

# Kali und Steinsalz



## **Marthaler, Gillespie, Goetzfried**

Salt fluoridation in Europe and in Latin America –  
with potential worldwide

## **Slotta**

150 Jahre Kaliproduktion in Deutschland

## **Voigt, Grafe, Wilsnack**

Entwicklung eines Oberflächenpackers zur Bestimmung  
der Permeabilität von Salz- und Festgestein

# Entwicklung eines Oberflächenpackers zur Bestimmung der Permeabilität von Salz- und Festgestein



Dr.-Ing. Hans-Dieter Voigt,  
Institut für Bohrtechnik und  
Fluidbergbau, TU Bergakademie  
Freiberg



Dr. rer. nat. Friedemann Grafe,  
IBeWa-Ingenieurpartnerschaft  
für Bergbau, Wasser- und  
Deponietechnik



Dr.-Ing. Thomas Wilsnack  
IBeWa-Ingenieurpartnerschaft  
für Bergbau, Wasser- und  
Deponietechnik

Für die Dimensionierung von Verschluss- und Abdichtbauwerken in untertägigen Grubenbauen ist die Kenntnis der Permeabilität auch an den Oberflächen von Gebirge und Baumaterial eine wichtige Voraussetzung. Da sie mit Bohrlochpackertesten nicht bestimmt werden kann, wurde dafür ein spezieller Oberflächenpacker entwickelt, gebaut und dessen Anwendbarkeit untersucht. Der Packer ist nach dem Prinzip konstruiert, dass ein Hohlvolumen an der Gesteinsoberfläche so abgedichtet wird, dass der Gasstrom von diesem Volumen zur unabgedichteten Gesteinsfläche verläuft. Dichtheitstests mit diesem Packer zeigten, dass geringste Permeabilitäten bis zu  $1 \cdot 10^{-22}$  m bestimmt werden können. Bestimmte Permeabilitäten von geringpermeablen Sandsteinen und von Baumaterial sind vergleichbar mit Werten, die an Kernproben gemessen wurden. Untersuchungen in der Praxis zur Bestimmung der oberflächennahen Permeabilität einer seit Jahren aufgefahrenen Steinsalzstrecke erbrachten plausible Ergebnisse. Das Messverfahren wird zur Beurteilung weiterer Standorte eingesetzt.

## Einleitung

Im Zusammenhang mit dem Bau von Verschluss- und Abdichtbauwerken in untertägigen Grubenbauen werden in-situ-Permeabilitätstests als Grundlage der Konzipierung und Dimensionierung sowie der Standortauswahl und der Nachschnittfestlegung durchgeführt.

Für die Bestimmung der Permeabilität von Salz- und Festgestein haben sich spezielle Packer-ausrüstungen in der Praxis seit langem bewährt [1, 2, 3]. Dabei wurde vielfach gemessen, dass sich die Permeabilität mit wachsendem Abstand von der Oberfläche des Gesteins auf Grund der Auflockerung verringert. Abb. 1 zeigt diese Abhängigkeit für Salzgesteine. Bohrspackertests ermöglichen eine erste Messung im Abstand von etwa 0,05 m bis 0,10 m von der Oberfläche. Für die Beurteilung der Dichtheit von unterirdischen Verschlussbauwerken ist jedoch die Permeabilität unmittelbar an der Oberfläche bzw. in der Fuge zwischen Gebirge und Baustoff von

Bedeutung. Zur Bestimmung dieser Oberflächenpermeabilität wurde ein spezieller Packer entwickelt, gebaut, getestet und in der Praxis eingesetzt. Die vorliegende Arbeit stellt das Entwicklungskonzept und erste Ergebnisse aus Messungen an unterschiedlichen Materialien vor.

## Konzept des Oberflächenpackers

Das Entwicklungskonzept hat die zerstörungsfreie Ermittlung der stoßnahen/oberflächennahen Permeabilität des Gebirges zum Ziel. Um Reaktionen des strömenden Fluids mit dem Gebirge und Sättigungsprobleme auszuschließen, wurde der Packer für Gasströmung entwickelt. Dafür konnten die Erfahrungen aus Bohrspackertests genutzt werden. Der Oberflächenpacker ist so zu konstruieren, dass ein Hohlvolumen, der Prüf- oder Druckraum (DR), an der Gesteinsoberfläche so abgedichtet wird, dass der Gasstrom von diesem Volumen zur unabgedichteten Gesteinsfläche verläuft. Abbildung 2 zeigt Prinzipskizze

und Foto der entwickelten Ausrüstung. Zur Erzielung der Abdichtung wird der Packer mit Hilfe eines Jochs und eines Hydraulikstempels an die Gebirgsoberfläche gepresst.

Die gesammelten Erfahrungen der Bohrungstests zeigten, dass es zur Kontrolle der Strömungswege sinnvoll ist, neben dem Volumen zur Druckbeaufschlagung einen ringförmigen Kontrollraum (KR) bei der Konstruktion des Oberflächenpackers vorzusehen. Beide Volumina sind mit Drucksensoren ausgerüstet.

Die weitere Ausrüstung der Packeranordnung besteht aus folgenden Elementen:

- Kompressor oder Vakuumpumpe mit Gasbehälter zur Druckbeaufschlagung,
- Datenlogger,
- Computer,
- Verbindungsschläuche und Absperrinrichtung, die sowohl für Vakuum als auch für Überdruck geeignet sind.

Die Beschaffenheit der Gebirgsoberfläche erfordert, auch bei schonender bergmännischer Herstellung, eine Glättung der Oberfläche vor dem Test zur Gewährleistung einer Packerdichtheit. Die Glättung wird durch geringes Anschleifen der Kontur um wenige Millimeter erreicht.

Mit der entwickelten Ausrüstung können Tests sowohl mit Unterdruck als auch mit Überdruck bis zu 10 bar durchgeführt werden. Aufgrund der für die Kontur in der Regel anzunehmenden geringen Gebirgsspannung werden Prüfdrücke von < 5 bar angewendet.

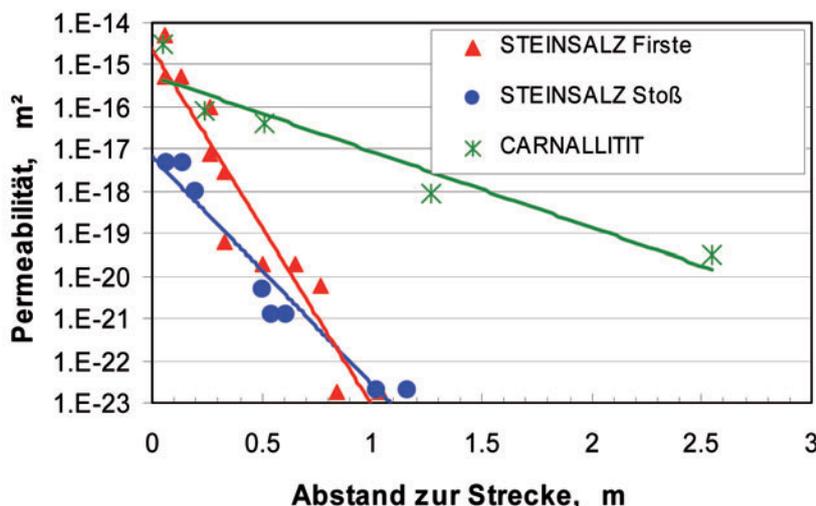


Abb. 1: Typische Abhängigkeit der Permeabilität vom Konturabstand (exponentielle Regressionsgeraden) / Typical trend for salt permeability vs. the distance from the drift (exponential regression line)

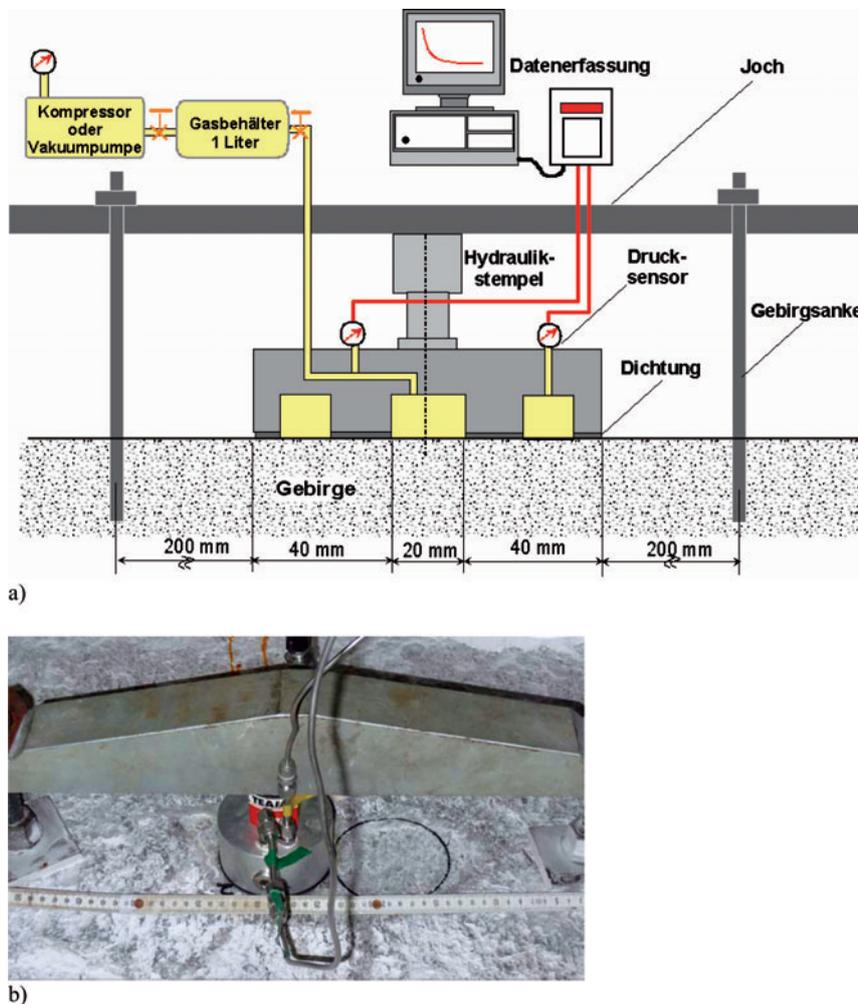


Abb. 2: Prinzipskizze der Ausrüstung a) und Foto des Oberflächenpackers beim in-situ-Test b) / Sketch of test equipment a) and picture of the surface packer during an in situ test b)

### Test des entwickelten Oberflächenpackers

Vor dem praktischen Einsatz wurde die Ausrüstung einigen Tests unterzogen, um sowohl die Dichtigkeit als auch die Plausibilität der Ergebnisse für unterschiedliche poröse Materialien zu prüfen. Als Strömungsmedium diente Stickstoff, es können jedoch auch andere Gase verwendet werden.

### Testinterpretation

Zur Interpretation der mit dem Oberflächenpacker gemessenen Testergebnisse wurde ein numerisches Simulationsprogramm entwickelt. Dieses Simulationsprogramm ermöglicht die Modellierung des Strömungsraumes in  $r$ - $z$ -Geometrie (oder  $r$ - $\phi$ - $z$ -Geometrie) und die Nutzung von Suchverfahren für die Bestimmung der Permeabilität [1]. Eine typische Gitternetzstruktur,

wie sie für die Testinterpretation verwendet wird, zeigt Abb. 3. Gleichfalls ist in Abb. 3 die Druckverteilung im Gebirge dargestellt, wie sie bei einem Test entsteht.

### Dichtheitstest

Der erste Test bestand in der Prüfung der Dichtigkeit der Testapparatur. Dazu wurden die Ausrüstung auf eine Acrylplatte installiert und sowohl ein Unterdruck als auch ein Überdruck angelegt. Die Messungen wurden bis zu einer Zeit von 10,5 Tagen durchgeführt und ergaben die in Abb. 4 dargestellten Druckentwicklungen. Die Druckentwicklungen zeigen geringfügige Druckveränderungen infolge von Diffusion im Dichtungsbereich.

Die Druckveränderungen der Messungen wurden mit dem numerischen Simulationsprogramm interpretiert und ergeben eine Permeabilität in der Größe von  $1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$  bis  $5 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ . Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Permeabilitäten von permeablen Stoffen in der Größe von  $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$  mit für praktische Verhältnisse ausreichender Genauigkeit bestimmt werden könnten. Analoge Dichtheitstests werden vor jedem in-situ-Einsatz des Oberflächenpackers durchgeführt.

### Test von Obernkirchner-Sandstein

Obernkirchner-Sandstein wird häufig für Laboruntersuchungen genutzt, so dass die Permeabilität durch eine Reihe von Messungen bekannt ist. Der Sandstein weist bei Kernuntersuchungen (Messungen der Autoren) eine Permeabilität

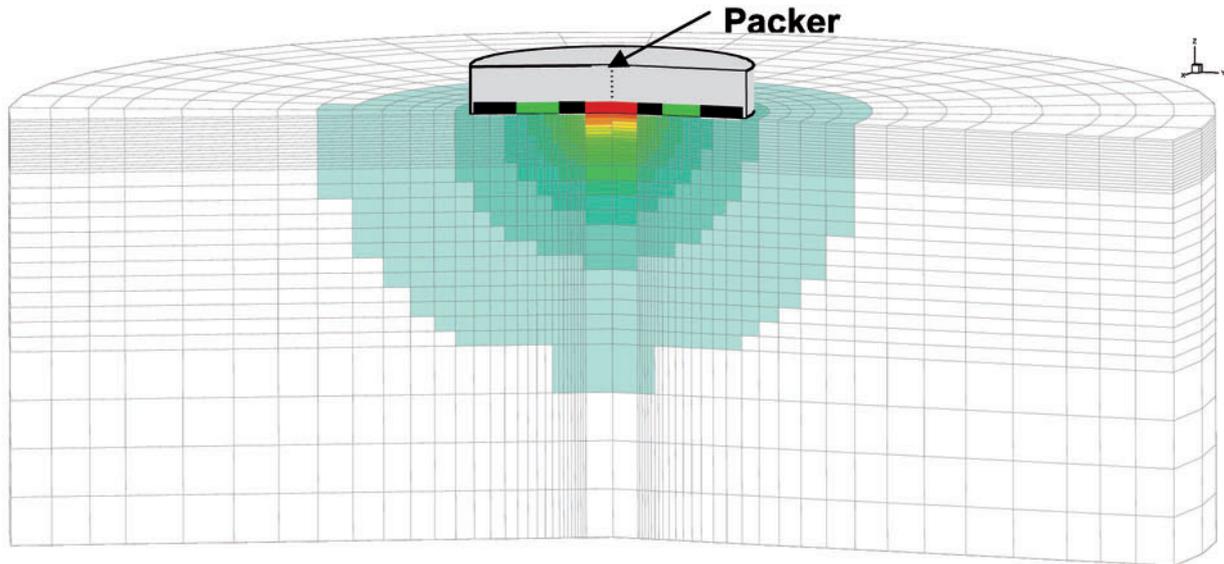


Abb. 3: Gitternetzstruktur des Simulationsmodells und räumliche Druckverteilung beim Test / Grid structure of the simulation model and the spatial pressure Distribution during the test

im Bereich von  $1.1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  bis  $3.7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  auf. Der zweifache Test (zur Absicherung der Ergebnisse in der Entwicklungsphase) mit dem Oberflächenpacker ergab die in Abb. 4 dargestellte Druckentwicklung, die zu einer Permeabilität von  $1.8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  führt. Die mit beiden Verfahren erzielten Ergebnisse stimmen gut überein.

#### Test von Kylltal-Sandstein

Mit dem Oberflächenpacker wurde ein weiterer relativ dichter und inhomogener Sandstein untersucht. Für das Material wurde im Anschluss an die Oberflächenpackermessung im Testbereich der Packermessung ein Kern senkrecht zur Oberfläche erbohrt und die Permeabilität im Labor gemessen. Abb. 6 zeigt die Inhomogenität des Kylltal-Sandsteins und die Lage des Kerns für die Laboruntersuchungen. Die Permeabilität der

Kernprobe des Kylltal-Sandsteins beträgt  $5,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ . Mit dem Oberflächenpacker wurden zum Nachweis der Reproduzierbarkeit zwei aufeinanderfolgende Messungen durchgeführt. Die Messungen ergaben die in Abb. 7 dargestellten identischen Druckreaktionen mit einer sich daraus ergebenden

Permeabilität von  $8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . Der relativ drastische Unterschied der ermittelten Permeabilitätswerte ist durch den inhomogenen Charakter des Sandsteins in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung zu erklären. Durch einen Kerntest werden somit dominant die höherpermeablen, oberflächen-

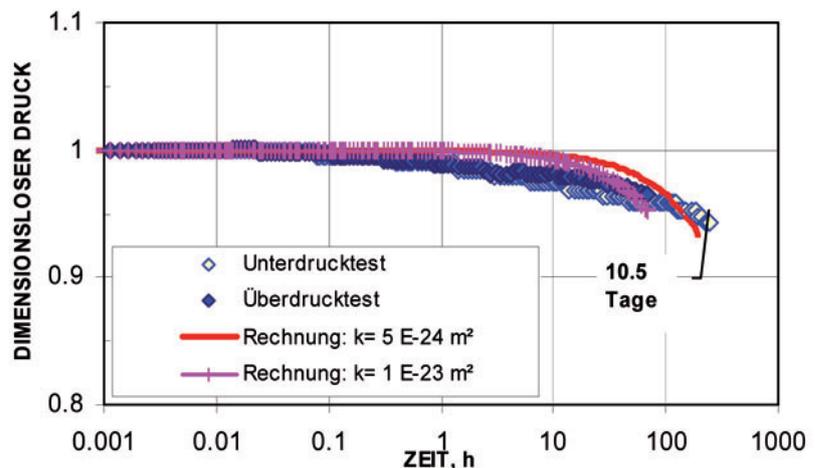


Abb. 4: Dichtigkeitstest des Oberflächenpackers auf einer Acrylplatte / Leak test of the surface-packer on an acryl plate

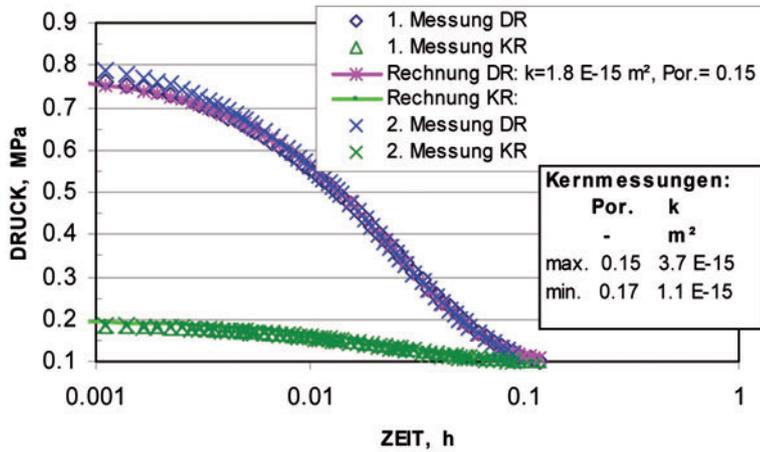


Abb. 5: Oberflächenpackertest von Obernkirchner-Sandstein / Test result from the surface-packer for Obernkirchner sandstone

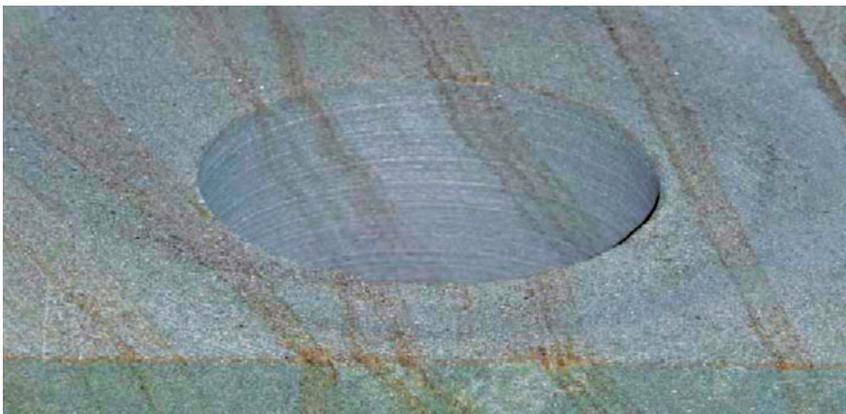


Abb. 6: Kylltal-Sandstein mit der Position des erbohrten Kerns / Kylltal sandstone with the position of the drilled core plug

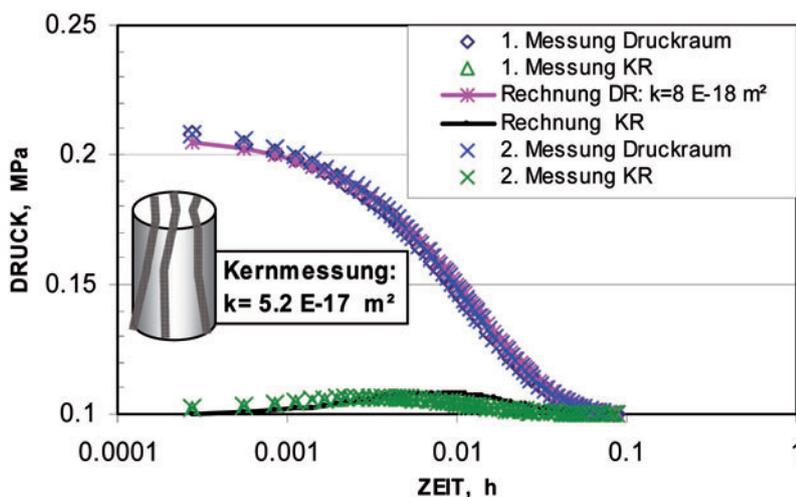


Abb. 7: Oberflächenpacker-Test von Kylltal-Sandstein ( $k=8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ) / Test result from the surface-packer for Kylltal sandstone ( $k=8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ )

nahen Bereiche linear in einer Strömungsrichtung durchströmt.

### Test von MgO-Beton

Abschließend erfolgten Permeabilitätsmessungen mit verschiedenen Verfahren an einem gegossenen Block aus MgO-Beton. Nach der Abbindezeit von 28 Tagen wurden eine Kernbohrung in den Block gebohrt und ein Bohrlochpackertest in einem Konturabstand von 0,2 m durchgeführt, der eine Permeabilität von  $4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  ergab. Anschließend wurde die Oberfläche an anderer Position geschliffen, um eine gute Oberflächenabdichtung für den Oberflächenpackertest zu erreichen. Die erste Permeabilitätsmessung mit dem Oberflächenpacker ergab eine Permeabilität von  $1,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . Eine nahezu gleiche Permeabilität erbrachte die Messung an der gewonnenen Kernprobe (s. Tab. 1). Die relativ geringe Permeabilität der Bohrungsmessung wird auf einen höheren Feuchtegehalt im Inneren des Materials zurückgeführt. Ein abschließender Oberflächenpackertest nach etwa einem Jahr Lagerung ergab eine wesentlich geringere Permeabilität von  $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  als die vorhergehenden Untersuchungen. Die bei diesem Test gemessene Druckentwicklung und Interpretation ist in Abb. 8 dargestellt.

Es wird vermutet, dass diese Reduzierung der Permeabilität durch die Feuchtigkeitsaufnahme und Hydratation bedingt ist.

### Ergebnisse und Erfahrungen beim in-situ-Test

In der Testphase des Oberflächenpackers wurde dieser für die Ermittlung der stoßnahen Gebirgspermeabilität der Steinsalzkontur in der Nähe eines Streckenkreuzes (Abb. 9) eingesetzt. Die untersuchte Strecke wurde vor etwa 50 Jahren in einer Teufe von ca. 350 m bohrend und sprengend aufgefahren.

Dazu wurden die Oberfläche des Stoßes mit einem Abtrag von 0,5 cm plan geschliffen und die erste Messung durchgeführt. Danach erfolgten ein erneutes Abschleifen der Oberfläche und wiederum eine Permeabilitätsmessung. Die Druckreaktion einer solchen Messung zeigt Abb. 10.

Die gleiche Verfahrensweise wurde an einem zweiten nahegelegenen Standort wiederholt. Nach dieser Verfahrensweise erfolgten am Standort 1 fünf Messungen und am Standort 4 vier Messungen, so dass sich die in Abb. 11 dargestellte Permeabilitätsverteilung ergab.

Es zeigt sich, dass die Permeabilität im Abstand von 0,5 cm bis ca. 2,0 cm von der initialen Oberfläche etwa konstant bleibt und mit größerem Abstand geringer wird. Dieses Ergebnis bestätigt die bisherigen Vorstellungen zur Ausbreitung der Auflockerungszone an der Kontur. Dieses Phänomen muss durch weitere Messungen an unterschiedlichen Standorten verifiziert werden. Aus den bisherigen in-situ-Messungen ergaben sich, abweichend zu den bisherigen Vorstellungen zur konturnahen bzw. oberflächennahen Permeabili-

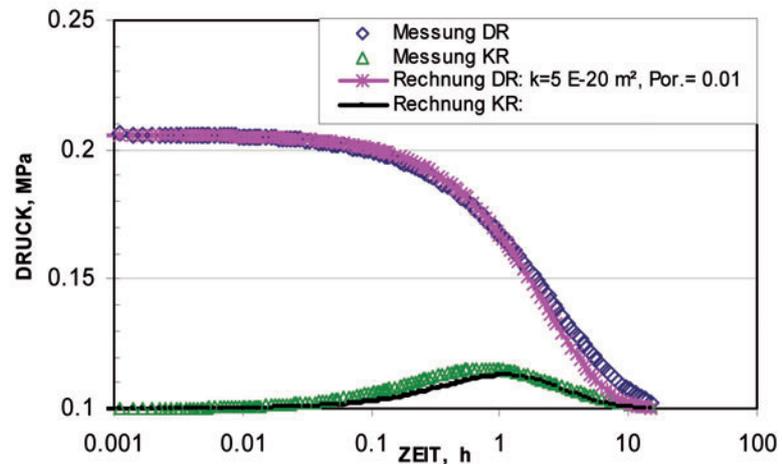


Abb. 8: Oberflächenpackertest an einem Block aus MgO-Beton / Test result from the surface-packer for MgO-concrete block

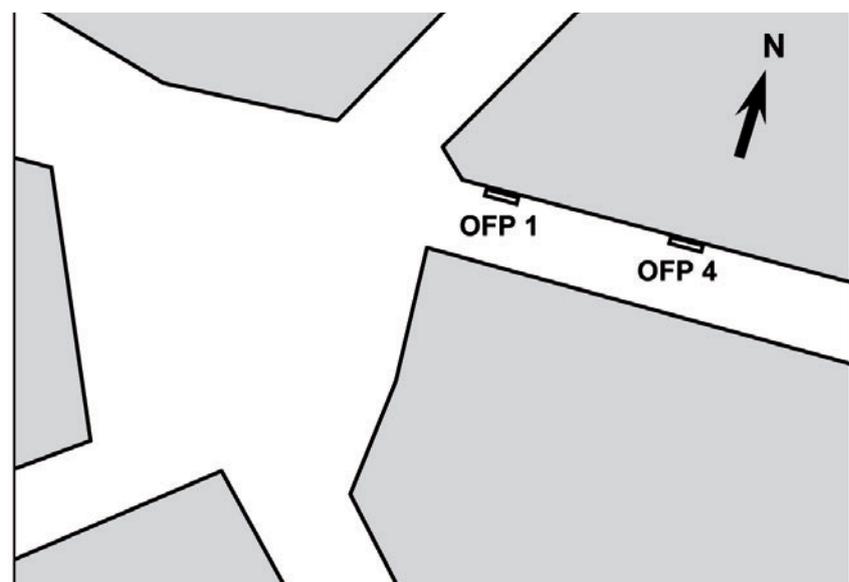


Abb. 9: Testpositionen des Oberflächenpackers an einer Steinsalzkontur / Plan view of the packer test position in a mine

Untersuchungsverfahren	Datum	k(Gas, effektiv) m <sup>2</sup>
Bohrlochpackertest	15.12.2008	4,0 E-19
Oberflächenpackertest	16.01.2009	1,2 E-18
Kernprobe	29.03.2009	1,0 E-18
Oberflächenpackertest	15.01.2010	5,0 E-20

Tab. 1: Ermittelte Permeabilitätswerte von unterschiedlichen Untersuchungsverfahren für MgO-Beton / Estimated permeability data for MgO-Concrete of different test procedures

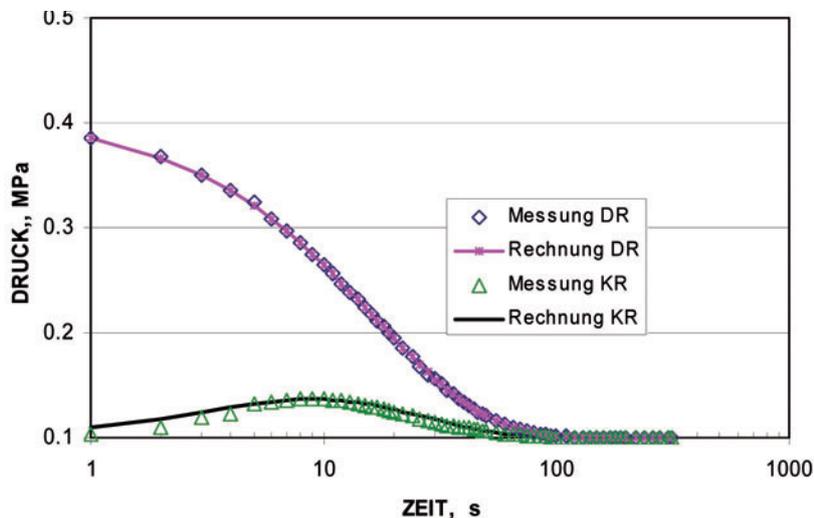


Abb. 10: Permeabilitätsmessung am Stoss bei 1.8 cm Abstand von der initialen Oberfläche,  $k=3,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$  / Permeability measurement at 1.8 cm distance of the initial excavation face,  $k=3,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

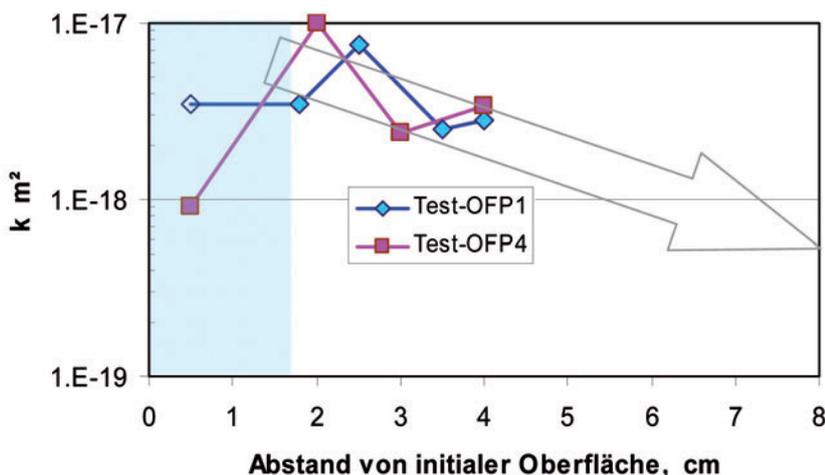


Abb. 11: Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit vom Abstand zur Kontur / Permeability as function of the distance from the initial excavation face

tät von Salinarkonturen, folgende Erkenntnisse: Die Extrapolation von Ergebnissen der Bohrlochmessungen auf die Konturpermeabilität ist nur bedingt, in Abhängigkeit von den Standortbedingungen möglich.

Eine Beeinflussung der oberflächennahen Permeabilität durch

die Grubenwetter ist nicht auszuschließen.

### Schlussfolgerungen

Aus den Tests und den ersten Anwendungen unter in-situ-Bedingungen des entwickelten Oberflächenpackers lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die Dichtheitstests zeigten, dass geringste Permeabilitäten bis zu  $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$  bestimmt werden können. Mit dem Oberflächenpacker ermittelte Permeabilitätswerte von geringpermeablen Sandsteinen und Magnesiabaustoff sind vergleichbar mit Werten, die an Kernproben oder mit dem Bohrlochpackertest gemessen wurden.

Die Untersuchungen in der Praxis zur Bestimmung der oberflächennahen Permeabilität erbrachten plausible Ergebnisse.

Mit der entwickelten Versuchsausrüstung können die bisher fehlenden Kenntnisse zur oberflächennahen Permeabilität für die Dimensionierung von Verschlussbauwerken gewonnen werden.

### Literatur

- [1] Behr, A., Voigt, H.-D., Haefner, F., Belohlavek, K.U.: An advanced well test with automatic model calibration for soils and rocks. Calibration and Reliability in groundwater Modelling: ModelCARE 2002, 177–182, Prague June 2002.
  - [2] Stormont, J.C.: In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 7, 1055–1064, 1997.
  - [3] Voigt, H.-D., Häfner, F., Sitz, P., Wilsnack, Th.: Bestimmung geringer Durchlässigkeiten im Gebirge. Z. für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt, 12, 537–539, Dez. 2002.
- Der hier vorgestellte Oberflächenpacker wurde in einem durch das Bundesministerium für Wissenschaft und Technologie gefördertem Projekt (Förderkennzeichen 02E10447) entwickelt.