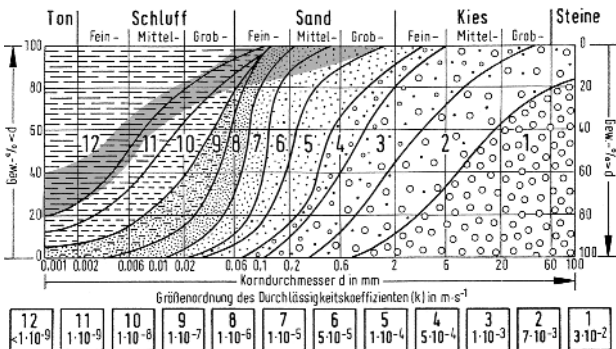


Bild 4. Korngrößenklassen und Durchlässigkeiten der Lockergesteine (Krapp 1979)

Hieraus wurden die organisatorischen und baulichen Randbedingungen für den schadlosen Einbau von pyrithaltigem Bodenmaterial für den Pyriterlass abgeleitet (Abschnitt 5.3).

5.2 Vergleichsbetrachtungen

Für eine Grundwasserbeeinträchtigung durch Eintrag eines Stoffs in das Grundwasser ist in erster Linie die Menge der gelösten Stoffe in dem in das Schutzgut Grundwasser übertretenden Wassers von Bedeutung. Die Fracht (Menge pro Zeiteinheit) setzt sich aus dem Produkt aus Wassermenge und Konzentration des Wasserinhaltsstoffs zusammen. Eine vergleichende Frachtenberechnung bezüglich des Sulfataustrags aus dem eingebauten Körper kann vereinfacht über die Grundwasserneubildungsrate bzw. das Darcy'sche Gesetz durchgeführt werden. Maßgebliche Faktoren sind dabei die Durchlässigkeit und die Sulfatkonzentration (Bild 5).

Geringe Konzentrationen bedeuten auch geringe Frachten. Hingegen bedeutet eine Durchlässigkeit von 10^{-5} m/s eine exponentiell höhere Sulfatfracht gegenüber einer Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s.

Legt man eine Verwertungsstelle mit zulässigen Sulfatkonzentrationen von 50 mg/l (Z0) zugrunde, ergibt sich für eine durchschnittliche Durchlässigkeit $k_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$ m/s und eine durchschnittliche Niederschlagsmenge die im Folgenden exemplarisch ermittelte zulässige Sulfatfracht.



Bild 5. Sulfatfracht in Abhängigkeit von Durchlässigkeit und Sulfatkonzentration

5.2.1 Sulfatfracht pyritfreies Z0-Material

Ab einem Durchlässigkeitsbeiwert von größer ca. $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s kann zumindest im Jahresmittel mehr Wasser versickern als Niederschlag fällt (Bild 6). Maßgeblich für die Betrachtung ist hier daher nicht die Durchlässigkeit, sondern die Niederschlagsmenge.

Unter der realistischen Annahme eines durchaus üblichen Durchlässigkeitsbeiwerts im eingebauten Zustand von $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s (z.B. ein Feinsand, schluffig, leicht mittelsandig) bei einem Zuordnungswert Z0 von 50 mg/l Sulfat im Eluat, würde innerhalb eines Quadratmeters dieses Materials bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 830 mm/a und einer Grundwasserneubildungsrate von 40 % ca. 330 l Sickerwasser mit einer Menge (Fracht) von ca. 16,5 g Sulfat pro Jahr versickern.

5.2.2 Sulfatfracht pyrithaltiges Material

Ab einem Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s wirkt das zu durchsickernde Material als Wasserstauer gegenüber dem Niederschlag und begrenzt damit die Sickerwasserbildung bzw. die Grundwasserneubildung, d.h. die Durchlässigkeit wird zum limitierenden Faktor.

Bei einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s, wie er in der VwV unter Ziffer 5.4.5 für einen selbstabdichtenden Boden angesetzt wurde, wären dies nach *Darcy*.

$$Q/a = k_f \cdot i \cdot F \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$Q/a = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3.600 \text{ s} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ d} = 0,15768 \text{ m}^3/a = 157,68 \text{ l/a Wasser}$$

mit

Q/a Sickerwassermenge pro Jahr [m^3 bzw. l],

k_f Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s],

i Hydraulischer Gradient [–], hier vereinfacht angenommen als 1,

F Fläche [m^2].

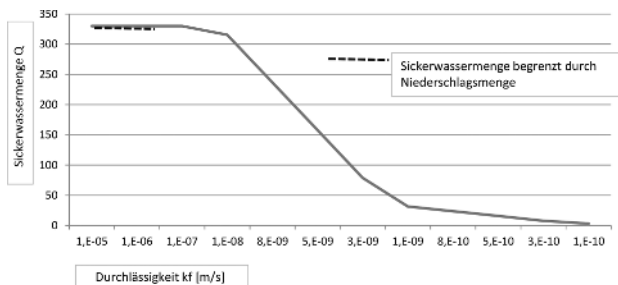


Bild 6. Abhängigkeit der Sickerwassermenge von der Durchlässigkeit

Damit ergeben sich die in der Tabelle 1 zusammengestellten Sulfatfrachten.

Die im ersten Beispiel mit $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s in das Grundwasser abgegebenen ca. 16,5 g Sulfat würden im zweiten Beispiel mit einem sehr

Tabelle 1. Sulfatfrachten bei verschiedenen Konzentrationen und Durchlässigkeiten

k_f	Q/a	Sulfatfracht in g/a bei Sulfatkonzentrationen (in mg/l) von ...						
		50 mg/l	100 mg/l	200 mg/l	300 mg/l	500 mg/l	1.000 mg/l	1.500 mg/l
[m/s]	[l/a]	[g/a]	[g/a]	[g/a]	[g/a]	[g/a]	[g/a]	[g/a]
1E-05	330	16,5						
5E-09	157,7	7,9	15,8	32	47	79	158	237
1E-09	31,5	1,6	3,2	6,3	9,5	15,8	32	47
5E-10	15,8	0,8	1,6	3,2	4,7	7,9	15,8	24
4E-10	11,0	0,6	1,1	2,2	3,3	5,5	11,0	16,6
1E-10	3,2	0,2	0,3	0,6	0,9	1,6	3,2	4,7

viel geringeren Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s aufgrund der geringen Menge an Sickerwasser eine Konzentration von ca. 1.500 mg/l erlauben (über das 90fache), um im Ergebnis die gleiche Menge (Fracht) an Sulfat in das Grundwasser abzugeben (Bild 7).

Die bisher an weit über 100 Eluatanalysen nach Pyritoxidation gemessenen Sulfatkonzentrationen liegen beim Boßlertunnel im Mittel bei ca. 150 mg/l. Die gemessenen Höchstwerte liegen im Bereich von ca. 300 mg/l. Für k_f -Werte bis $1 \cdot 10^{-9}$ m/s liegen die theoretisch zu erwartenden Frachten selbst bei Ausgangskonzentrationen von 500 mg/l noch unter der Referenzkonzentration von 16,5 mg/a. Diese Fracht ist rein hypothetisch und entsteht aus der Worst-Case-Annahme, dass nämlich das Material in einer sulfatlöslichen Form abgelagert wird. Aber es ist gerade Zweck und Folge der im Pyriterlass vorgeschlagenen Maßnahmen, dass das Pyrit in der unlöslichen Form, weil von Atmosphärien abgeschildert, verbleibt.

5.3 Einbaubedingungen nach Pyriterlass

Aufgrund der nachgewiesenen geringen Wasserdurchlässigkeit der pyrithaltigen Tone und Mergel aus dem Boßler- und Albvorlandtunnel und der daraus resultierenden geringen Sulfatfrachten kann pyrithaltiges Material aus den Tunnelbaumaßnahmen eingebaut werden, sofern es die Zuordnungswerte in der Deklarationsanalyse einhält und

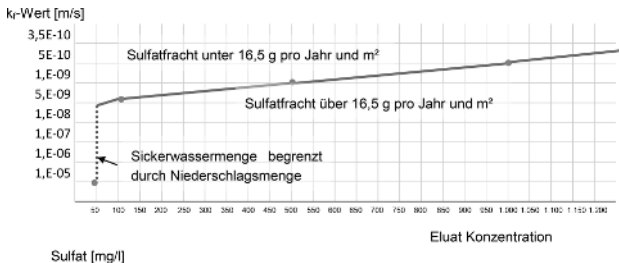


Bild 7. Sulfatfrachten in Abhängigkeit des k_f -Werts und der Ausgangskonzentration

die Tunnelherstellung bei der bisherigen maschinellen Vortriebstechnik bleibt. Das ausgebrochene Material ist dabei so abzulagern, dass die ursprünglichen natürlichen geologischen Verhältnisse, soweit wie technisch möglich, wiederhergestellt werden. Somit ist es erforderlich, beim Wiedereinbau des Materials ohne Zeitverzug vorzugehen und besondere Sorgfalt walten zu lassen.

Im Pyriterlass [2] wurden die folgenden Randbedingungen zum Einbau der pyrithaltigen Tunnelausbruchmaterialien festgelegt:

1. *„Zeitnahes Einbauen unmittelbar nach Anfall, d. h. ohne Zwischenlagerung. Die maximale Offenlagezeit im Bereich des Tunnelportals soll eine Woche nicht überschreiten; kann dieses nicht sichergestellt werden, ist eine neue Beprobung und eine Überprüfung der Einbaudichte (siehe 3) durchzuführen,*
2. *Kompaktes Einbauen der gesamten Kubatur, d. h. keine großflächige Ausbreitung und Einbau in Monobereichen,*
3. *Lagenweiser, verdichteter Einbau nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik, um einen k_f Wert $< 10^{-9}$ m/s sicherzustellen,*
4. *Ordnungsgemäßes und planvolles Ableiten von Niederschlagswasser durch erosionsstabile, arbeitstägliche Profilierung (mit ausreichendem Gefälle),*
5. *Vor größeren Betriebspausen oder nach Abschluss der Verfüllung Einbau einer pyritfreien bindigen Schicht mit gleicher oder größerer Dichtigkeit wie der Schüttkörper sowie einer Mindestdicke von 80 cm in zwei Lagen,*
6. *Einbeziehen vorhandener Grundwassermessstellen in ein Grundwassermonitoring.*

Des Weiteren können besondere hydrogeologische Verhältnisse wie die Lage in einem Wasserschutzgebiet Zone III oder Zone IIIA bzw. die Nähe zu Wasserfassungen über die Nummern 1 bis 6 hinausgehend ergänzende Maßnahmen bzw. Auflagen erfordern. Es bleibt somit den zuständigen Behörden unbenommen, weitere Auflagen zu erteilen oder die Verfüllung mit pyrithaltigem Material gänzlich zu versagen.“

5.4 Qualitätssicherung nach Pyriterlass

Die Betrachtung über die Sulfatfracht ist im Wesentlichen an die Wasserdurchlässigkeit des eingebauten Materials geknüpft. Zur Sicherstellung der geforderten Durchlässigkeit formuliert der Pyriterlass daher eine umfassende Qualitätssicherung durch eine Eigen- und eine Fremdüberwachung.

5.4.1 Fremdüberwachung und Charakterisierung des Tunnelausbruchmaterials an der Anfallstelle

Nach dem Pyriterlass ist die unabhängige mit den Behörden abgestimmte und akkreditierte Fremdüberwachung verantwortlich für die geochemische und -technische Charakterisierung des Tunnelausbruchmaterials. Die Betreiber der Verfüllungen haben diese Charakterisierung ihrer Betriebsweise zugrunde zu legen. Davon ausgehend, dass kontinuierlich sieben Tage/Woche Ausbruchmaterial entsteht, umfasst die Charakterisierung des ausgebrochenen Materials Folgendes:

Zu Betriebsbeginn und bei signifikantem Materialwechsel umfasst die Fremdüberwachung gemäß den einschlägigen DIN-Vorschriften

- eine Materialidentifikation und Bewertung der Stückigkeit, der Homogenität und der technischen Verdichtungsfähigkeit zum Erreichen des geforderten Einbauparameters Wasserdurchlässigkeit mit einem k_f -Wert $\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s,
- die Ermittlung der Kornverteilung,
- die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit,

jeweils in einem Umfang, dass eine mit der Proctordichte/Einbaudichte korrelierende Wasserdurchlässigkeit mit einem k_f -Wert $\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s festgestellt werden kann.

Im laufenden Betrieb umfasst die Fremdüberwachung

- Feststellung der Kornverteilung: arbeitstäglich,
- Feststellung der Proctordichte: an jedem zweiten Betriebstag,
- Feststellung der damit korrelierenden Wasserdurchlässigkeit: an jedem zehnten Betriebstag,
- Untersuchung des Eluats (1 : 10) auf Sulfat: an jedem zweiten Betriebstag.

5.4.2 Unabhängige Eigen- und Fremdüberwachung der Verfüllung an der Verwertungsstelle

Der Pyriterlass regelt über die ggf. festgelegte behördliche Überwachung der jeweiligen Verwertungsstellen hinaus, dass eine unabhängige Eigenüberwachung des Betreibers die Einhaltung der genannten Randbedingungen sowie ggf. weiterer von der zuständigen Behörde im Einzelfall erlassener Auflagen zu überwachen hat.

Die unabhängige Eigenüberwachung hat alle 5.000 t Einbaumenge, mindestens aber wöchentlich, die erzielte Einbaudichte zu prüfen. Werden die vorausgesetzten Einbaudichten nicht erreicht, ist dies umgehend der zuständigen Behörde und der Fremdüberwachung zu melden.

Die Fremdüberwachung hat unangekündigte Überprüfungen der Verfüllungen vorzunehmen. Dies sollte mindestens einmal in zwei Wochen oder mindestens alle 10.000 t Einlagerungsmenge geschehen. Dabei hat sie die Qualität der unabhängigen Eigenüberwachung und die Einhaltung der genannten Randbedingungen sowie ggf. weiterer von der zuständigen Behörde im Einzelfall erlassener Auflagen zu bewerten.

5.4.3 Dokumentation nach Pyriterlass

In Absprache mit der zuständigen Behörde ist die Fremdüberwachung und die unabhängige Eigenüberwachung zu dokumentieren und dieser vorzulegen. Hierfür wurden inzwischen Musterdokumentationen erarbeitet.

6 Verwertung in Verwertungsstellen nach Pyriterlass

Im Projektabschnitt des Albvorlandtunnels PFA 2.1 wurde der überwiegende Teil des Tunnelausbruchs bisher über den Pyriterlass verwertet. Dabei wurden in Abstimmung mit den jeweiligen Behörden drei externe Verwertungsstellen in umliegenden Steinbrüchen nach Pyriterlass genehmigt. Bis Ende 2018 und innerhalb von elf Monaten wurden ca. 1,4 Mio. t qualitätsgesichert in diesen drei Verwertungsstellen eingebaut (Bild 8).



Bild 8. Ansicht auf die Einbaufäche im Steinbruch Rösch im März 2018

Durch die Fremdüberwachung wurden fortlaufend Proben des Ausbruchmaterials am Abwurfplatz entnommen. Über Kornverteilungen, Proctorkurven und k_f -Versuche wurde das Ausbruchmaterial fortlaufend geotechnisch charakterisiert. Auf der Grundlage dieser Versuche wurde eine Materialidentifikation mit den zu erreichenden Einbaudichten und Wassergehalten erstellt und bei Veränderungen angepasst. Die Einhaltung der Vorgaben dieser Materialidentifikation erfolgte dabei sowohl durch die Eigen- als auch die Fremdüberwachung (Bild 9). Dabei zeigte sich, dass mit kleineren Anpassungen, z. B. des Wassergehalts oder der Einbaubedingungen im Winter, die Vorgaben gut eingehalten werden konnten. Die Bestimmungen der Fremdüberwachung zum k_f -Wert an vor Ort entnommenen Stechzylindern ergab fast durchgängig k_f -Werte von $\gg 10^{-9}$ m/s. Auch alle weiteren Vorgaben des Pyriterlasses konnten in den genehmigten Verwertungsstellen gut umgesetzt werden.



Bild 9. Entnahme einer Stechzylinderprobe am Rand des Monokörpers zur Prüfung der Fläche auf ausreichende Verdichtung (6. Februar 2018)

7 Verwertung direkt im Projektgebiet nach Pyriterlass

Es wurden ebenfalls lokale Lösungen zur Reduktion der Transportwege und Verringerung der Projektkosten angestrebt. Diese waren einerseits die Wiederverfüllung des Zugangstunnels Umpfental des Boßlertunnels und andererseits die Befüllung der zum PFA 2.2 zugehörigen Seitenablagerung F8 im Bereich Portal Hohenstadt des Steinbühl tunnels und zweier weiterer Seitenablagerungen im Bereich des PFA 2.1.

Der Zugangstunnel Umpfental wurde als Zwischenangriff für die Herstellung des Boßlertunnels errichtet, und im Zuge der Planfeststellung war eine Wiederverfüllung verpflichtend vorgegeben. Somit war hier ein Potenzial von 160.000 t zum Einbau von pyrithaltigem Material vorhanden. Während der Abstimmungen mit der Behörde wurden auf Basis des Pyriterlasses die Einbaubedingungen definiert und das Material aus dem Vortrieb der TVM wieder eingebaut (Bilder 10 und 11).

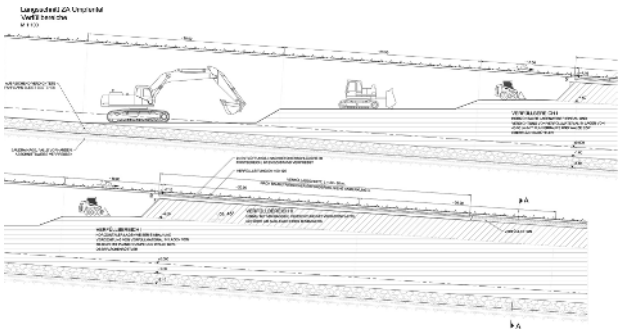


Bild 10. Längsschnitt der Verfüllung Zwischenangriff Umpfental



Bild 11 Einbau von pyrithaltigem Material im Zugangstunnel Umpfental

Eine weitere im Projektgebiet umgesetzte Verwertung war die Nutzung einer bestehenden Seitenablagerung im Bereich des Steinbühl-tunnels durch den Einbau von 300.000 t pyrithaltigem Material. Hierbei wurde das Material nach den vorgeschriebenen Randbedingungen des Pyriterlasses verdichtet eingebaut. Unterhalb des pyrithaltigen Materials wurde ein Flächenfilter mit Filterkies, Geotextil und einer bindigen Schutzschicht eingebaut und darüber hinaus mit pyritfreiem Material (80 cm) mit gleicher oder größerer Dichtigkeit abgedeckt (Bild 12). Die Verwertungen in den Seitenablagerungen im PFA 2.1 sind für Mitte 2019 gemäß Bild 13 geplant.

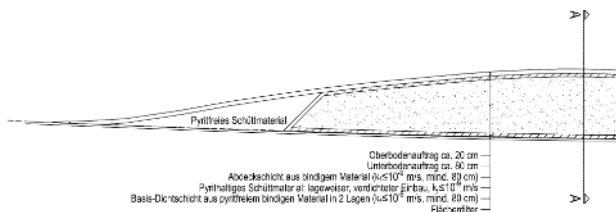


Bild 12. Schichtenaufbau in der Seitenablagerung F8

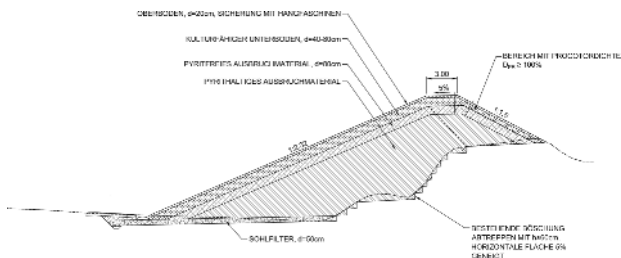


Bild 13. Schichtenaufbau in der Seitenablagerung des Albvorlandtunnels

8 Verwertung in der keramischen Industrie

Die Ton- und Mergelgesteine der TVM-Tunnel sind aufgrund ihrer Eigenschaften bestens geeignet, um in der Ziegelindustrie verwendet zu werden.

Wesentlich für das Potenzial zur Nutzung des Materials in der Ziegelindustrie war die gute und gleichbleibende Qualität des Materials und die konstante Belieferung der Ziegelwerke, um für einen langen Zeitraum identische Rezepturen gewährleisten zu können.

Die Einbaurahmenbedingungen des Pyritlasses mussten bei den Genehmigungen der Verwertungsstellen für die keramische Verwertung ebenfalls berücksichtigt werden. Das bedeutet, pro Tag mussten

10.000 bis 12.000 t Material aus dem Vortrieb abtransportiert werden und anschließend entsprechend den Lieferungsbedingungen des Erlasses, z. B. Einbau in Monobereiche, Verdichtung und Profilierung, zwischengelagert werden.

Die keramische Verwertung war insbesondere durch den Einsatz der TVM in beiden Abschnitten möglich, da keine Verunreinigungen des Materials durch Sprengschnüre oder Spritzbeton erfolgten. Insgesamt wurden ca. 70 % des Materials vom Boßlertunnel und ca. 25 % des Materials des Albvorlandtunnels der keramischen Verwertung zugeführt und werden über die nächsten Jahre zu Mauerziegeln verarbeitet.

9 Vor dem Pyriterlass verwertetes pyrihaltiges Tunnelausbruchmaterial

Für alle Standorte, die pyrihaltiges Tunnelausbruchmaterial des Boßlertunnels vor den Erkenntnissen über die Veränderlichkeit nach dem Ausbruch, verwerteten, wurde in Abstimmung mit den Behörden eine Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Grundwasser erstellt. Für das bereits eingelagerte Material konnte über eine Frachtenberechnung nachgewiesen werden, dass der Sulfataustrag bei einem verdichteten Einbau des Materials vom Boßlertunnel auch bei höheren Sulfatkonzentrationen im Eluat als 50 mg/l in Summe nicht größer ist als bei einem Material mit einer Sulfatkonzentration < 50 mg/l.

Diese Frachtenberechnung hat es ermöglicht, über gutachterlichen Nachweis alles eingelagerte Material in den Verwertungsstellen zu belassen und zukünftig für eine rechtssichere Verwertung des Materials zu sorgen. Es wurde aufgrund des veränderlichen Sulfatgehalts kein Material aus Verwertungsstellen ausgebaut. Eine unerwünschte Beeinträchtigung des Schutzguts Grundwasser wurde nicht festgestellt (Bild 14).

10 Zusammenfassung

Die neuen Verwertungslösungen nach Pyriterlass im Projektgebiet bzw. in der keramischen Industrie konnten durch die kooperative Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten (Auftragnehmer, Verwer-



Bild 14. Beprobung des bereits eingebauten Tunnelausbruchs

tungsunternehmen, Behörden und Auftraggeber) ohne wesentliche vortriebsbehindernden Einflüsse entwickelt werden. Mit dem Pyriterlass wurde durch das Umweltministerium Baden-Württemberg aufbauend auf den bestehenden Regelungen der VwV Boden eine in der Praxis gut umsetzbare und für das Schutzgut Grundwasser sichere Herangehensweise entwickelt. Basis hierfür stellt die Frachtenberechnung dar, die eine deutlich bessere Möglichkeit zur Beurteilung der Auswirkung auf das Grundwasser darstellt als eine reine Betrachtung der Grenzwerte nach VwV Boden.

Die Herangehensweise über eine Frachtenbetrachtung wurde inzwischen auch für weitere geogene Parameter und die Bewertung der Auswirkungen zugesetzter, bautechnisch notwendiger Hilfsstoffe und Additive angewendet. Am Albvorlandtunnel wurde z. B. ein Weg zur Bewertung der Abfalleigenschaften bzw. des Gefährdungspotenzials für das Grundwasser für die teilweise bautechnisch notwendigen Tenside erarbeitet.

Aufgrund der über den Einbau nach Pyriterlass sichergestellten geringen Durchlässigkeiten von 10^{-9} m/s des verwerteten Tunnelausbruchmaterials des Albvorlandtunnels und der daraus resultierenden geringen Tensidfrachten, konnte unbeachtet der nachweislich stattfindenden Abbauprozesse der Tenside oder den vorhandenen Unschärfen in der Ermittlung des Summenparameters Methylenblau-Index (MBAS) festgehalten werden, dass bis zu einem MBAS-Wert von 2,1 mg/l, die MBAS-Fracht, der Fracht eines Bodens mit 0,2 mg/l und

einer durchschnittlichen Durchlässigkeit von 10^{-5} m/s entspricht. Somit war das angesetzte Kriterium der Trinkwasserverordnung bis zu einem Eingangs-MBAS von 2,1 mg/l eingehalten.

Das Beispiel des Pyriterlasses und der anderen dargestellten Verwertungswege zeigt hier, dass in guter Zusammenarbeit mit den beteiligten Behörden auch für unvorhergesehene Probleme in kurzer Zeit eine fachlich sehr fundierte und praktikable Lösung gefunden werden kann.

Literatur

- [1] www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de
- [2] Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial; http://gaa.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16033/4_2_8.pdf [Zugriff 4.6.2019].
- [3] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2017) *Verwertung von pyrihaltigem Bodenaushubmassen in Verfüllungen und Abgrabungen – Pyriterlass*. 7. April 2017.
- [4] ICP Karlsruhe (2017) *Gutachterliche Stellungnahme über Randbedingungen und Auswirkungen der Verwertung von pyrihaltigem Material aus dem Tunnelbau der Neubaustrecke Stuttgart–Ulm*. 22. März 2017.