

# Geothermie Forschungsprojekt „Allgäu 2.0“ – Forschungsansätze, Laboruntersuchungen & Planungsschritte

Geothermal research project “Allgäu 2.0” – research concepts, lab-investigations & design

Detlev Tondera<sup>1</sup>, Herbert Klapperich<sup>1</sup>, Guido Blöcher<sup>2</sup>, Inga Moeck<sup>3</sup>,  
Torsten Steiger<sup>4</sup>, Curd Bems<sup>5</sup>, Stephan Hild<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institut für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

<sup>2</sup> Helmholtz Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland

<sup>3</sup> Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada

<sup>4</sup> Geotec Consult Uhlig und Partner, Markt Schwaben, Deutschland<sup>(5)</sup> EXORKA GmbH, Grünwald, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Vorfeld von operativen Arbeiten in geothermalen Speichern ist es notwendig, gesteinsmechanische Eigenschaften des Speichers zu erfassen um einen sicheren Betriebsablauf zu ermöglichen. In diesem Beitrag werden ingenieurgeologische und geotechnische Aspekte in Verbindung mit einem geplanten Speicherbetrieb bestimmter Horizonte des Malmkalkes mittels Laboruntersuchungen erläutert. Am Forschungsstandort Mauerstetten ist eine Bohrung mit sidetrack bis in etwa 4000 m Tiefe niedergebracht worden. Mit der Bohrung wurde zwar das Bohrklein auf biostratigraphische Hinweise intensiv untersucht, jedoch wurden keine Bohrkerne gewonnen. Daher erfolgte eine umfangreiche Analogprobenahme zur Gewinnung von ausreichendem Analysematerial, an welchem durch die beteiligten Institutionen umfangreiche geologische, petrographische, petrophysikalische und gesteinsmechanische Untersuchungen durchgeführt wurden. Das Speichergestein besteht aus mikritischen zum Teil dolomitierten Karbonaten des Oberen Malm. Entsprechend wurden die Analogaufschlusspunkte in der südlichen fränkischen Alb bei Ingolstadt ausgewählt. Der Speicher befindet sich in 3600 m Tiefe (ab Geländeoberkante). Die durchschnittliche Gesteinsdichte wird auf 2,4 g/cm<sup>3</sup> geschätzt, so dass sich eine Vertikalspannung von Sv~85 MPa ergibt. Die Kombination aus hydraulischer und strukturgeologischer Charakterisierung mit einer anschließenden 3D-Modellierung des Speichers hat im Hinblick auf die Speichernutzung ergeben, dass die in situ Matrixpermeabilität durch Scherrisse maßgeblich gesteigert werden kann.

**Schlüsselworte:** Oberer Jura, Geothermie, Speichergestein, Analogprobenahme, petrophysikalische und gesteinsmechanische Gesteinseigenschaften

## Abstract

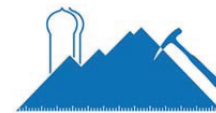
Planing the utilization of geothermal systems requires the quantification of rock mechanical properties of reservoir rock to secure safe and sustainable reservoir operation. This article specializes in engineering and geotechnical aspects in terms of reservoir enhanced production from Upper Jurassic carbonate rock in the southwest Bavarian Molasse Basin. Specifically, a well is drilled including sidetrack down to 4,000 m depth at the research site Mauerstetten, close to Kaufbeuren. Cuttings are intensively investigated for biostratigraphy interpretation whereas drill cores are not taken from the reservoir. Geomechanical tests were conducted on analogue rock material, sampled extensively on analogue outcrops in the Franconian Alp in the vicinity of Ingolstadt. Laboratory analysis on rock samples cover petrographical, petrophysical and geomechanical tests. In particular, the reservoir rock is located in 3600 m TVD and has an average density of 2.4 g/cm<sup>3</sup> causing a vertical stress Sv ~85 MPa. The methodological combination from hydraulic and structural geological characterisation followed by 3D geological-hydraulic modelling of the reservoir helps to understand the impact of distinct fracture populations during reservoir operation. Results indicate that shear fractures significantly increase the rock permeability hence reservoir production.

**Keywords:** Upper Jurassic, Molasse Basin, Geothermal energy, reservoir rock, analogue outcrop sampling, petrophysical and geomechanical properties

## 1 Einleitung und regionale Lage

Den gesellschaftlichen Nutzen der Tiefengeothermie, nun verstärkt durch die Energiewende, gilt es in der Akzeptanz zu verstärken. In Deutschland und speziell im Großraum München zeigen erfolgreich realisierte Projekte auf dem Wärmemarkt, aber auch zur Stromerzeugung die Bedeutung im Reigen der Erneuerbaren Energien. Das vom BMU geförderte Forschungsverbundprojekt beschreibt die Situation

westlich von München - ursächlich mit Problemen der Umsetzung der hydrothermalen Projekte behaftet. Das Forschungsprojekt greift das Konzept der Enhanced Geothermal Systems (EGS) zur Nutzung des Potenzials der Malm-schichten auf. Grundlage bildet ein künstlich geschaffener Wärmetauscher im relativ undurchlässigen Tiefen-Niveau unter Nutzung einer vorhandenen Tiefbohrung. Die abgelenkte Bohrung Mauerstetten GT1 mit GT1a wurde gezielt



in eine ENE-WSW streichende nach Süd einfallende Störungszone abgeteufelt (Abb. 1). Die Bohrlochentiefe des Sidetracks beträgt 3763 m TVD (Vertikalteufe ab Rasensohle). Die letzten 332 m der Bohrung sind unverrohrt. Die Bohrung GT1 durchteuft die Störungszone nah am Störungskern und erfährt dadurch eine Schichtlücke im Tithon und eine Schichtwiederholung im Kimmeridge. Die Bohrung GT1 hat nicht die erhofften Schüttungsraten von 80 l/s erbracht, während der am Rand der Störungszone befindliche sidetrack nahezu trocken war. Ein nachgeschaltetes Forschungsprojekt soll klären, was die Permeabilitätsstruktur am Standort Mauerstetten kontrolliert und welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Speicherproduktivität zu erhöhen.

## 2 Geologische/Hydrogeologische Situation

### 2.1 Geologische Situation

Der Standort Mauerstetten befindet sich im Ostallgäu und damit im südwestlichen Süddeutschen Molassebecken zwischen Kempten und dem Starnberger See. Das Speichergestein des Oberen Jura der fränkisch-süddeutschen Riffplattform ist geprägt durch ENE-WSW verlaufende Abschiebungen, die Sprunghöhen von 150 - 200 m aufweisen (MOECK, 2012). Eine Neubewertung von 2D seismischen Profilen hat eine mehrphasige Reaktivierung der Abschiebungen von Oberjura bis Tertiär (Chatt) ergeben (MOECK, 2012). Das Speichergestein weist außerhalb der Störungszone eine effektive Mächtigkeit von 120 m auf und besteht aus mikritischen Kalken der Purbeck Formation sowie Intraspariten und Mikriten der Rifffazies und Kieselschwammfazies des unteren Tithon und Kimmeridge. Einen Überblick der Faziesverteilung und markanter Strukturlinien gibt Abbildung 1.

Das angestrebte Bohrziel waren hochporöse Kalke des Oberjura zur Förderung von Formationswasser mit 120 - 150 °C. Das Formationswasser gehört entsprechend den geothermischen Speichern im zentralen Molassebecken dem Hydrogenkarbonat-Typ an. Zuflusszonen aus Korallen-Riff-Arealen konnten durch die Bohrung nicht bestätigt werden. Stattdessen werden die Hauptfließwege wahrscheinlich durch Störungszonen und assoziierten Spaltensystemen innerhalb einer dichten karbonatischen Matrix kontrolliert. Die Analyse von Bohrklein zeigt eine spätdiagenetisch verursachte Reduzierung des Porenraums durch Bildung von Dolomitaggregaten und Klufthalkziten. Nach dem Bayerischen Geothermieatlas (2010) gilt das Gebiet um Mauerstetten als gering durchlässig mit einer Gebirgsdurchlässigkeit von  $10^{-11}$  bis  $< 10^{-5}$  m/s. Der Druckwasserspiegel im Speicher liegt mit 300 m unter Geländeoberkante unterhalb des tertiären Grundwasserdrucks, so dass unterhydrostatische Bedingungen im Malmaquifer bei Mauerstetten vorliegen.

### 2.2 Spannungsregime

Das in der 2D Seismik diagnostizierte Abschiebungssystem in ENE-WSW Richtung mit Einfallrichtung hauptsächlich nach Süd und untergeordnet nach Nord impliziert eine Richtung der kleinsten horizontalen Hauptspannung  $S_h$  in etwa N-S, sofern Anderson'sche Störungsbedingungen ange-

nommen werden (Moeck, 2012; Anderson 1951). Die Weltspannungskarte zeigt jedoch eine Richtung von  $S_h$  in E-W. Die maximale Horizontalspannung  $S_H$  liegt damit in etwa N-S (Reinecker et al., 2010) (Abb. 1). Daraus kann geschlossen werden, dass es sich um fossile Abschiebungen handelt, die rezent unter Kompression stehen. Ein rezentes Abschiebungsregime mit  $S_H$  in N-S Orientierung würde vor allen N-S gerichtete Abschiebungen verursachen. Diese N-S Abschiebungen oder N-S gerichtete Horst-Graben-Strukturen sind im Umfeld Mauerstetten und im Molassebecken bisher nicht identifiziert worden. Daraus kann geschlossen werden, dass im Speicherbereich ein Horizontalspannungsregime mit  $S_h < S_v$  und  $S_v < S_H$  möglicher Weise ein Übergang zu Aufschiebungsregime mit  $S_v < S_h < S_H$  vorliegt. Die Vertikalspannung kann aus der Speicherteufe  $z$ , der durchschnittlichen Gesteinsdichte  $\rho$  und der Gravitationskonstante ( $g = 9,81$  m/s) errechnet werden:

$$\sigma_{zz} = \int_{-D}^0 \rho g dz \quad \text{eq. (1)}$$

So dass sich eine Vertikalspannung  $S_v$  ergibt mit

$$\sigma_{zz} = S_v = \rho g z = 85 \text{ MPa} .$$

Bei einem Formationsdruck von  $P_p=32.92$  MPa (Moeck, 2012) ergibt sich eine effektive Vertikalspannung von 52.08 MPa.

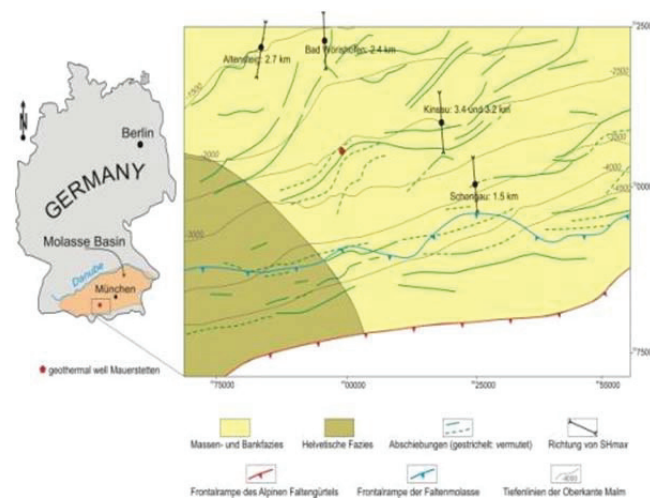


Abb. 1: Lage des Projektgebietes Mauerstetten im Molassebecken und strukturelle Position der Geothermalbohrung am Standort Mauerstetten (rote Wabe) (kombiniert aus Bayerischer Geothermieatlas, 2012 und Reinecker et al. 2010).

Fig. 1: Location of the project area Mauerstetten in the Molasse basin and structural position of the geothermal well Mauerstetten (red comb) (combined from Reinecker et al., 2010 and Bayerischer Geothermieatlas 2012).

## 3 Geotechnische Untersuchungen am Malmkalk-Probenmaterial

### 3.1 Probenahme

Die Riff- und Kieselschwammfazies ist nördlich und westlich von Ingolstadt im Raum Treuchtlingen-Kehlheim aufgeschlossen. Da während der Bohrung keine Bohrkerne genommen wurden, wurden Analogaufschlüsse aufgesucht, in denen der Kieselschwammkalk, der Tubiphytenkalk und

die Purbeck Formation beprobt wurden. Dabei wurde der Neuburger Bankkalk als Analogmaterial zur Purbeck Formation bei Unterhausen (Probencharge 1), die Kiesel-schwammrifffazies durch den Treuchtlinger Marmor bei Petersbuch (Probencharge 2) und die Rifffazies durch die Kehlheimer Bankkalk bei Kehlheim (Probencharge 3) gewonnen. In den Analogaufschlüssen wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm mit einem HILTI-Kleinbohrgerät (Abb. 2) gewonnen.



Abb. 2: Probenahme mit HILTI-Bohrgerät und Kernablage in Kernmärschen zu je 1 Meter

Fig. 2: Sampling by Hilti-drilling and core boxes

## 3.2 Gesteinsmechanische Untersuchungen

### 3.2.1 Einaxiale Druckversuche

Um das geothermische Potenzial im Reservoir beurteilen zu können, sind Kenntnisse der felsmechanischen Kennwerte zur einaxialen Druckfestigkeit erforderlich. Dies gilt umso mehr, da mit den vorliegenden Analogproben 3 verschiedene Gesteinsvarietäten vorliegen, die in ihrer Beurteilung als potentielles Reservoir voneinander abgegrenzt werden müssen. Im Versuch wird eine zylindrische Probe in Achsrichtung belastet. Die Prüfung erfolgte mit einer Universalprüfmaschine Alpha 2-5000. Die Druckkräfte wurden bis zur Bruchbelastung erhöht und gleichzeitig die eingetretenen Dehnungen aufgezeichnet.

#### Herstellung der Probekörper

Die Prüfkörper wurden mit einem Durchmesser von 50 mm aus dem Bohrkern in der jeweiligen Vorzugsrichtung ausgebohrt und auf Längen zwischen 80 mm und 100 mm geschnitten. Die Stirnflächen der Prüfkörper wurden planparallel geschliffen.

#### Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte an den zylindrischen Proben in Anlehnung an DIN-EN-1926 (1999). Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Auflage wurden die Prüfkörper auf dem Druckstempel mittig ausgerichtet. Die Last wurde konstant bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 10 MPa/min auf die Probekörper aufgebracht, anschließend die Bruchlast aufgezeichnet. Die Druckfestigkeit  $\sigma_u$  ist der Höchstwert der axialen Spannung, die vom Prüfkörper aufgenommen werden kann, und berechnet sich aus dem Quotienten der maximalen Bruchlast ( $F_{max}$ ) und der Querschnittsfläche des Probekörpers ( $A$ )

$$\sigma_u = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{eq. (2)}$$

## Ergebnisse

Generell zeigen die Probekörper des Treuchtlinger Marmors die höchsten Festigkeitswerte. Die Mehrzahl der Probekörper wies Spaltbrüche und parallele Entfestigungen in Belastungsrichtung sowie Abplatzungen am Konturrand ohne signifikante Bruchhälften auf (Abb. 3). Die Spannweiten für alle Fazieskomplexe sind in Abbildung 4 dargestellt. Bruchstrukturen zeigen sich abhängig von Schichtung, Störungen, vorangelegten Rissen, Klüften, Gesteinsassoziationen usw. Der E-Modul erreichte bei Krafeinleitung senkrecht zur Schichtung überwiegend höhere Werte gegenüber den in geneigter Ausrichtung zur Schichtung belasteten Probekörpern.



Abb. 3: Bruchformen nach einaxialem Druckversuch, Kehlheimer Kalk B. 3-1-A, PK 79

Fig. 3: Form of failures after uniaxial loading tests, Kehlheimer Kalk B. 3-1-A, PK 79

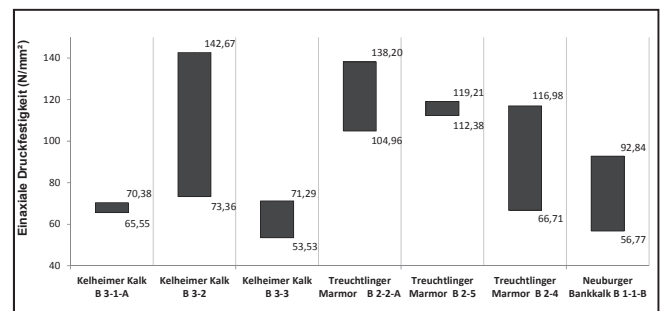


Abb. 4: Übersicht zu den einaxialen Druckfestigkeiten der verschiedenen Fazieskomplexe

Fig. 4: Overview compression strength values in different facies complexes

### 3.2.2 Triaxiale Druckversuche

Ziel der triaxialen Druckversuche ist es, die Bedingungen des Trennbruchversagens, das Bruchverhalten, die Brucharten und die Festigkeitsparameter der unterschiedlichen Gesteinsvarietäten unter Berücksichtigung von Anisotropien, Gefügematrix, Klüften und Druckverhältnissen zu bestimmen. Somit sollen wichtige Rückschlüsse auf das zu erwartende Gebirgsverhalten bei hydraulischer Stimulation gewonnen werden, die u. a. eine Abschätzung der Injektionsdrücke ermöglichen. Dazu werden zylindrische Prüfkörper in axialer Richtung ( $\sigma_1$ ) und durch Manteldruck ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) über eine Prüfpresse belastet.

Dabei werden die Einflüsse wie Änderung des Spannungsregimes und der Belastungsgeschwindigkeiten während der Versuchsdurchführung zur Beurteilung der Versagensmechanismen herangezogen.





Im Rahmen dieser geotechnischen Bewertung erfolgt die Prognose zur Tragfähigkeit des Gebirges hinsichtlich eines Bruchversagens auf der Basis der Mohr-Coulomb'schen Spannungstheorie, die die maximal aufnehmbaren Schubspannungen bis zum Scherbruchversagen festlegen.

In den Versuchsreihen wurde überwiegend mit der Mehrstufenversuchstechnik entsprechend den Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB Teil C 12, 1987) gearbeitet, bei dem die Versuchsbedingungen bei ein und demselben Probekörper nach Erreichen charakteristischer Verschiebungen oder Spannungen nahe dem Bruchzustand geändert werden. Es erfolgt eine automatische computergesteuerte Brucherkenntnis (DGEG 1987).

Der Probekörper wird bei konstant gehaltenem Seitendruck axial gestaucht, bis die Axialspannung  $\sigma_1$  ein Maximum erreicht oder nicht weiter zunimmt. Anschließend wird der Versuch unterbrochen, die Spannung  $\sigma_1$  auf den Wert von  $\sigma_3$  zurückgenommen, die nächsthöhere oder niedere Seitendruckstufe aufgebracht und der Versuch fortgesetzt. So können an verschiedenen Proben mehrere Bruchzustände erfasst werden. Mit dem Reibungswinkel  $\phi$ , der den Widerstand im Material gegen Scherverschiebung darstellt, wird die abscherende Kraft in der Scherfuge repräsentiert. Aus der Kohäsion  $c$  werden Aussagen zu den wirkenden Haftkräften zwischen den Körnern im Probekörper abgeleitet (PRINZ, 1997).

Die Untersuchungen an den Probekörpern erfolgten im gesteinsmechanischen Labor am Institut für Geotechnik sowohl als Mehrstufenversuche als auch in Einzelversuchen. Alle Untersuchungsreihen wurden in Anlehnung an die TP BF-StB - Teil C 12 an einer MTS-Prüfanlage (MTS 815) durchgeführt. Im Ergebnis der Versuche erfolgt die Berechnung der Scherfestigkeit, des Verformungsmoduls und der Querdehnung. Die im Grenzzustand vorherrschende Bruchbedingung wird durch die lineare Beziehung (Coulomb'sche Grenzbedingung) formuliert:

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad \text{eq. (3)}$$

mit:

- $\tau$  Scherwiderstand [N/mm<sup>2</sup>]
- $\sigma$  Normalspannung [N/mm<sup>2</sup>]
- $\phi$  Reibungswinkel [°]
- $c$  Kohäsion [N/mm<sup>2</sup>]

Hierbei wird ein linearer Zusammenhang zwischen  $\tau$  und  $\sigma$  angenommen.

Der Verformungsmodul  $E$  errechnet sich in abschnittsweise linearen Kurvenbereichen nach:

$$E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon_a \quad \text{eq. (4)}$$

mit:

- $\epsilon_a$  axiale Dehnung [%]

Aus dem Verhältnis von Quer- zu Längsdehnung wird die Querdehnungszahl berechnet, welche für den elastischen Bereich gültig ist.

### Herstellung der Probekörper

Für die Untersuchung wurden gerade zylindrische Prüfkörper im Verhältnis Länge/Durchmesser = 2/1 hergestellt. Die Mantelflächen wurden zur Vermeidung von Umläufigkeiten und Störungen im Versuchsablauf mit einer Spachtelmasse geglättet. Die Stirnflächen wurden planparallel geschnitten und eben geschliffen.

### Versuchsdurchführung

Die zylindrischen Probekörper wurden in die Prüfzelle eingebaut, wobei zu Beginn des Versuches ein hydrostatischer Spannungszustand vorherrschte. Nachdem der Seitendruck in der jeweiligen Belastungsstufe erreicht war, erfolgte die Erhöhung der Axialspannung  $\sigma_1$  bis zu einem Maximalwert. Mit dem Erreichen dieser maximalen Spannung  $\sigma_1$  wurden die Probekörper in axialer Richtung entlastet, der Manteldruck bis zum nächsten Spannungsniveau erhöht und der Versuch fortgesetzt. Die Manteldruckstufen der einzelnen Versuchsstufen lagen jeweils bei 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa und 40 MPa. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,05 mm/min bzw. 0,15 mm/min.

An ausgewählten Prüfkörpern wurde der triaxiale Druckversuch in Einzelversuchen durchgeführt. Dabei wurde nach Erreichen des Seitendruckes die Axialspannung  $\sigma_1$  mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Bruch erhöht. Die Axialkraft, Längenänderung und Querdehnung wurden ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet.

### Ergebnisse

Scherbruchversagen wurde im Probekörper bei höheren aufnehmbaren Bruchspannungen hervorgerufen. Maximalwerte der Bruchspannungen und der Verformungsmodule wurden am Treuchtlinger Marmor ermittelt. Die Kohäsion erreichte mit 50 MPa am Neuburger Bankkalk ihren Maximalwert. Eine höhere Verformungsgeschwindigkeit bewirkte eine signifikante Zunahme von Verformungsmodul und Bruchspannungen. Risse bildeten sich bevorzugt entlang vorangelegter Klüfte und Störungszonen aus (MECHTCHERINE, 2000). Unter den zugrunde liegenden Versuchsbedingungen im Triaxialversuch waren an den Bruchoberflächen keine Anzeichen von Scherversatz zu verzeichnen.

Auch innerhalb der jeweiligen Faziestypen sind große Streuungen der Dehnungen und Materialkennwerte (E-Modul, Querdehnungszahl) zu verzeichnen.

Das Versagen der Prüfkörper in Form von Spaltbrüchen ist überwiegend an Inhomogenitäten im Probekörper gebunden, wodurch Mikrorisse durch lokale Zugspannungen hervorgerufen werden. Dabei ist meist lediglich eine Matrixentfestigung im Probekörper festzustellen, die jedoch nicht zum Trennbruch führt. Die Prüfkörper versagten in diesen Fällen in der Regel bei wesentlich geringeren Bruchspannungen. In Abbildung 5 und 6 wird am Beispiel des Probekörpers 1 (Neuburger Bankkalk) die Auswertung zur Bestimmung der Scherwerte und ein typisches Bruchbild nach dem Triaxialversuch gezeigt.

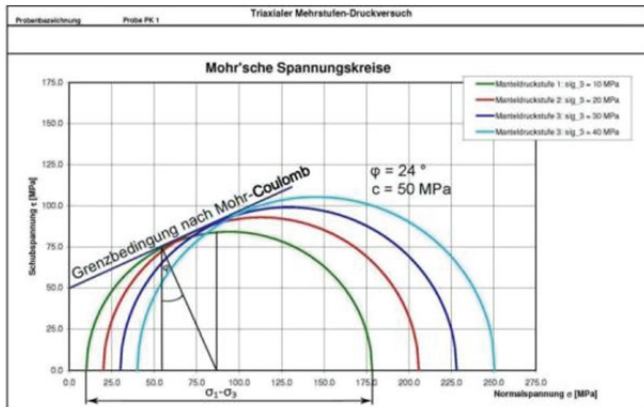


Abb. 5: Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb am Beispiel des Prüfkörpers 1 – Neuburger Bankkalk.

Fig. 5: Mohr-Coulomb limit state sample 1 – Neuburger Bankkalk



Abb.6: Scherbruch am PK 1 – Neuburger Bankkalk

Fig. 6: Shear failure PK 1 – Neuburger Bankkalk

Tab. 1: Scher- und Verformungskennwerte des Neuburger Bankkalkes und Treuchtlinger Marmors

Tab. 1: Shear- and deformation parameters of the Neuburger Bankkalk and Treuchtlinger Marmor

Fazies	Scher- und Verformungskennwerte (Anzahl Proben [Pr.])			
	Reibungswinkel $\phi$ (°)	Kohäsion c (MPa)	Verformungsmodul Ev,40-60 (N/mm <sup>2</sup> )	Querdehnungszahl $\nu$ 40-60
Purbeck	22 - 24	34 - 50	24150 bis 43149	0,36 - 0,44
Neuburger Bankkalk	(3 Pr.)	(3 Pr.)	(3 Pr.)	(3 Pr.)
Riffkalke Kehlheimer Kalk	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt
Treuchtlinger Marmor	38 - 41	20 - 43	28388 bis 56863	0,13 - 0,45
	(5 Pr.)	(5 Pr.)	(5 Pr.)	(2 Pr.)

### 3.2.3 Spaltzugversuche/Braziliantests

Mit der einaxialen Zugfestigkeit als Brazilian-Test werden Erkenntnisse über die Kornbindungskräfte der Minerale innerhalb der Gesteinsmatrix gewonnen.

Auf die Probekörper werden durch zwei gegenüberliegende Linienlasten über einen Lastverteilungstreifen auf der Mantelfläche Spannungen eingeleitet, die im Grenzzustand in der Prüfkörpermitte zu einem diametralen Riss führen.

Durch die Verwendung von Lastverteilungstreifen werden die aufgebracht großen Druckspannungen in die Lastleitungsbereiche umgelagert und es werden Trennbrüche infolge von ausgelösten Zugspannungen initiiert. Während des Versuches entsteht im Probekörper ein komplexer Spannungszustand. In Richtung der Linienbelastung herrschen Druckspannungen, senkrecht zur Belastung überwiegen Zugspannungen (MALÁRICS, 2010).

Die einaxiale Zugfestigkeit liegt i. d. R. bei 1/10 bis 1/30 der einaxialen Druckfestigkeit.

Aus der erforderlichen Bruchkraft und der Prüfkörpergeometrie wurde die Spaltzugfestigkeit ( $f_{ct}$ ) nach der Elastizitätstheorie näherungsweise berechnet.

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \text{eq. (5)}$$

mit:

- F Bruchkraft [N]
- d Probendurchmesser [mm]
- l Probenlänge [mm].

#### Herstellung der Probekörper

Zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit wurden zylindrische Prüfkörper von 50 mm Durchmesser und 25 mm Höhe hergestellt. Nach dem Ausbohren aus dem Bohrkern in der jeweiligen Vorzugsrichtung wurden die Prüfkörper auf die vorstehend beschriebenen Abmessungen geschnitten und die Stirnflächen planparallel geschliffen. Anschließend wurden alle Prüfkörper protokolliert und bis zum Prüftermin zwischengelagert.

#### Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche erfolgte in Anlehnung an DIN 22024. Die Prüfkörper wurden zentrisch zwischen den Druckstempeln eingestellt, der Druckstempel bis zu einem vollflächigen Kontakt zwischen Probekörper und Lastverteilungstreifen herabgelassen und der Nullpunkt justiert.

Anschließend wurden die Prüfkörper konstant bis zum Bruch belastet und die Höchstkraft aufgezeichnet.

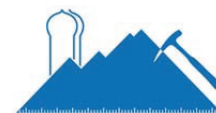
Im Folgenden sollen kurz die Einflüsse auf die Spaltzugfestigkeit beschrieben werden:

#### 1) Belastungsgeschwindigkeit

Die Prüfung erfolgte bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten, bei einer durchschnittlichen Versuchsdauer zwischen 5 und 9 Minuten pro Einzelversuch. Hierdurch konnte der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Ausbildung der Zugfestigkeit erfasst werden.

#### 2) Gefügeeigenschaften

Die einaxiale Zugfestigkeit wird sehr stark durch Gefügeeigenschaften und Anisotropien, wie z. B. Schichtung, Klüftung



oder Schieferung, beeinflusst. Darüber hinaus prägt die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnungen den Verbund zwischen zementierten Bereichen und Mineralasoziationen. Je rauer die Oberfläche der Gesteinskörnungen ist, desto stärker ist die Verzahnung zwischen Gesteinskörnung und zementierten Bereichen. Dies führt zu einer Erhöhung der Spaltzugfestigkeit (MALÁRICS, 2010). Die Einflüsse wurden mit der Verwendung von unterschiedlichen Probenmaterialien in ihren Auswirkungen abgegrenzt und interpretiert.

### 3) Versuchsmethodik

Im Versuchsablauf wurden die Probekörper einer Versuchsreihe mit unterschiedlichen Richtungen ihrer Schichtung in die Versuchseinrichtung eingespannt, um Einflüsse von Anisotropien zu generieren. Außerdem wurde der Einfluss auf die Zugfestigkeit der Prüfkörper hinsichtlich ihrer Herstellung aus dem Bohrkern in Quer- oder Längsrichtung erfasst.

### Ergebnisse

Die Spannweite der Spaltzugfestigkeit war an den Proben der Rifffazies des Kehlheimer Kalkes am höchsten. Bedingt ist dies durch starke lithologische Abweichungen und den Inhomogenitäten innerhalb der Fazies. Die höchste Spaltzugfestigkeit wurde am Treuchtlinger Marmor mit über 15 N/mm<sup>2</sup> ermittelt. In Abb. 7 wird die Ausbildung der Scherkeile sichtbar, die sich bei relativ guter Gefügehomogenität linear ausbilden.

Wie auch im Triaxialversuch entstehen die höchsten Bruchkräfte bei großer Verformungsgeschwindigkeit, homogenen Gefügeeigenschaften und bei Krafrichtung senkrecht zur Schichtung (MÜLLER, 2009).

Allgemein besteht eine starke Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Kluffinventar, von Störungszonen und Anisotropien sowie der vorherrschenden Schichtung.

Diese starken Schwankungen der Zugfestigkeit sind auch im Reservoir unter den entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen zu erwarten.

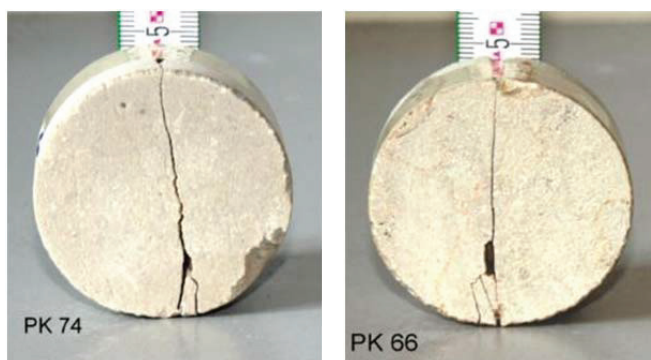


Abb. 7: Gering ausgeprägte Scherkeile an homogenen Probekörpern mit mikritischem Gefüge der PK 74 (B. 2-5) sowie PK 66 (B. 2-4)

Fig. 7: Weakly developed wedges of homogeneous test specimens with micritic structure PK 74 (B. 2-5) and PK 66 (B. 2-4)

Eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zeigt Abbildung 8 und 9.

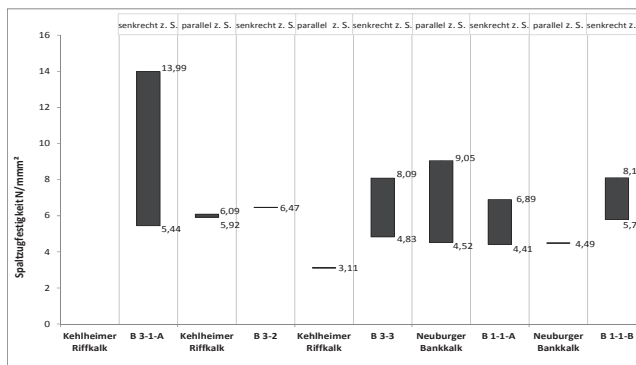


Abb. 8: Zusammengefasste Werte der Spaltzugfestigkeit der Kehlheimer und Neuburger Bankkalk (z. S.: zur Schichtung)

Fig. 8: Overview of Brazilian test results of the Kehlheimer and Neuburger Bankkalk (z. S.: to the stratification)

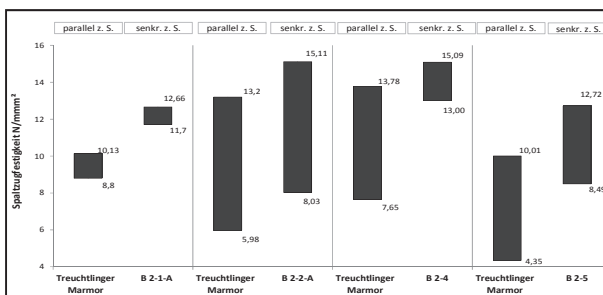


Abb. 9: Zusammengefasste Werte der Spaltzugfestigkeit des Treuchtlinger Marmors (z. S.: zur Schichtung)

Fig. 9: Overview of Brazilian test results of the Treuchtlinger Marmor (z. S.: to the stratification)

### 3.3 Bestimmung der Porosität

Zur Bestimmung der Porosität des Purbeck (Neuburger Bankkalkes), der Rifffazies (Riffkalk bei Kehlheim) und des Treuchtlinger Marmor (Steinbruch Petersbuch) kamen drei unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Diese Methoden sind die Wägung von trockener und gesättigter Probe, Helium-Pyknometrie und Quecksilberporosimetrie. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

#### 3.3.1 Wägung

Bei der Wägung werden die Proben in einem Vakuumschrank über Nacht bei 60 °C getrocknet und anschließend wird das Trockengewicht  $m_T$  bestimmt. Danach werden die Proben im Exsikkator unter Vakuum gesetzt und durch ein anschließendes Einströmen von Wasser gesättigt. Die voll gesättigte Probe wird im Anschluss gewogen und das Nassgewicht  $m_N$  wird bestimmt. Aus der Differenz zwischen Nass- und Trockengewicht lässt sich die Fluidmasse  $m_f = m_N - m_T$  im Porenraum bestimmen. Mit Hilfe der Fluidichte und der Fluidmasse wird das Fluidvolumen  $V_f = m_f / \rho_f$  bestimmt. Diese Fluidvolumen bezogen auf das Probevolumen ergibt die Porosität  $\phi = V_f / V$ . Insgesamt wurden 5 Purbeck, 12 Riffkalk und 16 Treuchtlinger Marmor Proben mit dieser Methode untersucht (BLÖCHER et al. 2009).



### 3.3.2 Pyknometrie

Die einfachste Art des Gaspyknometers besteht aus zwei Kammern, eine (mit einem abnehmbaren gasdichten Deckel) beinhaltet die Probe und eine zweite Kammer mit bekannten Innenvolumen. Die Vorrichtung umfasst zusätzlich ein Ventil, welches Gas unter Druck in eine der Kammern zuströmen lassen kann. Des Weiteren ist ein Drucksensor mit der ersten Kammer verbunden. Beide Kammern sind hydraulisch verbunden, können aber durch ein Ventil getrennt werden. Die zweite Kammer besitzt eine verschließbare Lüftungsöffnung. Das Pyknometer ist so konstruiert, dass entweder die Probenkammer oder die Referenzkammer mit dem höheren Druck beginnen kann. Die Arbeitsgleichung für das Gaspyknometer, wobei die Probenkammer zuerst unter Druck gesetzt wird, ist wie folgt:

$$V_S = V_R + V_C / (1 - (P_1/P_2)) \quad \text{eq. (6)}$$

wobei  $V_S$  das Probenvolumen,  $V_C$  das Volumen des leeren Probenkammer und  $V_R$  das Referenzvolumen ist.  $P_1$  ist der höhere Druck (in der Regel in der Probenkammer) und  $P_2$  der Druck nach der Expansion des Gases (LOWELL et al., 2004). Insgesamt wurden 2 Purbeck, 2 Riffkalk und 2 Treuchtlinger Marmor Proben mit dieser Methode untersucht.

### 3.3.3 Quecksilberporosimetrie

Die Quecksilberporosimeter besteht aus zwei aufeinander abgestimmten Einheiten: die Macropore Unit 120 und der Porosimeter 200. Die Macropore Unit 120 Series bestimmt Porenradien und Porengrößenverteilung im Bereich von 1,8 bis 600  $\mu\text{m}$  Radius. Die Probe befindet sich in einem Dilatometer und wird vor der Quecksilberpenetration unter Vakuum gesetzt. Die Einheit kann mit einem Druck von bis zu 3 bar beaufschlagt werden um das Quecksilber in die Probe zu pressen. Das Volumen des verpressten Quecksilbers entspricht dem Porenvolumen. Hierbei stehen die Porenradien im Verhältnis zum Druck bei dem das Quecksilber eingepresst wird. Das Porosimeter 200 ist ein automatisiertes Instrument zur Bestimmung der Porenradien und der Porengrößenverteilung in einem Bereich von 0,0037 und 7,5  $\mu\text{m}$ . Das Porenvolumen wird in einem Druckbereich von 1 bis 200 bar gemessen. Die erzielten Ergebnisse sind kumulative Porengrößenverteilung, Spektrum der Porosität, Hysteresekurve, spezifische Oberfläche, Schüttdichte, Gesamtporosität und Partikelgrößenverteilung. Proben mit einem kumulativen Porenvolumen von ca. 2000  $\text{mm}^3$  können untersucht werden. Insgesamt wurden 2 Purbeck, 3 Riffkalk und 4 Treuchtlinger Marmor Proben mit dieser Methode untersucht.

### 3.3.4 Ergebnisse

Die Einzelmessungen des Purbeck zeigen Porositäten im Bereich von 0,1 bis 0,33. Im Vergleich der drei Messmethoden kann davon ausgegangen werden, dass eine durchschnittliche Porosität von 0,18 bis 0,22 zu erwarten ist, obwohl die Quecksilberporosimetrie geringere Werte vermuten lässt. Für die Riffkalk lagen die Einzelmessungen in einem Bereich von 0,02 und 0,11. Auch hier kann ein Erwartungswert von 0,04 bis 0,07 aus dem Vergleich der drei Messmethoden bestimmt werden. Dennoch sind Ausreißer

nach oben und unten möglich. Für den Treuchtlinger Marmor lagen die Einzelmessungen der Porosität im Bereich zwischen 0,02 und 0,09. Auch hier kann der Vergleich der drei Messmethoden den Bereich auf 0,03 bis 0,05 einschränken. Ausreißer nach oben bzw. unten sind hier eher selten.

Tab. 2: Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Porositäten der drei Faziesbereiche durch verschiedene Methoden.

Tab. 2: Average and standard deviation of measured porosity from 3 different facies determined with different methods

Fazies	Porosität [Mittelwert $\pm$ Standardabweichung] (Anzahl Proben)		
	Wägung	Pyknometrie	Quecksilber Porosimetrie
Purbeck	0,181 $\pm$ 0,061 (5 Proben)	0,219 $\pm$ 0,106 (2 Proben)	0,069 $\pm$ 0,030 (2 Proben)
Riffkalk	0,053 $\pm$ 0,027 (12 Proben)	0,065 $\pm$ 0,037 (2 Proben)	0,044 $\pm$ 0,035 (3 Proben)
Treuchtlinger Marmor	0,054 $\pm$ 0,013 (16 Proben)	0,039 $\pm$ 0,010 (2 Proben)	0,026 $\pm$ 0,014 (4 Proben)

### 3.4 Bestimmung der Permeabilität

Für das Purbeck und den Treuchtlinger Marmor wurde die Permeabilität der Gesteinsmatrix und induzierter Risse unter simulierten in situ Bedingungen untersucht. Die Probenkörper haben zylindrische Form, mit einer Länge von 100 mm und einem Durchmesser von 50 mm. Um in situ Bedingungen zu simulieren, wurde mit Hilfe eines Hydrauliköls hydrostatischer Druck (Umschließungsdruck) aufgebaut, welcher auf die Probe wirkt. Gleichzeitig wurde die Probe durchströmt und aus der Fließrate und dem sich einstellenden Druckgradienten über die Probe die Permeabilität bestimmt.

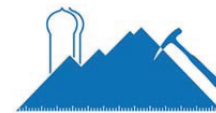
#### 3.4.1 Messapparatur

Die mechanische Prüfung wurde in einem Druckbehälter mit einem Grenzdruck von 140 MPa durchgeführt. Ein weiterer Druckstempel kann maximale axiale Belastung von 4600 kN erzeugen. Zum Messen der axialen und lateralen Deformation der Kalksteinproben wurden zwei axiale Extensometer und ein Kettenextensometer installiert (MTS, 2004). Das angeschlossene Hydrauliksystem QuizixC-6000-10 K ermöglicht ein Durchströmen der Probe mit einer maximalen Flussrate von 200 ml mit einem maximalen Porendruck von 69 MPa (BLÖCHER et al. 2009).

#### 3.4.2 Durchführung

Zur Bestimmung der Matrixpermeabilität des Purbeck wurden Umschließungsdrücke von 5, 10 und 15 MPa realisiert, wobei die Durchflussrate zwischen 0,05, 0,1, 0,25, 0,5 und 1,0 ml/min variiert wurden. Für den Treuchtlinger Marmor wurden Umschließungsdrücke von 5 und 10 MPa realisiert, wobei die Durchflussrate bei 0,001 ml/min lag.

Zur Bestimmung der Risspermeabilität wurden die Proben längs der Achse gesägt (Purbeck) bzw. gebrochen (Treuchtlinger Marmor). Anschließend wurde die hydraulische



Durchlässigkeit dieser Risse in Abhängigkeit vom Umschließungsdruck bestimmt. Für das Purbeck wurde der Umschließungsdruck zwischen 2 und 40 MPa variiert, wobei die Durchflussrate bei 0,25 ml/min lag. Für den Treuchtlinger Marmor wurde der Umschließungsdruck zwischen 2 und 40 MPa variiert, wobei die Durchflussrate zwischen 5 und 10 ml/min lag.

### 3.4.3 Ergebnisse

Bei geringem Umschließungsdruck (5 MPa) und einer Fließrate von 0,05 ml/min konnte eine Matrixpermeabilität von 1,8 mD für das Purbeck bestimmt werden. Eine Erhöhung des Umschließungsdruckes auf 15 MPa, bei gleichbleibender Fließrate von 0,5 ml/min, führte zu einer Reduktion der Permeabilität auf 1,1 mD. Eine Erhöhung der Fließrate von 0,05 auf 1 ml/min, führte zu einer Erhöhung der Permeabilität von 0,7 mD auf 1,3 mD (bei 15 MPa Umschließungsdruck) bzw. von 1,0 mD auf 1,4 mD (bei 10 MPa Umschließungsdruck). Die Matrixpermeabilität des Treuchtlinger Marmors wurde mit ca. 1  $\mu$ D bestimmt. Dieser Wert war nahezu konstant für die gemessenen Umschließungsdrücke und Fließraten.

Zur Bestimmung der Risspermeabilität des Purbeck wurde eine Zylinderprobe entlang ihrer Längsachse gesägt und die beiden Hälften anschließend zusammengesetzt und die Permeabilität parallel zum Riss bestimmt. Dazu wurden 4 Umschließungsdruckzyklen zwischen 2 und 40 MPa angelegt. Beim ersten Zyklus zeigte sich eine Permeabilität von 3 mD (Umschließungsdruck bei 2 MPa). Durch Erhöhung des Umschließungsdruckes auf 40 MPa verringerte sich die gemessene Risspermeabilität auf 1,2 mD. Während der nachfolgenden drei Umschließungsdruckzyklen bewegte sich die Permeabilität in einem Bereich von 0,5 und 1 mD, welches der Matrixpermeabilität entspricht. Daraus kann geschlossen werden, dass der Riss am Ende des Experimentes hydraulisch unwirksam war.

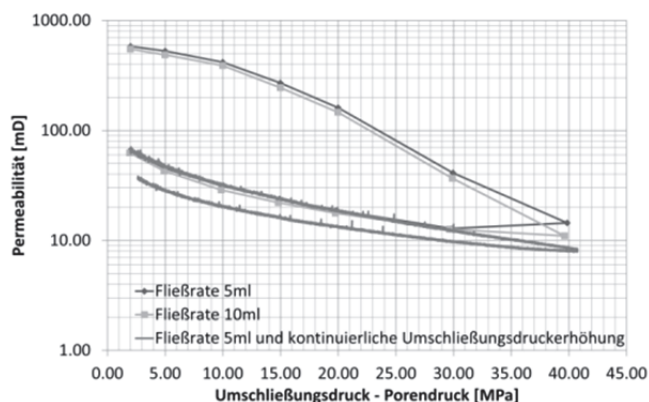


Abb. 10.: Risspermeabilität in Abhängigkeit vom Umschließungsdruck für den Treuchtlinger Marmor

Fig. 10.: Fracture conductivity depending on confining pressure of Treuchtlinger Marmor

Beim Treuchtlinger Marmor wurde die Permeabilität eines induzierten Risses (Brazilian Tensile Test) untersucht. Dabei wurden drei Umschließungsdruckzyklen zwischen 2 und 40 MPa realisiert. Die Fließrate lag bei 5 und 10 ml (Abb. 10). Zu Beginn konnte eine Risspermeabilität von 550 mD bei einem Umschließungsdruck von 2 MPa be-

stimmt werden. Durch Erhöhung des Umschließungsdruckes auf 40 MPa verringerte sich die Permeabilität auf 10 mD. Auch nach mehrfacher Belastung der Probe blieb die Risspermeabilität im Bereich zwischen 10 mD (40 MPa Umschließungsdruck) und 60 mD (2 MPa Umschließungsdruck). Dies bedeutet, dass der Riss permanent hydraulisch aktiv ist und die Matrixpermeabilität (~1  $\mu$ D) um Größenordnungen gesteigert werden kann.

## 4 Zusammenfassung und Rückschlüsse für die in situ-Untersuchungen

Mit den vorliegenden gesteinsmechanischen Analysen und den Untersuchungen zur Porosität und Permeabilität wurden Gesteinskennwerte der Analoggesteine ermittelt, welche Prognosen für einen geeigneten Reservoirkomplex in Mauerstetten ermöglichen sollen.

Die untersuchten Varietäten unterscheiden sich in ihren mechanischen Eigenschaften erheblich, so dass davon ausgegangen werden muss, dass auch in situ das Gesteinsverhalten in der Tiefe und den damit verbundenen Bruchstrukturen sich sehr wechselhaft gestalten wird. Dennoch bieten die Untersuchungen wichtige Rückschlüsse zum Bruchverhalten, insbesondere bei der Abgrenzung der faziellen Komplexe.

Die gesteinsmechanischen Untersuchungen zeigten, dass die für eine geothermische Stimulation zur Verfügung stehenden Fazieskomplexe in den mechanischen Kennwerten deutlich voneinander abweichen. Dem in der Gefügestruktur sehr inhomogenen Komplex des Kehlheimer Kalkes (Rifffazies) steht mit den Neuburger Bankkalken (Purbeckfazies) verhältnismäßig homogenes, mikritisches Karbonatgestein gegenüber.

Am Treuchtlinger Marmor (Tubiphyten-Kalke) wurden in der einaxialen und triaxialen Druckfestigkeit, aber auch bei der Spaltzugfestigkeit Maximalwerte ermittelt. Insgesamt weist dieser Komplex erhebliches Schwankungspotential der Gesteinskennwerte auf. Dies ist auf die inhomogenen Gesteinseigenschaften (Klüfte, Ablagerungen, Störungszonen, Porosität, Mineralassoziationen usw.) der jeweiligen Bohrlochlokalität zurückzuführen.

Die damit verbundenen strukturellen Gefügeanisotropien im gesamten Kluftsystem müssen in ihrem Einflusspektrum mit Blick auf das hydraulische Stimulieren gegeneinander abgewogen werden, um die Erfolgsprognose des Geothermieprojektes realistisch abschätzen zu können.

Inhomogenitäten der Gefügeeigenschaften führen weiterhin zu Spannungumlagerungen und beeinflussen das Gesteinsbruchverhalten.

Die Laboranalysen haben gezeigt, dass ausgeprägte Inhomogenitäten auch die Fazies des Kehlheimer Kalkes prägen. Hervorgerufen durch starke lithologische Variationen sind hier große Schwankungen der mechanischen Kennwerte, insbesondere in der einaxialen Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit, aber auch in der Form der Brüche festzustellen. Eine entsprechend heterogene Bruchausbreitung ist bei einer möglichen Stimulation der Riffkalke in 3.500 m Tiefe zu erwarten.



Weiterhin ist mit dem in großer Tiefe vorherrschenden Überlagerungsdruck davon auszugehen, dass die im Analoggestein angetroffene Porosität in Form von z. T. offenen Klüften besonders in der Rifffazies erheblich abweicht.

Neben der Porosität verändern sich mit zunehmender Tiefe, wie erwähnt, aber auch die bruchmechanischen Eigenschaften (GUDMUNDSSON et al., 2010). Störungszonen nehmen bei der Beurteilung der Reservoirpermeabilität eine besondere Rolle ein, da diese je nach ihrer Orientierung in Bezug auf das aktuelle Spannungsfeld und ihren internen Aufbau entweder Barrieren für den Fluidtransport darstellen können oder Fluide bevorzugt transportieren (PHILIPP, 2007).

Aus den bisherigen gesteinsmechanischen Untersuchungen zeichnet sich ab, dass die petrografische Beschaffenheit der Purbeck-Fazies bevorzugt homogene Gesteinseigenschaften erwarten lassen. Die an den Probekörpern des Analoggesteins durchgeführten Laboranalysen zeigten für die Fazies Neuburger Bankkalke insbesondere bei der ermittelten Zugfestigkeit die geringsten Spannweiten.

Die hydraulischen Eigenschaften der Matrix zeigen ihr Maximum bei den Proben des Purbeck ( $\phi \approx 0,2$  und  $k \approx 1$  mD) und ihr Minimum bei Proben des Treuchtlinger Marmor ( $\phi \approx 0,05$  und  $k \approx 1$   $\mu$ D). Dennoch können diese Matrixeigenschaften nicht maßgeblich für den Fluidtransport im Reservoir verantwortlich sein. Der Fluidtransport muss hier über zusätzliche Bahnen wie z. B. Risse oder Störungszonen erfolgen (AGOSTA et al., 2007). Dabei haben sich Scherrisse gegenüber Zugrissen als nachhaltigere Fließbahnen erwiesen. Scherrisse bleiben durch den „Self-Propping“ Effekt auch unter in situ Bedingungen hydraulisch wirksam (CHIPPERFIELD et al., 2007) und steigern die Gesamtpermeabilität gegenüber der Matrixpermeabilität um Größenordnungen.

Inwiefern sich die erzielten Untersuchungsergebnisse auf das potentielle geothermische Reservoir überführen lassen, muss anhand weiterführender Laboranalysen, u. a. an Probenmaterial aus Seitenbohrkernen, validiert werden.

## Literatur

- AGOSTA, F., PRASAD, M., AYDIN, A.: (2007). Physical properties of carbonate fault rocks, fucino basin (Central Italy): implications for fault seal in platform carbonates. *Geofluids*, 7, 19-32.
- ANDERSON, E.M. (1951) *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain*. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2012). *Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung*, 93 p., München, Germany.
- BLÖCHER, G., ZIMMERMANN, G., MILSCH, H. (2009): Impact of poroelastic response of sandstones on geothermal power production. - *Pure and Applied Geophysics*, 166, 5-7, 1089-1106
- CHIPPERFIELD, S.T., WONG, J.R., WARNER, D.S., SANTOS, L., CIPOLLA, C.L., MAYERHOFER, M.J., LOLON, E.P., WARPINSKI, N.R. (2007): Shear dilation diagnostics: A new approach for evaluating tight gas stimulation treatments. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, 29-31 Jan 2007, College Station, Texas USA.
- DGEG - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. (1987): *Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF StB Teil C 12: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen*, Essen, Ausgabe 1987
- GUDMUNDSSON A., SIMMENS, T. H., LARSEN, B. & PHILIPP, S.L. (2010): Effects of internal structures and local stresses on fracture propagation, deflection and arrest in fault zones, *Journal of Structural Geology*, 2010
- LOWELL, S., SHIELDS, J.E., THOMAS, M.A., THOMMES, M., (2004): *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Springer, Netherlands.
- MALÁRICS, V. (2010): *Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben* Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2010
- MECHTCHERINE, V. (2000): *Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rissausbreitung in Beton*, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2000
- MOECK, I. (2012): *Spannungsfeldanalyse für das Geothermieprojekt Mauerstetten (Bayerisches Molassebecken)*. Der Geothermie Kongress 2012, Karlsruhe, 13.-16. November 2012
- MÜLLER, C. (2009): *Charakterisierung des hydromechanischen Verhaltens der Gesteine des Mittleren Buntsandsteins im Hinblick auf eine geothermische Nutzung: Strukturgeologische Geländeaufnahmen, gesteinsmechanische Untersuchungen und numerische Modellierungen*, Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, 2009
- PHILIPP, S. L. (2007): *Bedeutung von Störungszonen und Bruchsystemen für die Permeabilität: Vergleich natürlicher Paläoreservoirs mit stimulierten geothermischen Reservoiren*, Tagungsband Geothermiekongress Bochum, 2007
- PRINZ, H. (1997): *Abriss der Ingenieurgeologie*, 3. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart, 1997
- REINECKER, J., TINGAY, M., MÜLLER, B., HEIDBACH, O., (2010): Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics*, 482, 129-138.