

Zusammenstellung messtechnischer Ergebnisse zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich der Auflockerungszone im Ton und Tonstein

Kurzbericht

Stand: 03.07.2014

M. Jobmann

1 Einleitung

Im Rahmen dieses Kurzberichtes werden messtechnische Ergebnisse zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich der Auflockerungszone in der Umgebung von untertägigen Hohlräumen aus den Untertagelaboratorien in Bure (Frankreich), Tournemire (Frankreich), Mont Terri (Schweiz) und Hades (Belgien) zusammengestellt. Die betrifft in erster Linie die Permeabilität in ihrer Abhängigkeit von der Entfernung zur Hohlraumkontur.

2 Bure URL (Callovo-Oxfordian Tonstein)

Im Untertagelabor in Bure, Frankreich wurden Untersuchungen zur hydraulischen Charakterisierung der Auflockerungszone sowohl im Bereich der Schachtkontur als auch im Bereich zweier Streckenkonturen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden kurz beschrieben.

2.1 ALZ - Schachtkontur

Eines der ersten großen in-situ Experimente im Bure URL war das REP-Experiment. Dabei handelte es sich um ein Mine-by Experiment im Zusammenhang mit der Schachtabteufung. Der Schacht wurde zunächst bis in eine Tiefe von ca. 450 m abgeteuft. In dieser Teufe wurde dann eine Nische aufgefahren aus der heraus dann vertikale und leicht geneigte Bohrungen in Richtung der geplanten weiteren Schachtabteufung erstellt und mit Messsensoren bestückt wurden (Abbildung 1(a)).

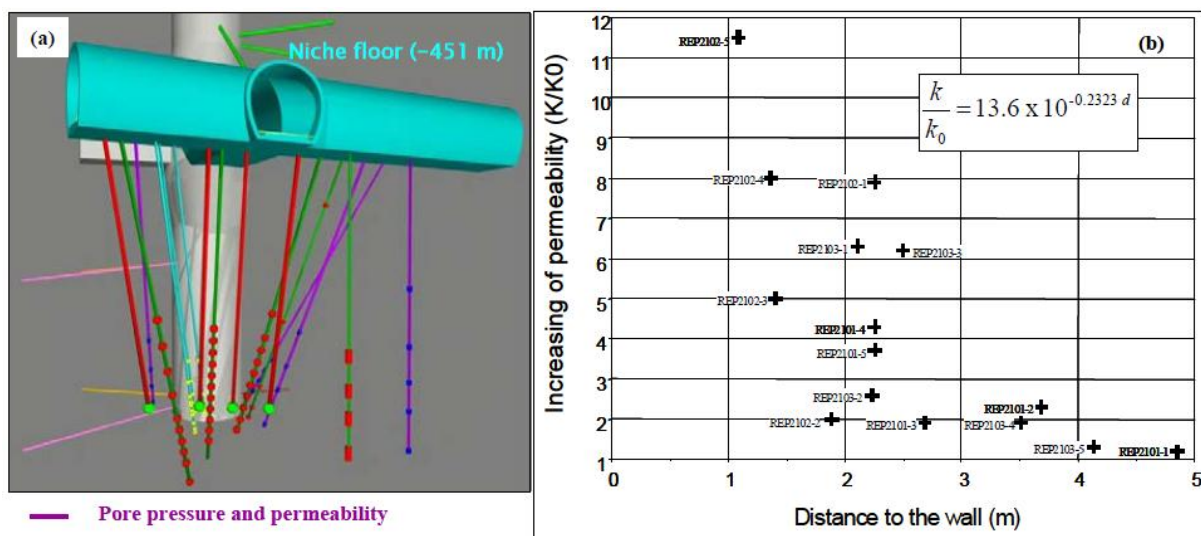


Abb. 1: Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schachtkontur (Souley et al. 2007).

In vier der Untersuchungsbohrungen wurde vor dem weiteren Abteufen des Schachtes Permeabilitätsmessungen durchgeführt. Diese ergaben Werte im Bereich von $4 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ bis $7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ für den ungestörten Tonstein (Souley et al. 2007). In Abbildung 1(b) zeigen die Messwerte, die nach Abteufen des Schachtes gemessen wurden in normierter Form bezogen auf den Ausgangswert. Die Werte geben also die Veränderung der Permeabilitäten an. Aus technischen Gründen konnten die Bohrungen bzw. die Sensoren nicht dichter als etwa 1,1 m an die Schachtkontur platziert werden. Es zeigte sich, dass die Veränderung der Permeabilität weiter in das Gebirge hineinragt als ursprünglich gedacht bzw. für die Ausdehnung der ALZ angenommen. Auf Basis der Messungen wurde das folgende Konzeptuelle Modell entwickelt (Abbildung 2). Demnach werden zwei Zonen mit unterschiedlichen hydraulischen Charakteristika unterschieden:

- Domain 1: Signifikante Erhöhung der Permeabilität durch auffahrungsbedingte Schädigung.
- Domain 2: Hydraulisch gestörte Zone mit leichter Erhöhung der Permeabilität, die aber mit Blick auf die Messgenauigkeit nicht signifikant ist.

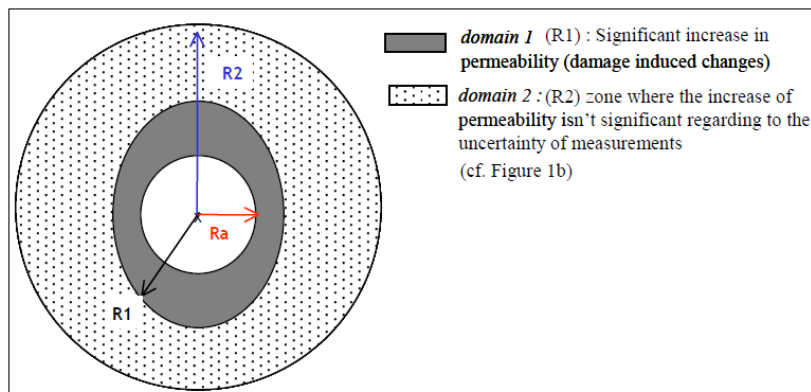


Abb. 2: Konzeptuelles Modell für den hydraulisch gestörten Bereich um die Schachtkontur (Souley et al. 2007).

Für die Beschreibung der Permeabilitätsentwicklung in der Nähe der Schachtkontur wurde folgender Formalismus erstellt (Souley et al. 2007).

$$\log\left(\frac{k_{end}}{k_o}\right) = \alpha \frac{\gamma}{\gamma^{rup}} = \alpha \gamma^* \quad \text{IF } \gamma \leq \gamma^{rup} \quad \text{and} \quad \log\left(\frac{k_{end}}{k_o}\right) = \alpha \quad \text{ELSE}$$

Wobei α eine Konstant ist, die das Verhältnis charakterisiert zwischen geklüfteten und intaktem Tonstein. In der ungeschädigten Zone ($\gamma^*=0$) ist $k_{end} = k_o$. Um eine für beide Domänen gemeinsam gültige Beziehung zu erhalten, wurde folgende Beziehung aufgestellt:

$$k/k_{end} = 13,26 \cdot 10^{-0,2323 \cdot d} \quad (\text{für } d \leq 4,85 \text{ m}) \quad \text{und} \quad k/k_{end} = 1 \quad (\text{für } d > 4,85)$$

wobei d = Distanz zur Schachtkontur.

2.2 ALZ - Streckenkantur

In mehreren Bohrungen im Bereich der SUG-Strecke im Bure URL wurden von BGR Permeabilitätsmessungen in verschiedenen Abständen von der Streckenkantur durchgeführt. Anhand dieser Messungen konnte die Ausdehnung der hydraulisch gestörten Zone (ALZ) bestimmt werden und auch die Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkantur. Die Messergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt (Quelle: BGR). Die Messungen wurden sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung durchgeführt. Die Ergebnisse

unterscheiden sich nicht signifikant. Die Größe der Auflockerungszone wird in diesem Bereich mit kleiner 1 m angegeben.

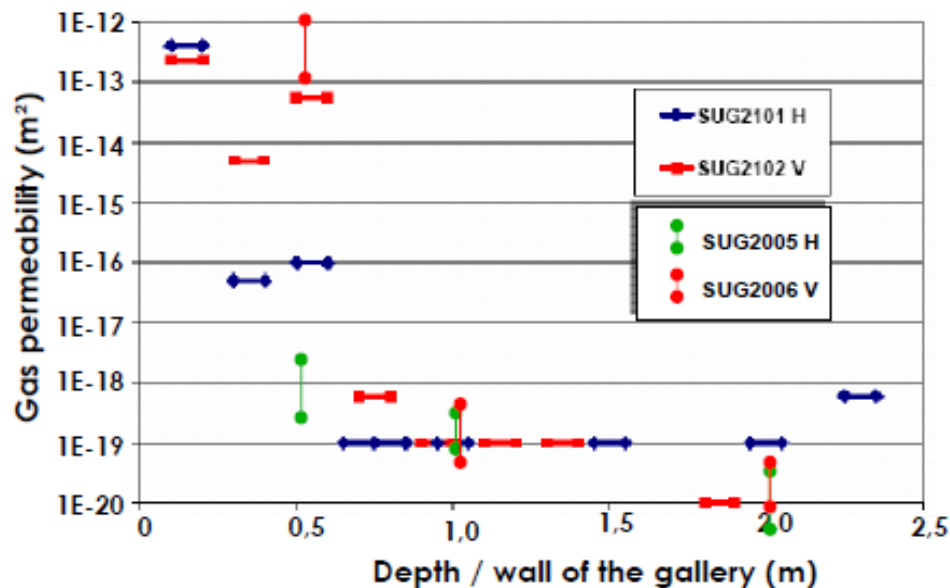


Abb. 3: Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Quelle: BGR)

Diese Werte werden bestätigt durch Angaben in Baechler et al (2010). Darin werden Messungen zu verschiedenen Zeiten in der Bohrung SUG 1106 dargestellt (Abbildung 4). Diese Messungen deuten an, dass die ALZ eine Ausdehnung von etwa 1 m hat. Die Größenordnungen der Permeabilitäten stimmen mit denen aus Abbildung 3 überein.

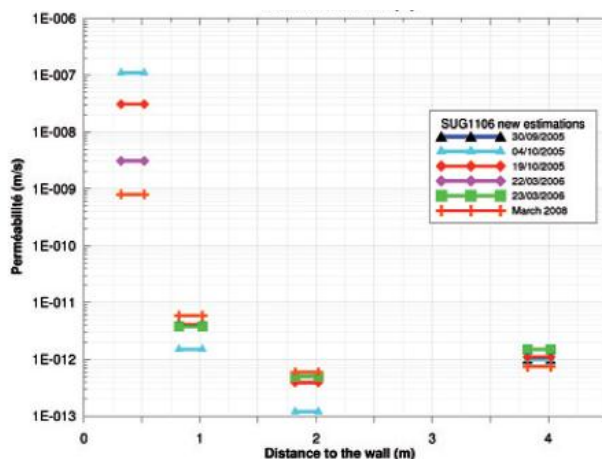


Abb. 4: Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur in der Bohrung SUG 1106 (Baechler et al. 2010).

Vergleichbare Messungen wurden im Bereich des Key-Experimentes im Bure URL durchgeführt. Auch dort wurde die Permeabilität in der ALZ in verschiedenen Entfernungen zur Streckenkontur gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt (Shao et al. 2008). Bei diesen Messungen ist die Permeabilität auch noch in einer Entfernung von 2,5 m deutlich erhöht gegenüber der ungestörten Permeabilität des Opalinustons. Dies macht deutlich, dass die Ausdehnung der hydraulisch gestörten Zone lokal sehr unterschiedlich sein kann.

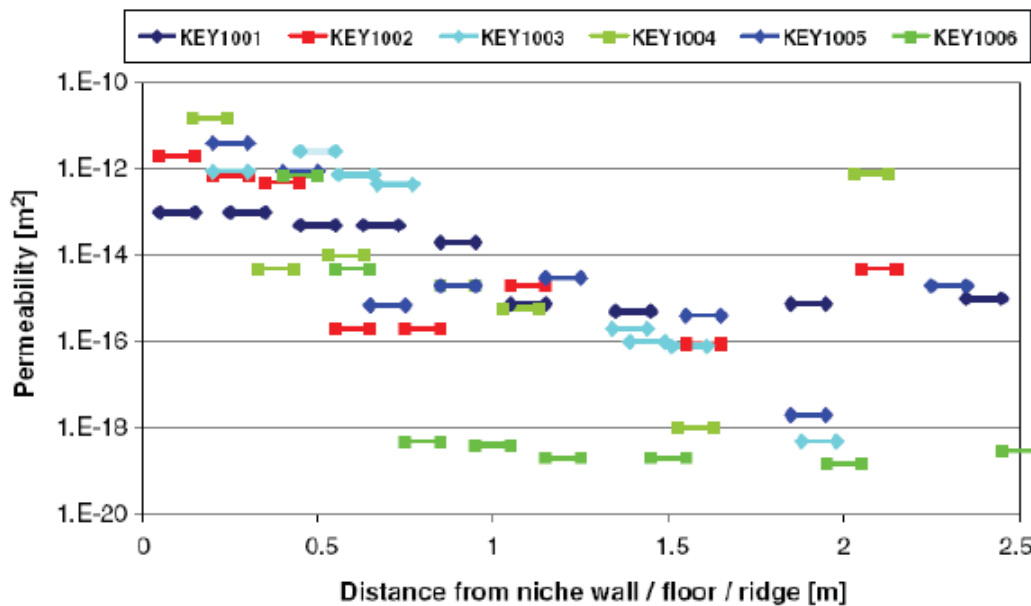


Abb. 5: Permeabilität der Auflockerungszone im Bereich des Key-Experimentes (Shao et al. 2008).

3 Mont Terri URL (Opalinuston)

In Tabelle 1 sind zunächst Standardwerte für hydraulische Parameter des Opalinuston im Mont Terri URL aufgelistet (Quelle: BGR).

Tab. 1: Standardwerte für hydraulische Parameter
Quelle: BGR)

Parameter	Value \perp	Value \parallel	Unit
Permeability	2×10^{-19}	10^{-18}	m^2
Permeability (EDZ)	10^{-17}	10^{-17}	m^2
Porosity	0.16	0.16	-
Porosity (EDZ)	0.3	0.3	-
E-Modulus	8	15	GPa
Poisson's ratio	0.27	0.27	-
Swelling coeff.	0.02	0.02	-
Tunnel humidity	100->	40	%

Im Untertagelabor in Mont Terri wurden u. a. von der BGR Messungen zur hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone durchgeführt. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden beiden Abbildung dargestellt (Quelle: BGR). In Abbildung 6 sind sowohl die Permeabilität als auch die Klufthäufigkeit in Abhängigkeit von der Streckenkontur in den Bohrungen BHG-B1 und BHG-B2 dargestellt. Es ist eine deutliche Korrelation der Permeabilitätsveränderung mit der Klufthäufigkeit erkennbar. Die Ausdehnung der ALZ ist in diesem Gesteinsbereich mit etwa 1,5 m anzusetzen.

In Abbildung 7 sind Messergebnisse aus zwei weiteren Bohrungen aufgetragen, die senkrecht in die Sohle und in die Firste gebohrt wurden. Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Entfernung zur Streckenkontur ist unterschiedlich. Während bei der Sohlbohrung von

einer Ausdehnung der ALZ von etwa 0,60 m ausgegangen werden kann, ist die Ausdehnung der ALZ in der Firste mit etwa 1,80 m also mit etwa dem dreifachen Wert anzusetzen.

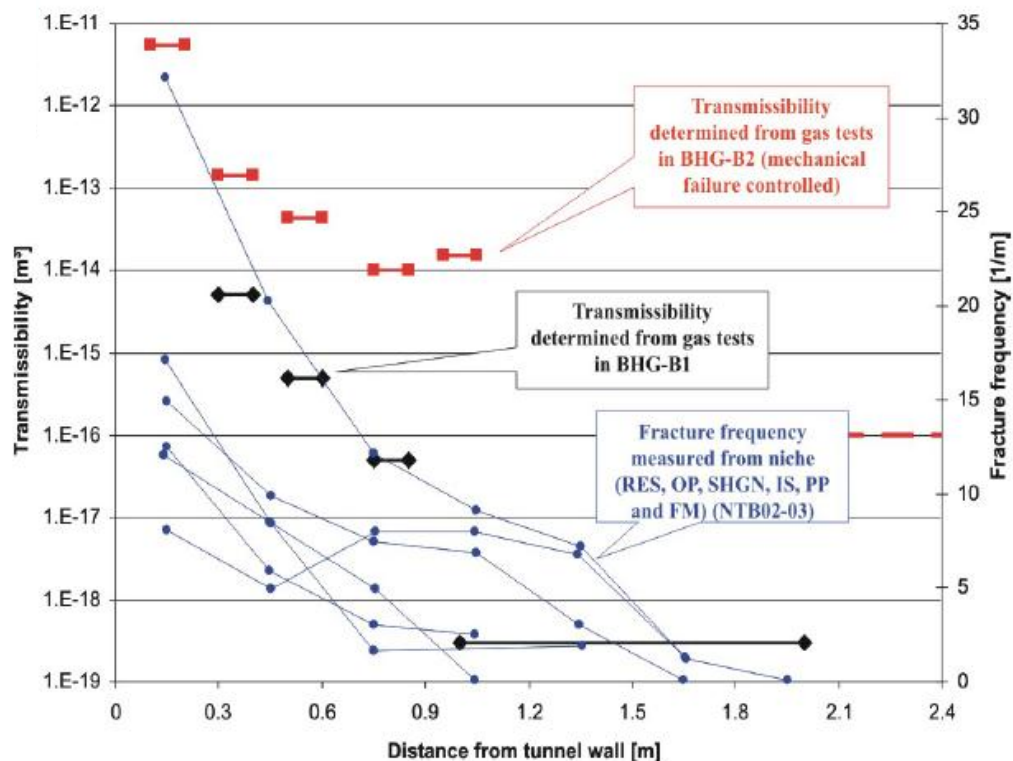


Abb. 6: Permeabilität und Klufthäufigkeit in Abhängigkeit von der Streckenkotur gemessen in den Bohrungen BHG-B1 und BHG-B2 (Quelle: BGR)

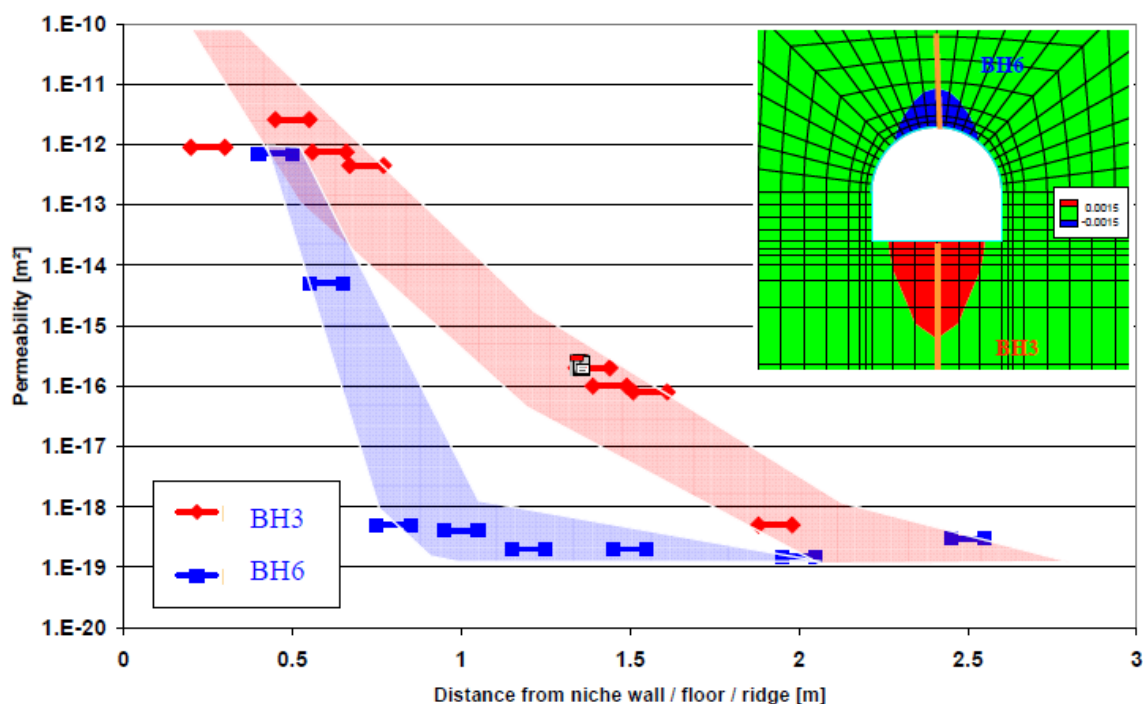


Abb. 7: Permeabilität in Abhängigkeit von der Streckenkotur gemessen in den Bohrungen BH3 - senkrecht nach unten in die Sohle - und BH6 - senkrecht nach oben in die Firste - (Quelle: BGR)

Aus weiteren Langzeitmessungen ist bekannt (Shao et al. 2008), dass

- die Permeabilität sich im Laufe von zwei Jahren um etwa eine Größenordnung verringert hat und
- die Permeabilität sich um zwei Größenordnungen verringert hat aufgrund von Feuchtigkeit und damit einsetzenden Quellvorgängen

In Bossart et al. (2004) sind weitere Ergebnisse zur Abhängigkeit der Permeabilität von der Entfernung zur Streckenkontur dokumentiert. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse, bezogen auf unterschiedliche Richtungen ausgehend von der Streckenkontur. Die Werte liegen zwischen $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ Im Entfernungsbereich von 0 bis 1 m.

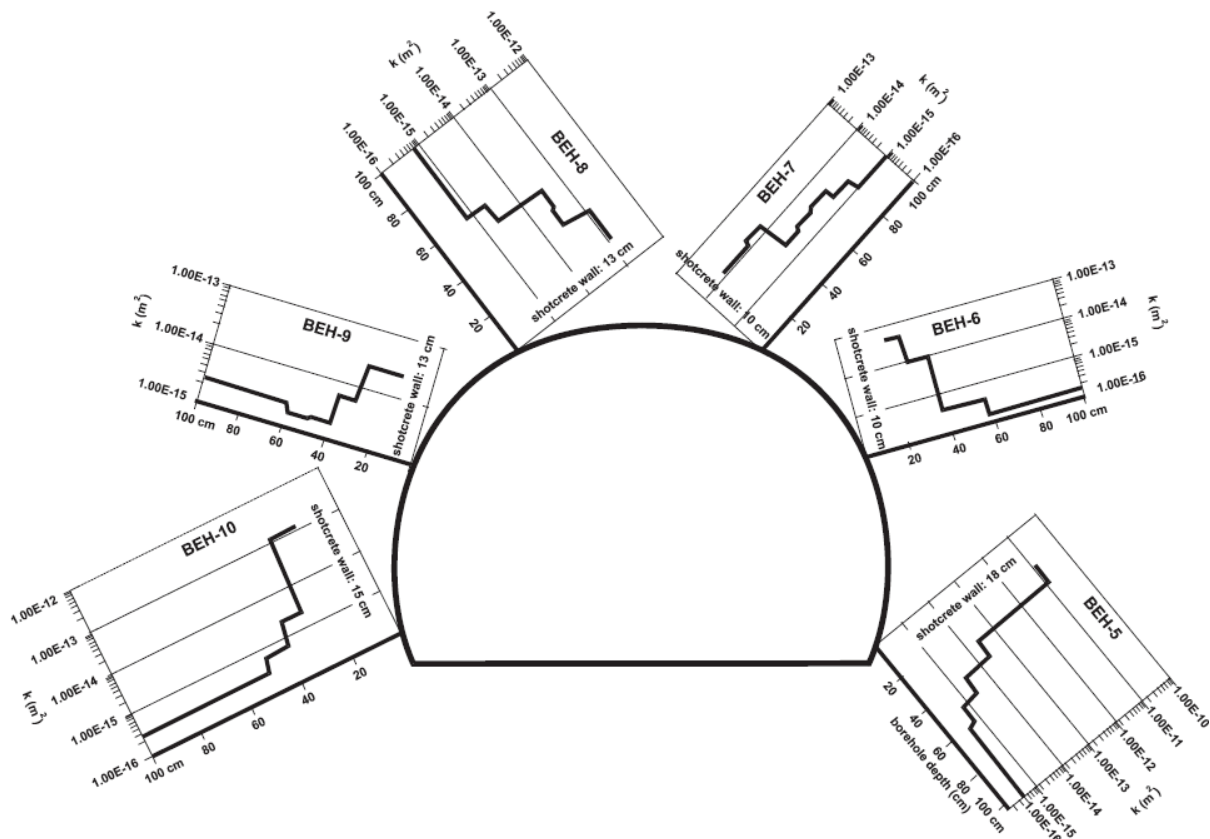


Abb. 8: Permeabilitätsverteilung im Nahfeld einer Streckenkontur im Mont Terri URL (Bossart et al. 2004).

Die von BGR festgestellte zeitliche Verringerung der Durchlässigkeit der ALZ wird von Mayor et al. (2005) bestätigt. In Abbildung 9 sind Ergebnisse von Durchlässigkeitsmessungen innerhalb der Auflockerungszone, die zu verschiedenen Zeiten durchgeführt wurden, dargestellt. Es wird sehr deutlich, dass die zeitliche Verringerung der Permeabilität sich über mehrere Größenordnungen erstreckt.

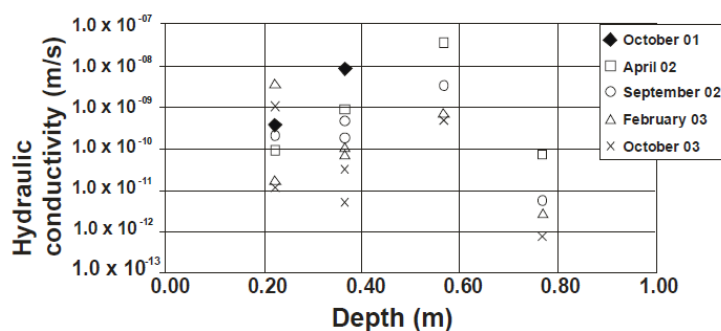


Abb. 9: Hydraulische Leitfähigkeit in der ALZ im Bereich der EB-Strecke im Mont Terri URL (Mayor et al. 2005).

4 Tournemire URL (Toarcian Tonstein und Mergel)

In Tabelle 2 sind gemittelte hydraulischen Kennwerte aus verschiedenen Bohrungen von verschiedenen Stellen überblickhaft zusammengefasst. Die Abbildungen 10-13 zeigen eine Zusammenstellung verschiedener Messungen bezüglich Permeabilität und Sättigung in Abhängigkeit von der Streckenkontur die in Bohrungen innerhalb des Tournemire Tunnels durchgeführt wurden (Matray et al. 2007). Es lässt sich deutlich die jeweilige Ausdehnung der ALZ anhand der Permeabilitätsmessungen erkennen. Es fällt auf, dass sie von Ort zu Ort unterschiedlich ausgeprägt ist. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die untersuchten Auffahrungsbereiche deutlich unterschiedliche Standzeiten hatten, sodass unterschiedliche Zeitspannen für eine Schließung der ALZ vorherrschten. Zum anderen war auch zu beobachten, dass lokale Klüftungen, auch weiter in das Gebirge hineinragend, deutlich die lokale Permeabilität bestimmen.

Tab. 2: Gemittelte Werte für Wassergehalt, Porosität, volumetrische Feuchte und Sättigungsgrad innerhalb und außerhalb der ALZ (Matray et al. 2007).
105 °C

Borehole	EDZ	WC_{dry} , %	n_{tot} , %	θ , %	S , %
MD2	In	3.073 ± 0.003	7.79 ± 0.18	7.612 ± 0.38	97.7 ± 2.7
MD2	Out	4.085 ± 0.003	9.92 ± 0.18	9.93 ± 0.37	100.1 ± 1.8
MD2*	In	3.173 ± 0.003	8.12 ± 0.18	7.85 ± 0.38	96.3 ± 3.7
MD2*	Out	4.183 ± 0.003	10.22 ± 0.28	10.17 ± 0.66	99.6 ± 2.6
MD3	In	3.284 ± 0.007	8.53 ± 0.27	8.14 ± 0.64	95.1 ± 2.1
MD3	Out	3.562 ± 0.005	8.87 ± 0.18	8.77 ± 0.65	98.9 ± 2.5
MD4	In	3.891 ± 0.021	9.95 ± 0.28	9.51 ± 0.64	95.2 ± 2.7
MD4	Out	4.150 ± 0.005	10.07 ± 0.27	10.06 ± 0.63	100.1 ± 2.7
MD5	In	3.180 ± 0.004	8.31 ± 0.18	7.91 ± 0.38	94.9 ± 2.1
MD5	Out	3.456 ± 0.004	8.67 ± 0.18	8.53 ± 0.37	98.6 ± 2.1
MD6	In	3.670 ± 0.003	9.29 ± 0.27	9.04 ± 0.64	96.9 ± 2.8
MD6	Out	3.704 ± 0.003	9.38 ± 0.27	9.11 ± 0.65	97.0 ± 2.8
MD7	In	3.910 ± 0.003	9.60 ± 0.27	9.57 ± 0.64	99.7 ± 2.8
MD7	Out	3.783 ± 0.004	9.26 ± 0.27	9.29 ± 0.64	100.3 ± 2.9

*Data obtained at 150 °C.

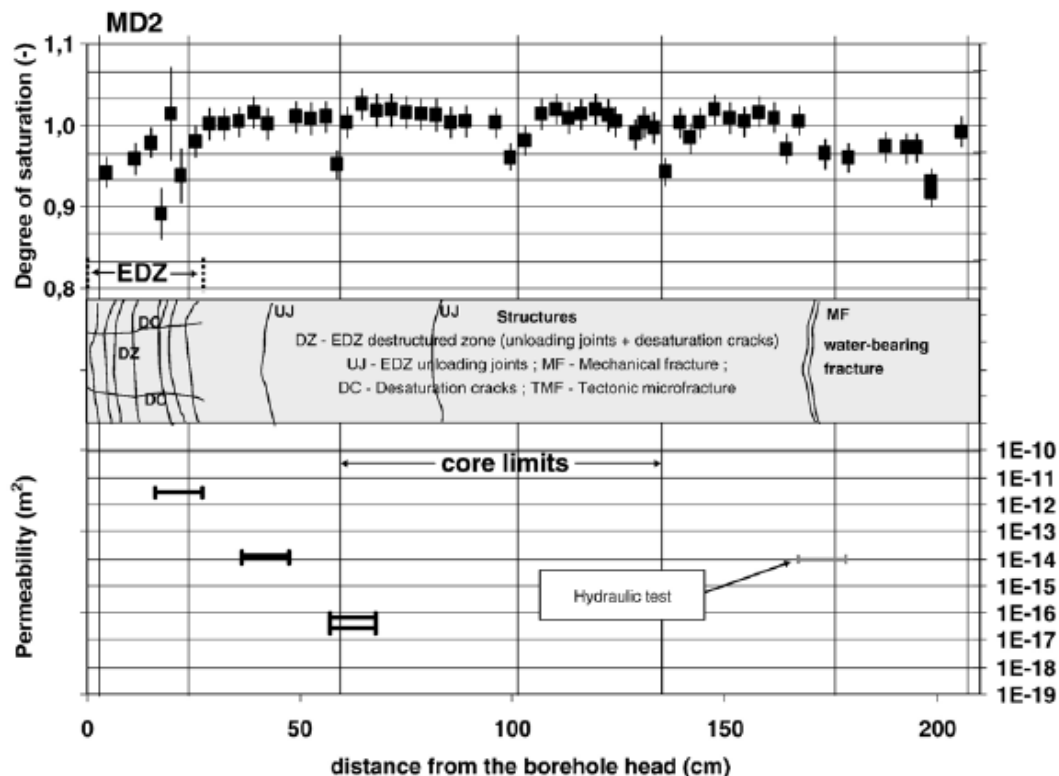


Abb. 10: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

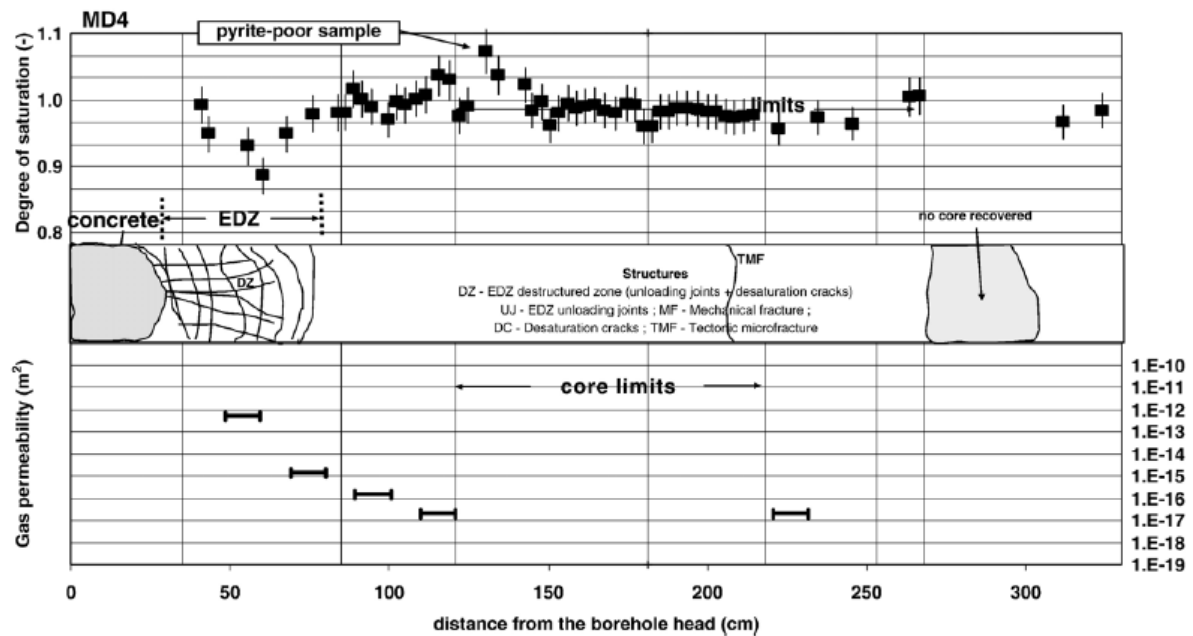


Abb. 11: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

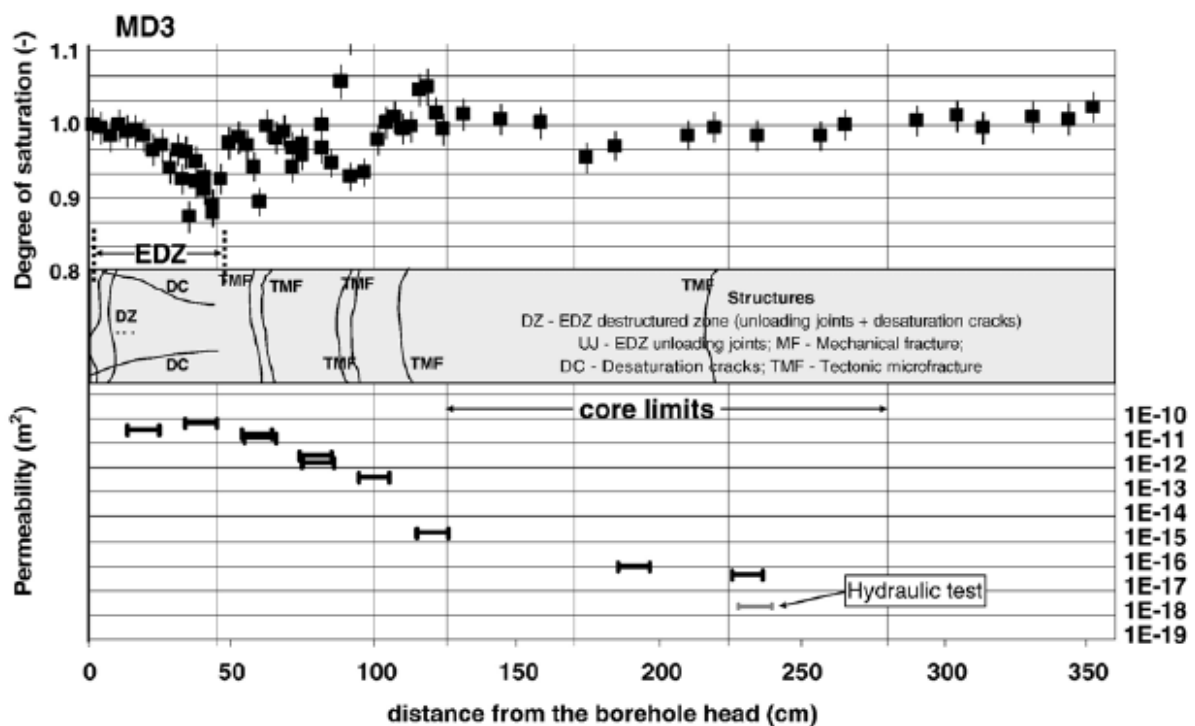


Abb. 12: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

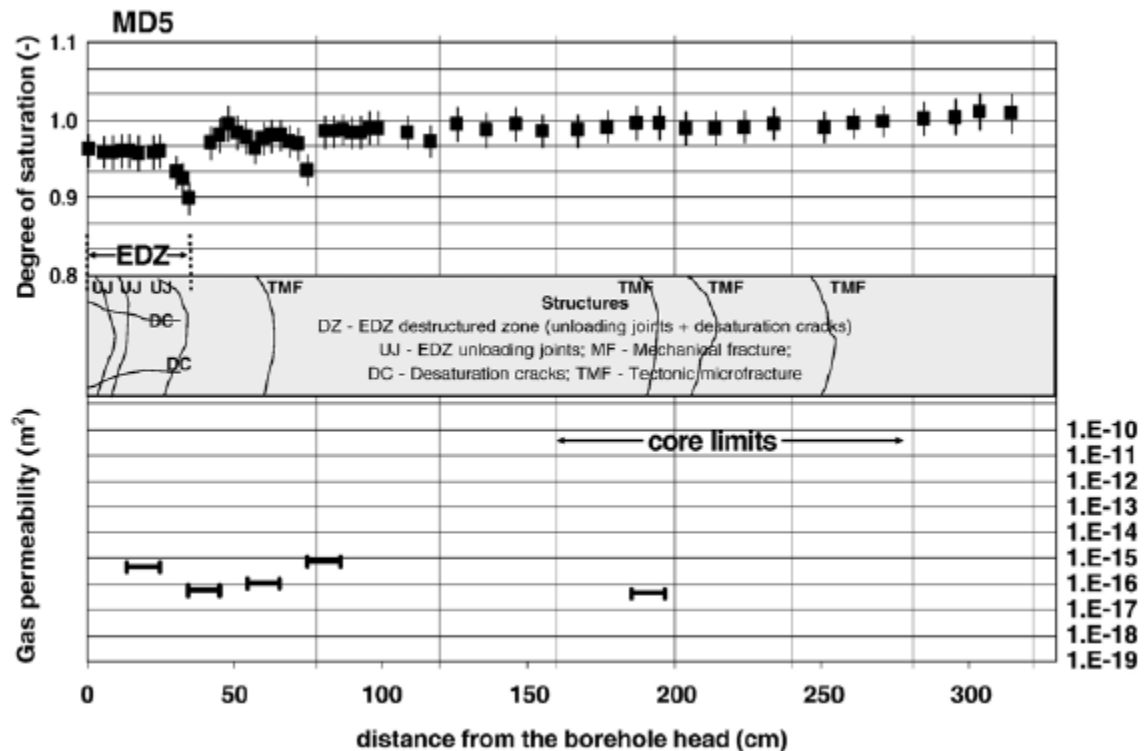


Abb. 13: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

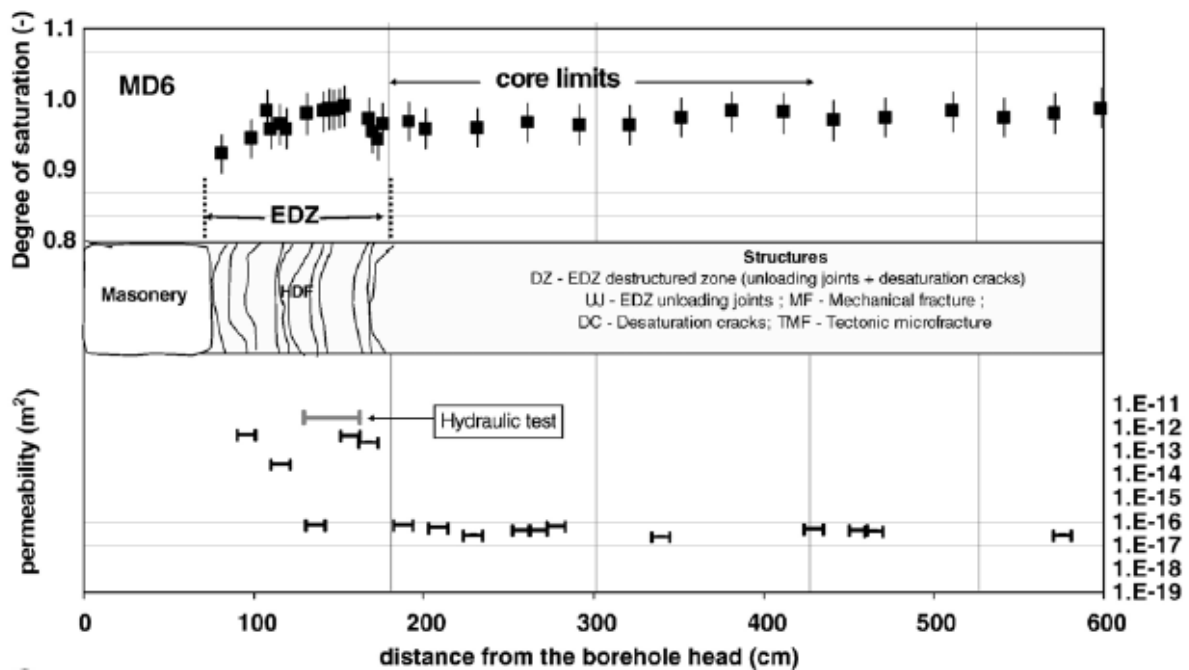


Abb. 14: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

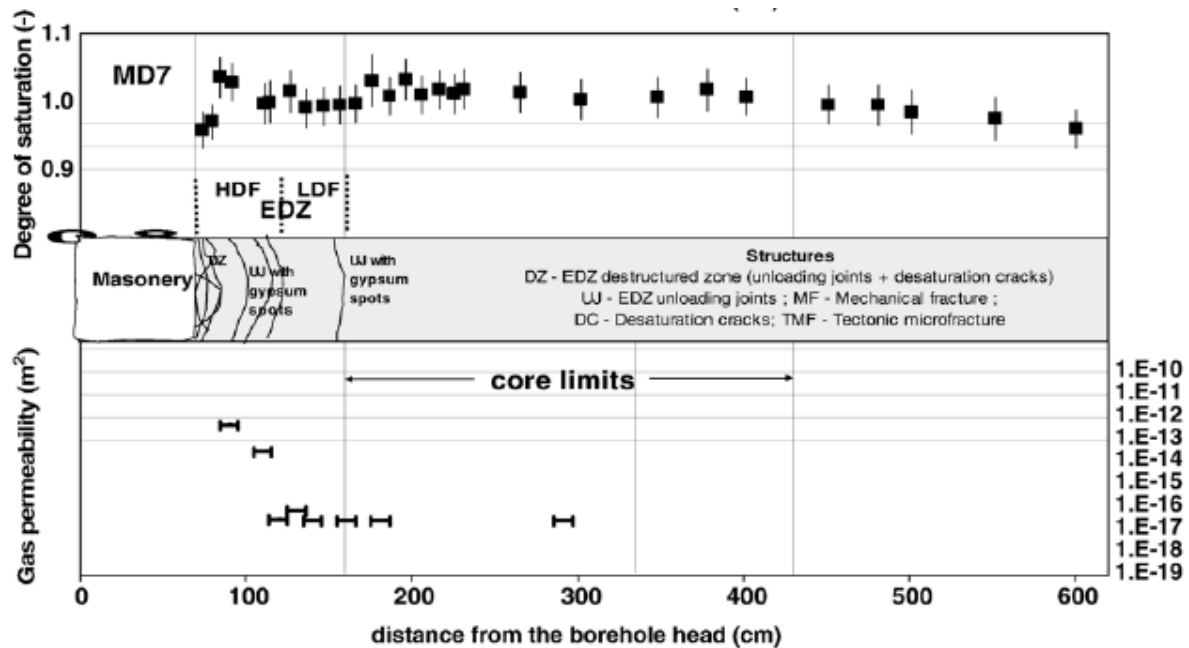


Abb. 15: Permeabilität und Sättigungsgrad in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur (Matray et al. 2007).

5 Untertagelabor HADES (Boom Clay)

Untersuchungen im Untertagelabor HADES haben gezeigt, dass der Porenwasserdruck bis mehrere zehner Meter in das Gestein hinein durch den Streckenhohlraum beeinflusst ist. Der Porendruck wird beeinflusst durch den anisotropen Spannungszustand und die anisotrope hydraulische Leitfähigkeit des Boom Clay.

In der Umgebung einer Strecke wurde eine Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit bis in eine Entfernung von 6-8 m gemessen. Im ungestörten Bereich beträgt die hydraulische Leitfähigkeit des Boom Clay zwischen $4 \cdot 10^{-12}$ m/s (vertikal) bis $6 \cdot 10^{-12}$ m/s (horizontal). Die höchsten Werte in der Nähe der Streckenkontur betragen $1 \cdot 10^{-11}$ m/s, liegen also um mehr als eine Größenordnung höher. Wiederholungsmessungen haben diese Verhältnisse bestätigt. Abbildung 16 zeigt die gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung zur Streckenkontur.

Als Ursache für diese Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit werden in erster Linie die geringen effektiven Spannungen in Konturnähe angesehen und nicht einem durch die mechanische Auffahrung bedingten Rissystem zugeordnet. Durch die hohe Plastizität des Boom Clay werden auffahrungsbedingte Risse durch das Aufkriechen des Tones schnell wieder geschlossen. Dieses Verhalten wurde sowohl durch Labormessungen an Bohrkernmaterial als auch durch seismische Messungen in-situ verifiziert.

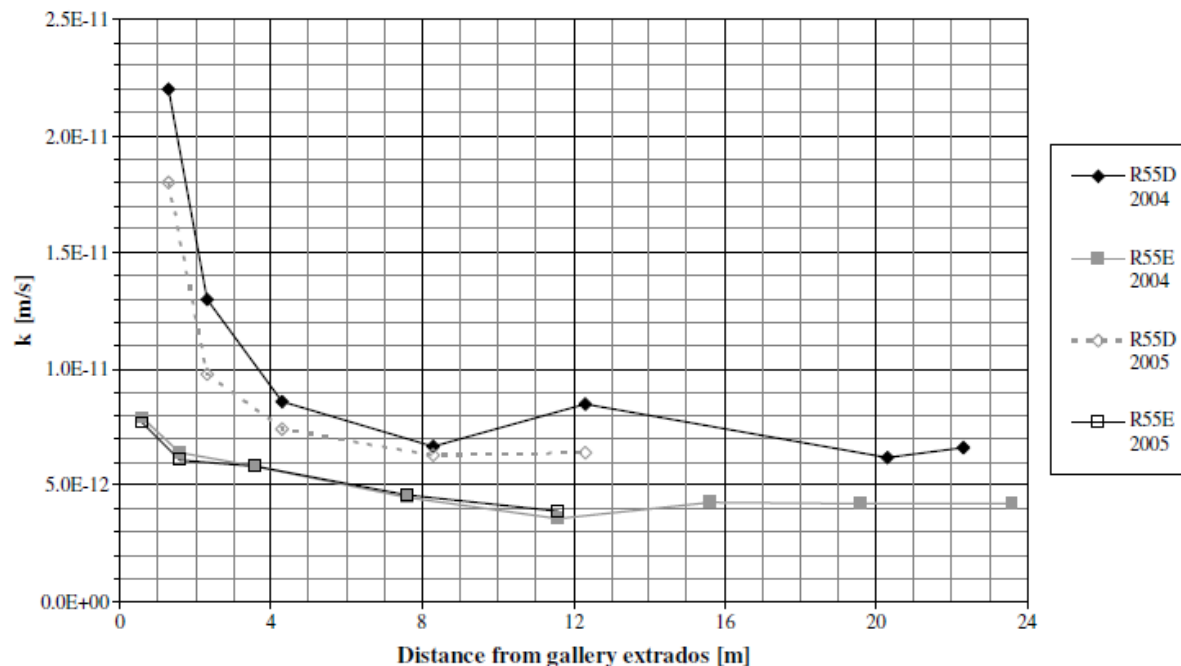


Abb. 16: Hydraulische Durchlässigkeit im Bereich der Auflockerungszone einer Strecke im HADES-URL (Bastiaens et al. 2007).

6 Literaturverzeichnis

- Baechler, S., Lavanchy, J., Armand, G., & Cruchaudet, M. (2011). Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ around drifts at level -490m of the Meuse/Haute-Marne URL: A methodology for consistent interpretation of hydraulic tests. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1922-1931.
- Bastiaens, W., F., B., & Li, X. (2007). SELFRAC: Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 600-615.
- Bossart, P., Trick, T., Meier, P., & Mayor, J.-C. (2004). Structural and hydrogeological characterisation of the excavative-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). *Applied Clay Science*, 26, 429-448.
- Matray, J., Savoye, S., & Cabrera, J. (2007). Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Engineering Geology*, 90, 1-16.
- Mayor, J., Garcia-Sineriz, J., Alonso, E., Alheid, H., & Blümling, P. (2005). *Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories*. Tech. rep., ENRESA.
- Shao, H., Schuster, K., Sönnke, J., & Bräuer, V. (2008). EDZ development in indurated clay formations - In-situ borehole measurements and coupled HM modelling. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 5388-5395.
- Souley, M., ARMAND, G., SU, K., & WILEVEAU, Y. (2007). Poromechanical behaviour of deep claystone and permeability changes around shaft. *International workshop on constitutive modelling development implementation evaluation and application, 12-13 janvier 2007, Hong Kong, Chine*.