



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Institut für Geotechnik



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

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

Detlev Tondera⁽¹⁾, Herbert Klapperich⁽¹⁾, Guido Blöcher⁽²⁾, Inga Moeck⁽³⁾,
Torsten Steiger⁽⁴⁾, Curd Bems⁽⁵⁾, Stephan Hild⁽⁵⁾

- ⁽¹⁾Institut für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland
- ⁽²⁾ Helmholtz Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland
- ⁽³⁾Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada
- ⁽⁴⁾ Geotec Consult Uhlig und Partner, Markt Schwaben, Deutschland
- ⁽⁵⁾ EXORKA GmbH, Grünwald, Deutschland



Geothermie Allgäu 2.0

Gliederung

1. Motivation Forschungsansatz

2. Probenahme des Analogmaterials

3. Laboruntersuchungen am Analogmaterial

- Einaxiale Druckfestigkeit
- Triaxialversuche
- Untersuchungen zur Spaltzugfestigkeit -Brazilian-Test-
- Permeabilität und Porosität

4. Weiterhin geplante Untersuchungen am Analogmaterial

- Triaxialversuche am Kelheimer Kalk sowie unter thermischen Bedingungen
- CT/MRT-Untersuchung zur Rissausbreitung im Analoggestein vor und nach Säuerung

5. Zusammenfassung und Ausblick

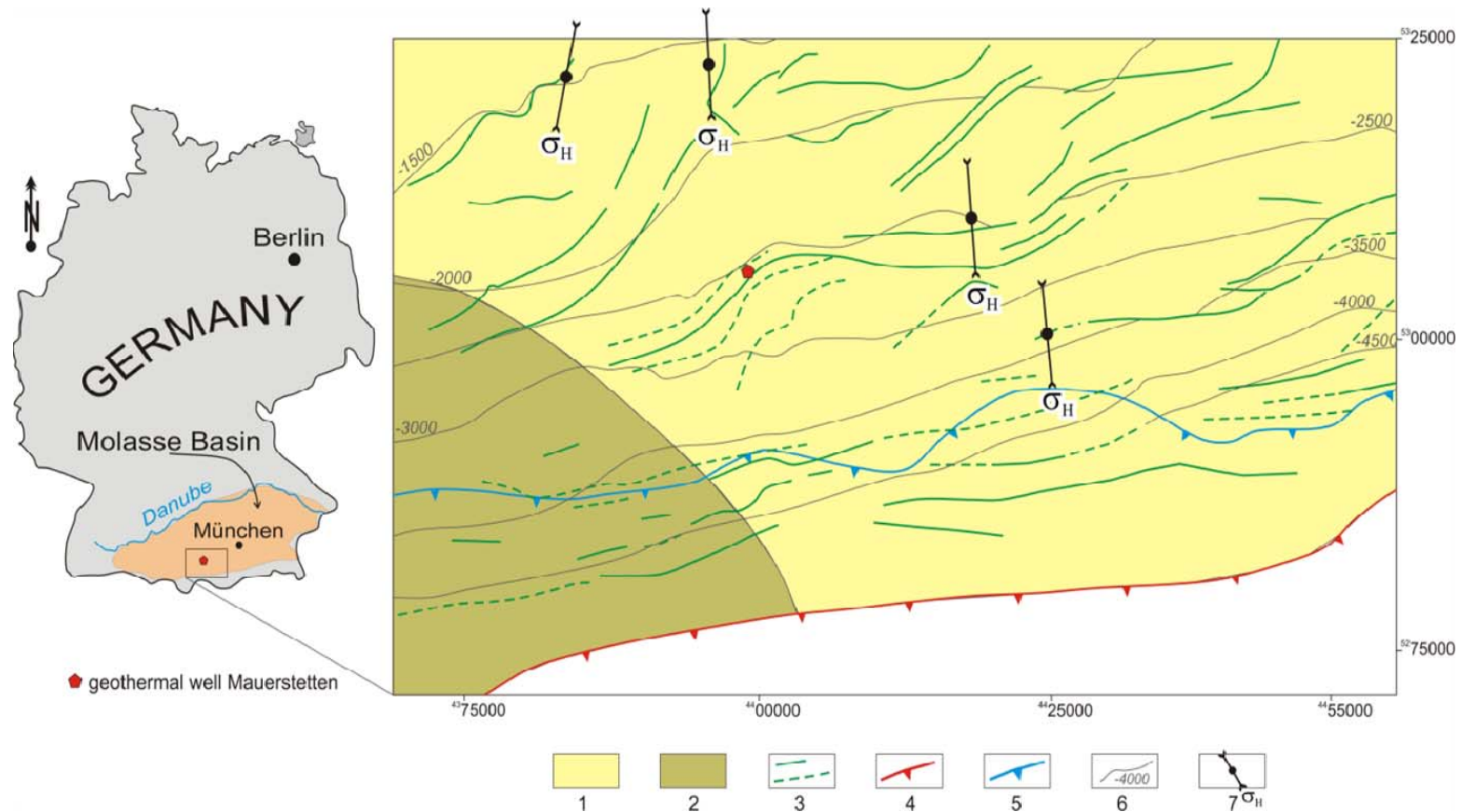
Geothermie Allgäu 2.0

1. Motivation Forschungsansatz

- Erhöhung der Akzeptanz der Tiefengeothermie durch die Energiewende
- Nutzung der Erfahrungen aus bereits erfolgreich realisierten Projekten auf dem Wärmemarkt, aber auch zur Stromerzeugung in Deutschland und speziell im Großraum München.
- Das BMU - Forschungsprojekt greift das Konzept der Enhanced Geothermal Systems (EGS) zur Nutzung des Potenzials der Malmschichten auf.
- Grundlage bildet ein künstlich geschaffener Wärmetauscher im relativ undurchlässigen Gestein unter Nutzung einer vorhandenen Tiefbohrung.
- Durchführung von verschiedenen Analysen an Gesteinsproben aus Analogaufschlüssen (die geologisch und geochemisch den Gesteinen des Reservoirs entsprechen) zur Bestimmung der Gesteinseigenschaften



Geothermie Allgäu 2.0

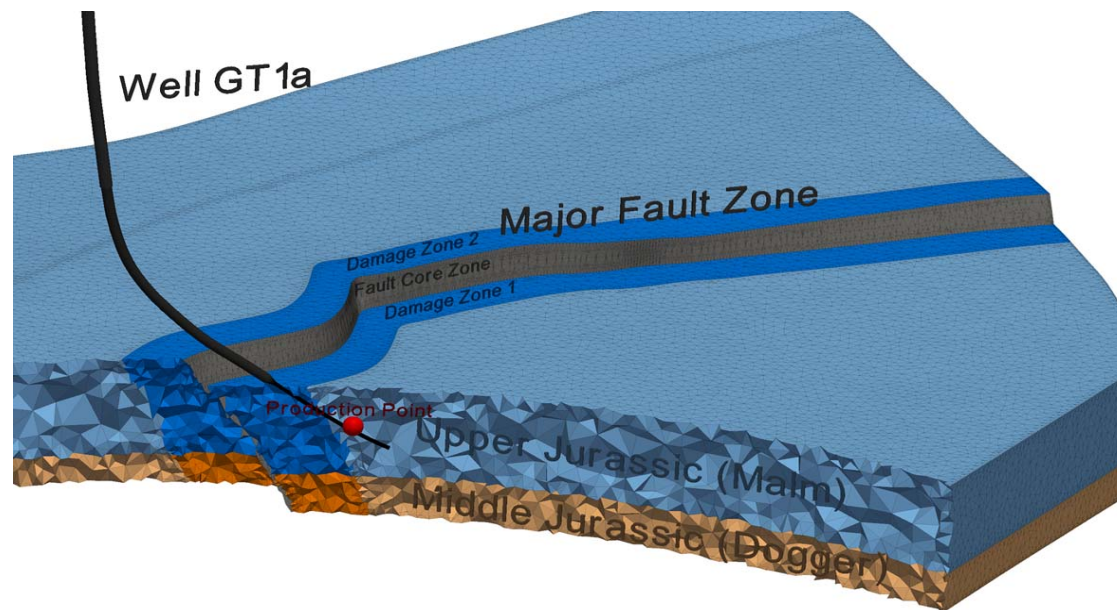


- Lokation der Geothermiebohrung Mauerstetten (roter Punkt) im Süddeutschen Molassebecken, Deutschland
- σ_H Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung (World Stress Map (in Kombination mit Energiegewinnung, 2010 und Reinecker et al., 2010)).

Geothermie Allgäu 2.0

1. Motivation Forschungsansatz

- Bohrung Mauerstetten GT1 mit GT1a wurde gezielt in eine ENE-WSW streichende nach Süd einfallende Störungszone abgeteuft
- Bohrlochentiefe des Sidetracks beträgt 3763 m TVD (Vertikalteufe ab Rasensohle) dabei sind die letzten 332 m der Bohrung unverrohrt.
- die erhofften Schüttungsraten von 80 l/s wurden nicht erbracht



Das BMU-Forschungsprojekt soll klären, was die Permeabilitätsstruktur am Standort Mauerstetten kontrolliert und welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Speicherproduktivität zu erhöhen.

Geothermie Allgäu 2.0

2. Probenahme des Analogmaterials

- Neuburger Bankkalk als Analogmaterial zur Purbeck Formation bei Unterhausen
- Kieselschwammrifffazies durch den Treuchtlinger Marmor bei Petersbuch
- Rifffazies durch die Kehlheimer Bankkalke bei Kehlheim
- Ca. 100 m Kernmaterial wurden beschriftet und in Kernmärschen zu je 1,00 m abgelegt und an der TU Bergakademie Freiberg eingelagert.
- An den Kernproben wurden später für Laboruntersuchungen Probekörper in unterschiedlichen Richtungen (längs und quer zur Bohrachse (BA) entnommen .



Geothermie Allgäu 2.0

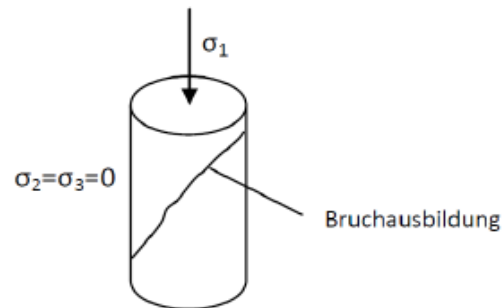
3. Aktueller Stand der Laboruntersuchungen am Analogmaterial

Einaxiale Druckfestigkeit

Ziel der Untersuchungen

Kenntnisse über maximale axiale Druckbelastung und somit über die Festigkeit der Faziestypen unter Laborbedingungen und Abschätzungen zum Verhalten des Gesteins unter Temperatur- und Druckbedingungen im Reservoir während der Arbeiten in situ

Prinzip Einaxiale Druckfestigkeit:



Prüfmaschine:

Universalprüfmaschine Alpha 2-5000

Prüfgeschwindigkeit:

$v_{\text{Verf}} = 10 \text{ MPa/min}$

Geothermie Allgäu 2.0

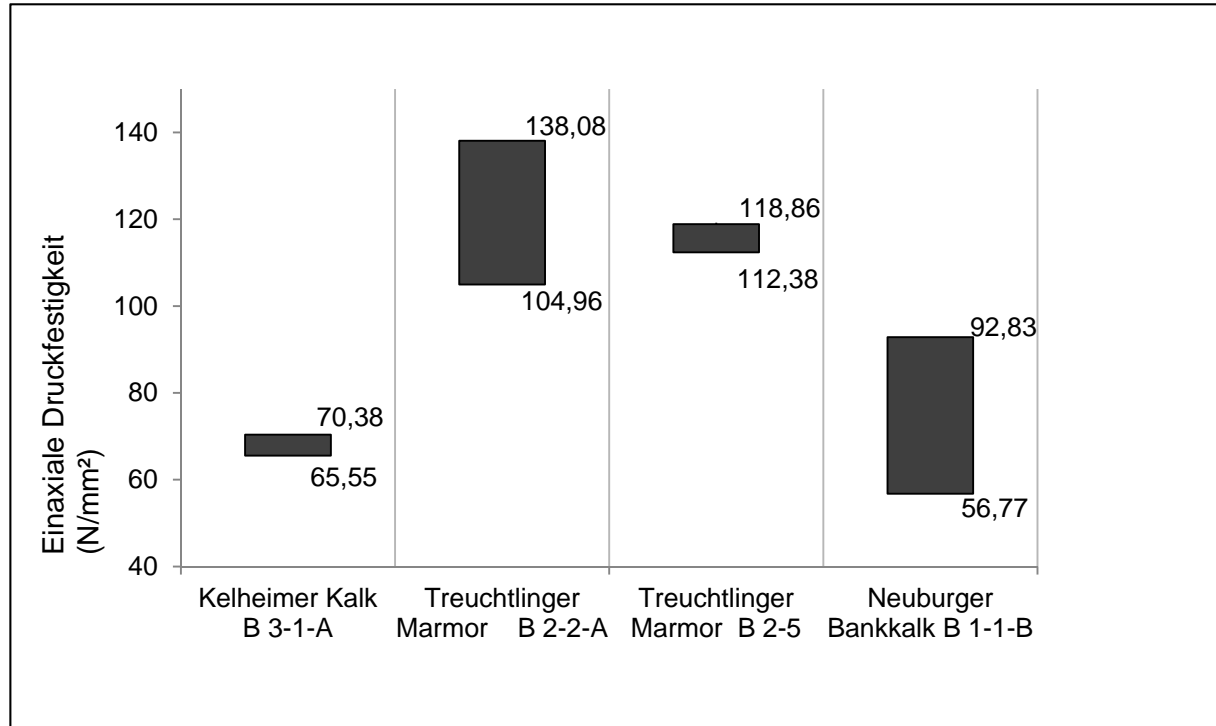
Bruchformen nach einaxialem Druckversuch
Beispiel Kelheimer Kalk B 3-1-A



- Ausbildung von Spaltbrüchen in Hauptspannungsrichtung mit Konturentfestigung
- Keine signifikanten Bruchhälften

Geothermie Allgäu 2.0

Zusammenfassung Einaxiale Druckfestigkeit



- Bruchversagen i. a. als Mischform von Spalt- und Scherbrüchen (Treuchtlinger Marmor, Kelheimer Kalk) bzw. mit Komplettversagen der PK und Entfestigung der Gefügematrix (Neuburger Bankkalk)
- Maximalwerte Druckfestigkeit: Treuchtlinger Marmor (138 N/mm²)
- Abhängigkeit E-Modul von Belastungsrichtung in Bezug auf Schichtung und Anisotropien

Geothermie Allgäu 2.0

Triaxialversuche

Ziel der Untersuchungen:

Aussagen zum Bruchverhalten und den Bedingungen des Trennbruchversagens, zu den Brucharten sowie zu den Scherfestigkeitsparametern der unterschiedlichen Gesteinsvarietäten unter Berücksichtigung von Anisotropien, Gefügematrix, Klüften, Druckverhältnissen...

Damit:

Folgebewertung, Abgrenzung der einzelnen Lithologien und Rückschlüsse auf zu erwartendes in situ-Gebirgsverhalten (Bruchflächenausdehnung, Rissbildung, Scherversatz) bei **hydraulischer Stimulation**, Abschätzung der Injektionsdrücke – **Erfolgsprognose**

Prüfmaschine: MTS 815 (servohydraulisch)

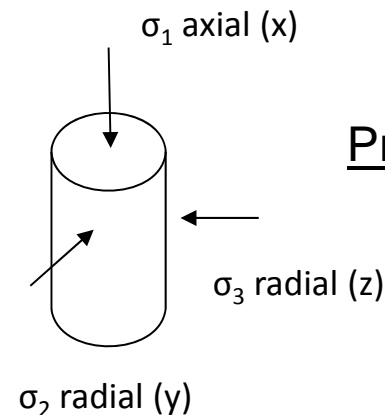
Lastregime im Mehrstufen-Triaxialversuch:

Manteldruckstufe 1 $\sigma_{3,1} = 10.00$ [MPa]

Manteldruckstufe 2 $\sigma_{3,2} = 20.00$ [MPa]

Manteldruckstufe 3 $\sigma_{3,3} = 30.00$ [MPa]

Manteldruckstufe 4 $\sigma_{3,4} = 40.00$ [MPa]



Prinzip Triaxialversuch

Geothermie Allgäu 2.0

Ergebnisse Neuburger Bankkalk

Probekörper (PK)	Bemerkung	Richtung PK	Versuchsart	Reibungswinkel φ (°)	Kohäsion c (MPa)	Manteldruckstufe σ_3 (N/mm ²)	Axialspannung σ_1 (N/mm ²)	Deviatorspannung $\Delta\sigma_v = \sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm ²)	Verformungsmodul $E_{v,40-60}$ (N/mm ²)	Querdehnungszahl ν_{40-60} (-)
PK 1	Neuburger Bankkalk	längs zur BA	Kompression	24	50	10	178,33	168,33	42489	0,40
1-1-A						20	205,81	185,81	43149	0,41
						30	228,10	198,10	42655	0,43
						40	250,70	210,70	41867	0,44

Probekörper (PK)	Bemerkung	Richtung PK	Versuchsart	Reibungswinkel φ (°)	Kohäsion c (MPa)	Manteldruckstufe σ_3 (N/mm ²)	Axialspannung σ_1 (N/mm ²)	Deviatorspannung $\Delta\sigma_v = \sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm ²)	Verformungsmodul $E_{v,40-60}$ (N/mm ²)	Querdehnungszahl ν_{40-60} (-)
PK 3	Neuburger Bankkalk	quer zur BA	Kompression	26	45	10	170,11	160,11	35722	0,38
1-1-A						20	195,52	175,52	35048	0,45
						30	198,17	168,17	34522	0,45
						40	172,41	132,41	31054	-

Probekörper (PK)	Bemerkung	Richtung PK	Versuchsart	Reibungswinkel φ (°)	Kohäsion c (MPa)	Manteldruckstufe σ_3 (N/mm ²)	Axialspannung σ_1 (N/mm ²)	Deviatorspannung $\Delta\sigma_v = \sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm ²)	Verformungsmodul $E_{v,40-60}$ (N/mm ²)	Querdehnungszahl ν_{40-60} (-)
PK 8	Neuburger Bankkalk	längs zur BA	Kompression	22	34	10	121,56	111,56	27761	0,36
1-1-B						20	149,42	129,42	27765	0,40
						30	169,16	139,16	25665	0,41
						40	188,96	148,96	24150	0,41

ausgeprägte Haftkräfte im Innerpartikelbereich des Materials, damit hohe Kohäsionsbeteiligung an Scherfestigkeit

Geothermie Allgäu 2.0

Ergebnisse Treuchtlinger Marmor:

Probekörper (PK)	Bemerkung	Richtung PK	Versuchsart	Reibungswinkel φ (°)	Kohäsion c (MPa)	Manteldruckstufe σ_3 (N/mm ²)	Axialspannung σ_1 (N/mm ²)	Deviatorspannung $\Delta\sigma_u = \sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm ²)	Verformungsmodul $E_{v,40-60}$ (N/mm ²)	Querdehnungszahl ν_{40-60} (-)
PK 24	Treuchtl. Marmor	längs zur BA	Kompression	41	24	10	146,47	136,47	55390	0,33
2-4						20	220,99	200,99	56863	0,40
						30	261,89	231,89	53419	0,43
						40	294,93	254,93	52547	0,45

Geschwindigkeit: 0,05 mm/min

Probekörper (PK)	Bemerkung	Richtung PK	Versuchsart	Reibungswinkel φ (°)	Kohäsion c (MPa)	Manteldruckstufe σ_3 (N/mm ²)	Axialspannung σ_1 (N/mm ²)	Deviatorspannung $\Delta\sigma_u = \sigma_1 - \sigma_3$ (N/mm ²)	Verformungsmodul $E_{v,40-60}$ (N/mm ²)	Querdehnungszahl ν_{40-60} (-)
PK 14	Treuchtl. Marmor	quer zur BA	Kompression	39	37	10	205,14	195,14	101906	-
2-2-A						20	258,89	238,89	101659	-
						30	295,04	265,04	104762	-
						40	319,99	279,99	104360	-

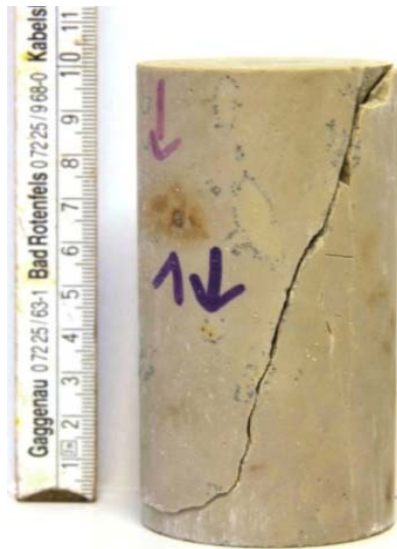
Geschwindigkeit: 0,15 mm/min

Belastungsgeschwindigkeit während Versuchsdurchführung beeinflusst entscheidend die Größenordnung der E-Moduli und der aufnehmbaren Bruch-Spannungen

Untersuchungen an Kelheimer Riffkalken stehen noch aus!

Geothermie Allgäu 2.0

Unterschiedliche Versagensmechanismen im Triaxialversuch – Bruchbilder (Neuburger Bankkalk)



PK 1:
Scherbruch



PK 3:
Spaltbrüche,
dominiert von
Makrobruch



PK 8:
Matrixentfestigung
beim Bruch
keine signifikanten
Bruchhälften

Scherbruchversagen bei höheren aufnehmbaren Bruchspannungen

Geothermie Allgäu 2.0

Zusammenfassung Triaxialversuche

- Maximalwerte der aufnehmbaren Bruchspannungen und Verformungsmoduli am Treuchtlinger Marmor
- Verformungsmoduli und Bruchspannungen nehmen bei höherer Belastungsgeschwindigkeit zu
- große Streuungen der Dehnungen und Materialkennwerte (E-Modul, Querdehnungszahl) auch **innerhalb** der jeweiligen Faziestypen
- Höchste Kohäsionen bisher am Neuburger Bankkalk ermittelt
- Rissausbildung bevorzugt entlang vorangelegter Klüfte; Bruchformen als Scher- oder Spaltbruch, häufig als Mischform aus beiden



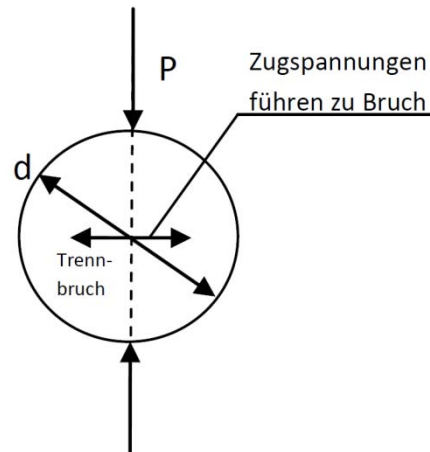
Geothermie Allgäu 2.0

Spaltzugversuche

Ziel der Untersuchungen

Kenntnisse über Zugfestigkeit und Kornbindungskräfte innerhalb der Gesteinsmatrix
– Abschätzungen zum Verhalten des Gesteins unter Temperatur- und Druckbedingungen sowie zur Rissbildung bei Stimulation

Prinzip Spaltzugversuch



Prüfmaschine:

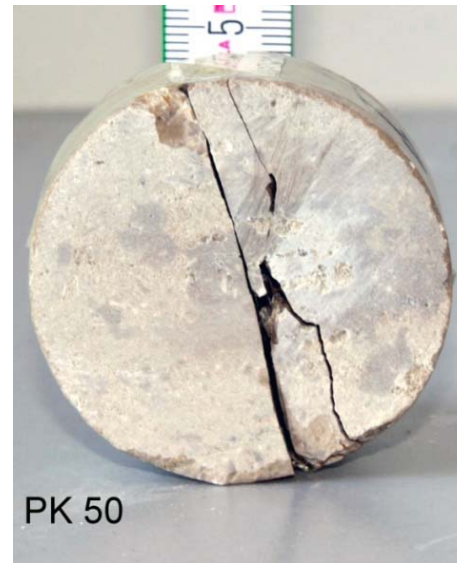
Hydraulische Prüfmaschine ZD 10

Prüfgeschwindigkeit :

zwischen $0,01 \text{ N/mm}^2\cdot\text{s}$ und $0,05 \text{ N/mm}^2\cdot\text{s}$

Geothermie Allgäu 2.0

Beispiel - Prüfkörper der Fazies Treuchtlinger Marmor

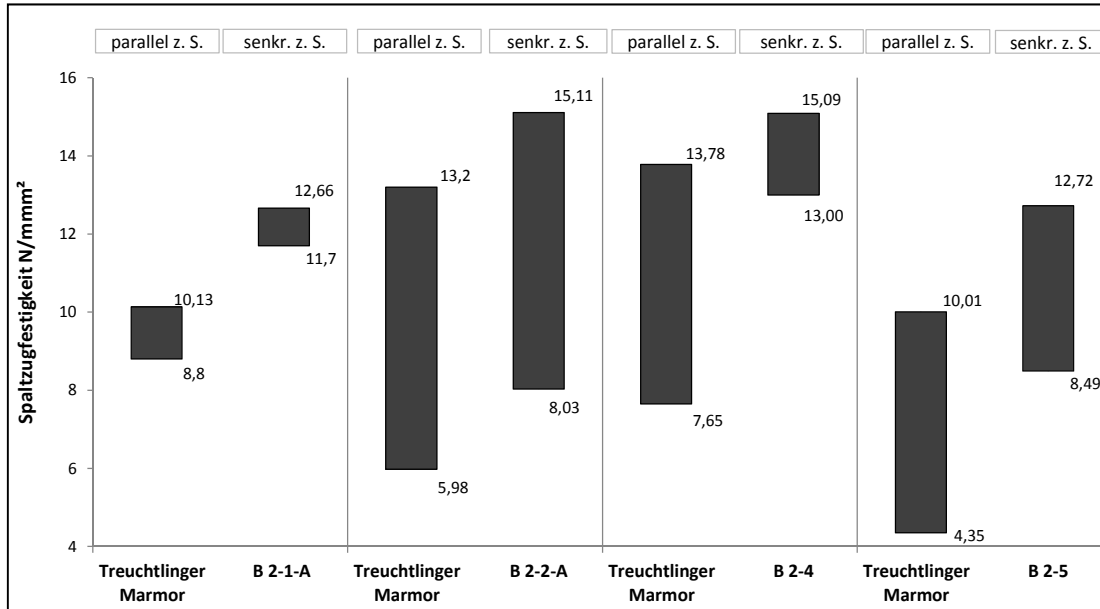


Bruchbilder im Spaltzugversuch:

- Rissbildung dominiert von Primärriss, meist begleitet von sekundären Begleittrissen als Scherkeile

Geothermie Allgäu 2.0

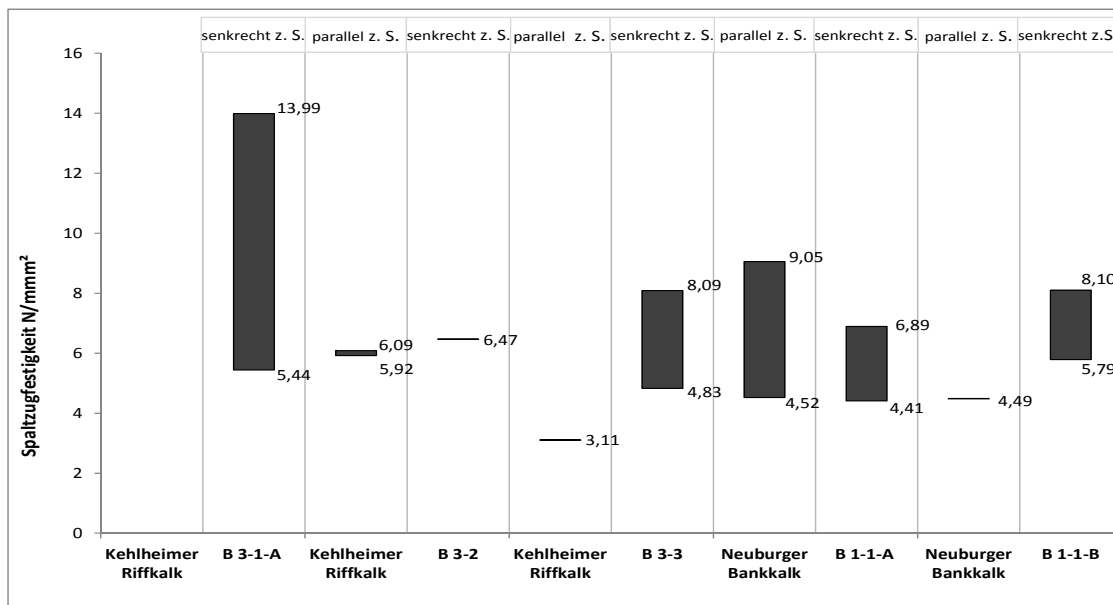
Spaltzugfestigkeiten der drei Faziestypen



Höchste Spannweiten der Spaltzugfestigkeit bei **Rifffazies, (Kelheimer Kalk)** – hervorgerufen Durch starke lithologische Abweichungen

Höchste Spaltzugfestigkeit:
Treuchtlinger Marmor (15 N/mm²)
dabei: höchste Bruchkräfte bei großer Verformungsgeschwindigkeit, homogenen Gefügeeigenschaften und bei Krafrichtung **senkrecht** zur Schichtung

Starke Abhängigkeit der Zugfestigkeit von Klüften, Störungszonen und Anisotropien, Schichtung



Insgesamt sehr starke Schwankungen in der Größenordnung auch im Reservoir zu erwarten

Geothermie Allgäu 2.0

Porosität

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)
Riffkalke	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)

- Einzelmessungen der **Purbeck**-Fazies 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 **Riffkalke** 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.
- 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.

Geothermie Allgäu 2.0

Permeabilität

Prüfapparatur: MTS, 2004 mit angeschlossenem Hydrauliksystem
QuizixC-6000-10 K

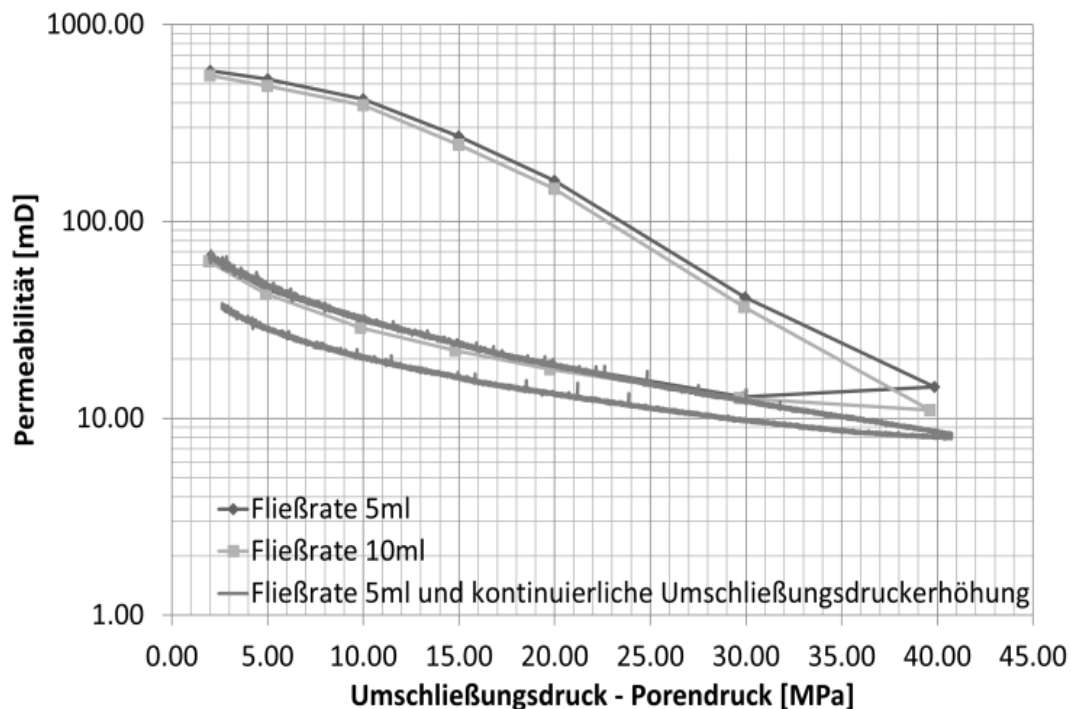
- Bei einem Umschließungsdruck (5 MPa) und einer Fließrate von 0,05 ml/min konnte eine Matrixpermeabilität von 1,8 mD für das **Purbeck** bestimmt werden.
- Eine Erhöhung des Umschließungsdruckes auf 15 MPa, bei gleichbleibender Fließrate von 0,5 ml/min, führte zu einer Reduktion der Permeabilität auf 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 μ D bestimmt. Dieser Wert war nahezu konstant für die gemessenen Umschließungsdrücke und Fließraten.



Geothermie Allgäu 2.0

Riss - Permeabilität

- 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.
- Zu Beginn konnte eine Risspermeabilität von 550 mD bei einem Umschließungsdruck von 2 MPa bestimmt 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 ($\sim 1 \mu\text{D}$) um Größenordnungen gesteigert werden kann.



Geothermie Allgäu 2.0

4. Weiterhin geplante Untersuchungen am Analogmaterial

- Triaxialversuche am Kelheimer Kalk sowie an allen 3 Faziestypen unter thermischen Bedingungen (bis 180°C)
Problem: Equipment (thermisch stabil) für Versuchsaufbau noch in der Testphase
- Versuche zur Untersuchung der Auswirkung einer Säurebeaufschlagung der Risse durch Mikroskopie sowie CT/MRT
- CT- und MRT-Untersuchungen zur Beschreibung der Rissausbreitung
Durchführung an Probekörpern aus Spaltzugversuchen der drei Faziesbereiche

jeweils 3 Testreihen:

CT/MRT am Referenz-Probekörper

CT/MRT am Probekörper nach Spaltzugversuch, vor Säuerung

CT/MRT am Probekörper nach Säuerung (unterschiedliche Regime)



Geothermie Allgäu 2.0

5. Zusammenfassung und Ausblick

- 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.
- 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.
- Dem in der Gefügestruktur sehr inhomogenen Komplex des Kehlheimer Kalkes (Rifffazies) steht mit den Neuburger Bankkalken (Purbeckfazies) verhältnismäßig homogenes, mikritisches Karbonatgestein gegenüber

Ausblick

In wie weit erzielte Untersuchungsergebnisse sich auf das potentielle geothermische Reservoir überführen lassen, muss anhand weiterführender Laboranalysen, insbesondere an Probenmaterial aus Seitenbohrkernen, validiert werden.



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



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

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

