

Geomechanische Charakterisierung von Vulkaniten und Sedimenten des Rotliegenden im Norddeutschen Becken für die Optimierung des Aufschlusses geothermischer Lagerstätten

Geomechanical testing of lower permian volcanic rocks and sediments of the Northern German Basin with regard to the utilization as geothermal reservoir

Ferdinand Stöckhert¹, Sebastian Brenne¹, Michael Molenda¹, Kirsten Bartmann¹, Sabrina Hoenig¹, Michael Alber¹

¹ Ruhr-Universität Bochum, Ingenieurgeologie/Felsbau, Bochum, Deutschland, ferdinand.stoeckhert@rub.de

Zusammenfassung

Wirtschaftlich interessante geothermale Produktivität in Tiefbohrungen erfordert eine genaue Kenntnis der hydromechanischen Eigenschaften der jeweiligen Zielhorizonte. Das Ziel dieser Arbeit ist die möglichst detaillierte, laborexperimentelle Bestimmung von geomechanischen Gesteinsparametern, welche zur numerischen Simulation von Bohrlochrandausbrüchen benötigt werden. In dieser Arbeit wurden Vulkanite und Sandsteine aus dem Rotliegend des Norddeutschen Beckens untersucht. Das Probenmaterial stammt aus Aufschlüssen im Flechtinger Höhenzug am Südrand des Norddeutschen Beckens. Die durchgeführten Versuche umfassen sowohl ein- als auch triaxiale Druckversuche und Brazilian Disk Zugversuche. Neben petrographischen Dünnschliffanalysen wurden petrophysikalische Eigenschaften wie Ultraschallwellengeschwindigkeiten, Dichten und Porositäten bestimmt. Zusätzlich wurden die Eigenschaften auf Anisotropien, wie sie z.B. durch Schichtung, Unterschiede in Korngröße, Sortierung, Zementation und/oder Diskontinuitäten im Gestein hervorgerufen werden können, hin untersucht. Mithilfe der gewonnenen Parameter wird die Bohrlochstabilität für tiefe Geothermiebohrungen im Norddeutschen Becken abgeschätzt.

Schlüsselworte: Felsmechanik, Bohrlochstabilität, Rotliegend

Abstract

The knowledge of mechanical parameters of reservoir rocks is crucial for economically efficient realisation of deep geothermal projects. In this work, three different types of Rotliegend rocks from the southern margin of the Northern German Basin were characterized geomechanically. The sample set includes terrestrial sandstones, andesitic volcanics and rhyolitic ignimbrites from outcrops in the Flechtinger Hoehenzug near Magdeburg. Uni- and triaxial compressive strength as well as Brazilian disk tensile strength tests were performed. In addition, a range of petrophysical properties like density, porosity and ultra-sonic wave velocities were determined. An additional focus was set on anisotropy of the mechanical properties due to bedding, grain size or discontinuities in the rock mass. A simple calculation of borehole stability was performed using the mechanical properties obtained in the tests.

Keywords: geomechanics, borehole stability, Rotliegend

1 Einleitung

Die Formationen des Rotliegend im Norddeutschen Becken gelten als mögliche Zielhorizonte für tiefengeothermische Nutzung. In Forschungsprojekten, wie zum Beispiel der Bohrung Groß Schönebeck nördlich von Berlin (Huenges und Hurter 2002; Huenges und Winter 2004) wurde eine derartige Nutzung bereits untersucht und demonstriert. Interessant sind diese Horizonte einerseits, da sie aus der Kohlenwasserstoffexploration bekannt und an vielen Stellen durchteuft sind, andererseits liegen sie weit verbreitet in Teufen von über 4000m. Diese Teufenlage und die damit einhergehenden Reservoirtemperaturen von über 150° C ermöglichen die Stromerzeugung durch Geothermie.

Die vorwiegend terrestrischen, klastischen Sedimenten und insbesondere die sauren bis intermediären Vulkanite des Rotliegend weisen jedoch in derartigen Tiefen meist nur noch eine sehr geringe Permeabilität auf. Somit ist für eine wirtschaftliche Nutzung die hydraulische Stimulation der Reservoirhorizonte zur Erzeugung eines *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) nötig.

Die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Zielhorizonte ist von großer Bedeutung für die Abschätzung von Erfolg und Wirtschaftlichkeit von geothermischen Bohrungen. Mithilfe von im Voraus ermittelten mechanischen Parametern der Reservoirgesteine können zum Beispiel Bohrlochstabilität und -integrität abgeschätzt werden und



ein entsprechender Bohrlochausbau geplant werden, um diese zu sichern. Eine weitere Anwendung dieser Parameter ist die Planung und Auslegung hydraulischer Stimulationenkampagnen.

Da jedoch Probenmaterial aus Bohrkernen teuer und nur begrenzt verfügbar ist, wird in dieser Arbeit auf Analogmaterial aus Aufschlüssen im Flechtinger Höhenzug zurückgegriffen. Trotz möglicher Unterschiede in Genese, Diagenese und tektonischer Überprägung wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die mechanischen Eigenschaften näherungsweise den tatsächlichen Reservoirgesteinen entsprechen.

2 Bohrlochstabilität

Bohrlochrandausbrüche entstehen durch Spannungskonzentrationen an der Bohrlochwand, die durch Fernfeldspannungen hervorgerufen werden. Sie stellen einerseits ein Problem für die Umsetzung und Wirtschaftlichkeit von Tiefbohrungen dar, andererseits kann mit der Hilfe von Bohrlochrandausbrüchen auch auf Betrag und Orientierung des in situ Spannungsfeldes in der oberen Erdkruste geschlossen werden (ZOBACK ET AL. 1985).

Zoback et al. (1985) verwenden folgendes einfaches Modell zur Berechnung von Bohrlochrandausbrüchen: Für eine zylindrische Bohrung in einem homogen linear elastischem Medium, auf das eine minimale (S_h) und maximale (S_H) Hauptnormalspannung senkrecht zum Bohrloch wirken, ist die Spannungsverteilung durch folgende Gleichungen (KIRSCH 1898) gegeben:

$$\sigma_r = \frac{S_H + S_h - 2P_p}{2} \times \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{S_H - S_h}{2} \times \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{\Delta P_{MP} R^2}{r^2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{S_H + S_h - 2P_p}{2} \times \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{S_H - S_h}{2} \times \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta P_{MP} R^2}{r^2} \quad (2.2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{S_H - S_h}{2} \times \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (2.3)$$

wobei σ_r die Radialspannung, σ_θ die Tangentialspannung, $\tau_{r\theta}$ die tangentielle Scherspannung, sowie R den Radius der Bohrung, r die Entfernung vom Mittelpunkt der Bohrung, θ den azimuthalen Winkel ausgehend von S_H , P_p den Porendruck und ΔP_{MP} den Druckunterschied zwischen Porendruck und Druck im Bohrloch (Druck im Bohrloch minus Porendruck) bezeichnen. Es kommt also zu einer Spannungskonzentration an der Bohrlochwand mit einem Maximum in Richtung von S_H ($\sigma_\theta = 3S_H - S_h - P_p$) und einem Minimum in Richtung von S_h ($\sigma_\theta = 3S_h - S_H - P_p$).

Dort, wo diese Spannungen die Festigkeit des durchbohrten Gesteins übersteigen, kommt es zum Versagen der Bohrlochwand. Im Falle von kompressivem Scherversagen spricht man hierbei von Bohrlochrandausbrüchen, die mit einer Querschnittsveränderung des Bohrlochs einhergehen. Die Ausbrüche sind in Richtung von S_h orientiert. Falls der Druck im Bohrloch so groß ist, dass die minimale Tangentialspannung die Zugfestigkeit des umgebenden Gesteins zu übersteigt, kann ein Zugriss parallel zu S_H erzeugt werden („hydraulic fracturing“).

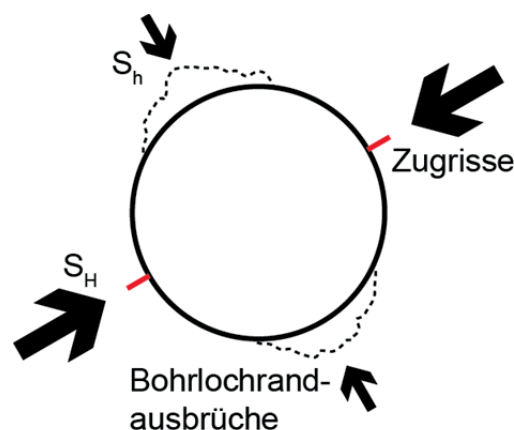


Abb. 9: Schematisches Modell von Bohrlochrandausbrüchen.

Fig. 9: Sketch of borehole breakouts.

3 Versuchsmethoden

Die einaxialen, triaxialen und Brazil Spaltzugversuche wurden gemäß der aktuellen Empfehlung der ISRM und der DGGT durchgeführt. Einaxiale Druckversuche wurden gemäß Option 6 der DGGT (MUTSCHLER 2004) durchgeführt. Die Querdehnung wurde über eine die Probe umspannende Kette mit integriertem induktivem Wegaufnehmer gemessen (FAIRHURST UND HUDSON 1999). Die Versuche wurden mit einer axialen Dehnungsrate $\dot{\epsilon} = 1 \dots 3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{s}$ nach einem Entlastungszyklus bis zum Bruch gefahren. Abb. 10 zeigt die Komponenten des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der triaxialen Druckfestigkeit für Mehrstufenversuche des Typ II der ISRM: Suggested Methods for triaxial compression testing.

Brazil-Spaltzugversuche wurden gemäß der aktuellen Empfehlung der ISRM zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit durchgeführt (ISRM 1978). Die verwendeten Sensoren im Rahmen der jeweiligen Versuche sind in Tab. 2 angegeben. In allen Versuchen wurden zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser 40 mm verwendet, auf die geforderte Länge gesägt und planparallel geschliffen.

Zusätzlich zu den elastischen (E-Modul, Poissonzahl) und Festigkeitsparametern (ein- und triaxiale Druckfestigkeit, Zugfestigkeit) wurden Trockendichte, Korndichte, Ultraschallwellengeschwindigkeit, Cerchar-Abrasivität, Porosität und Permeabilität bestimmt. Desweiteren wurden Dünnschliffe zur petrographischen Beschreibung angefertigt.

Tab. 2: Kenndaten der verwendeten Prüfgeräte (E – Einaxialer Druckversuch; T – Triaxialer Druckversuch; B – Brazilian Disk Spaltzugversuch).

Tab. 2: Parameters of laboratory equipment (E – uniaxial compressive strength test; T – triaxial compressive strength test; B – Brazilian disk tensile strength test).

Sensor (Hersteller) Bezeichnung	max. Signal	Genauigkeit	E	T	B
Kraftmessdose (Althen) CPA-50	500 KN	± 100 N	x	x	x
Wegaufnehmer (Scheavitz) MHR 250 LVDT 1 & 2 / chain	6,3 mm	± 10 ⁻⁷ m	x	x	x
Wegaufnehmer Druck- übersetzer (HBM) WA 200 mm LVDT 3	200 mm	± 2·10 ⁻³ mm		x	
Druckmessdose Druck- übersetzer (Burster) 8219R-3000	300 MPa	± 0,03 MPa		x	

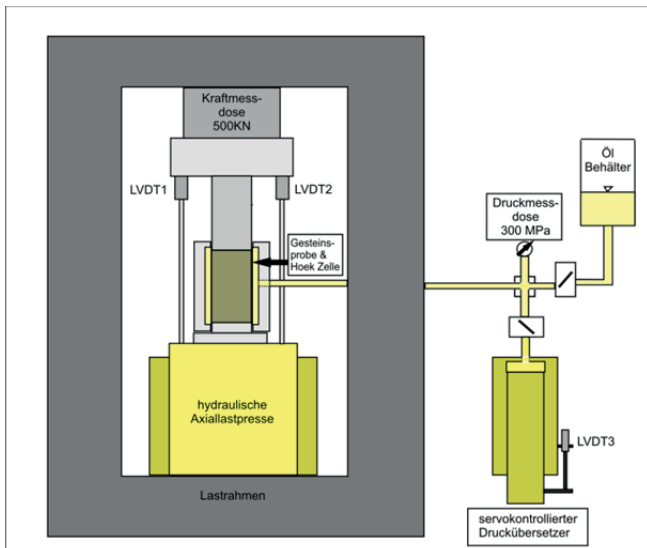


Abb. 10: Versuchsaufbau für Festigkeitsversuche.
 Fig. 10: Laboratory equipment for strength tests.

4 Ergebnisse

4.1 Aufschlüsse

Der Flechtinger Höhenzug ist eine in der Kreide herausgehobene Pultscholle nordwestlich von Magdeburg. Aufgeschlossen ist hier eine Abfolge von permo-karbonischen Sedimenten und Vulkaniten über variszisch verfaltetem Unterkarbon. Paläogeographisch lag der Flechtinger Höhenzug im Rotliegend am Südrand des Norddeutschen Beckens (LEGLER 2006). Die Nähe zum Liefergebiet führte zur Ablagerung von relativ grobklastischen Sedimenten, welche beckenwärts in feinkörnigere Horizonte übergehen.

Die hier getesteten Proben beinhalten einerseits rhyolithische Ignimbrite (Steinbruch westlich von Flechtingen) und andesitische Ganggesteine (Steinbruch Dönstedt, nördlich von Bebertal), andererseits terrestrische Sandsteine aus einem aktiven Steinbruch westlich von Bebertal.

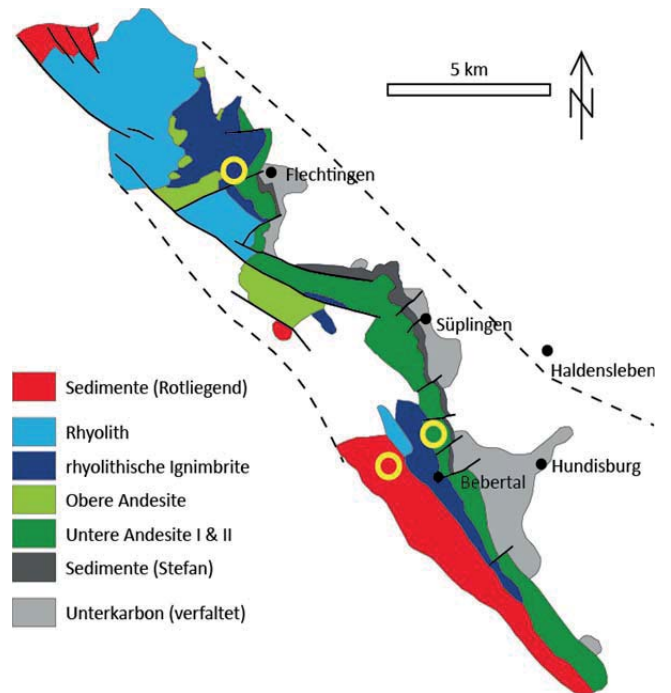


Abb. 11: Geologische Karte des Flechtinger Höhenzuges (nach BENEK ET AL. 1973 und AWDANKIEWICZ ET AL. 2004) mit Probenlokalitäten (gelbe Kreise).

Fig. 11: Geological map of the Flechtinger Höhenzug (after BENEK ET AL. 1973 and AWDANKIEWICZ ET AL. 2004) with sample locations (yellow circles).

Die Sandsteine weisen in den Aufschlüssen mächtige Schrägschichtungskörper und häufige Korngrößenwechsel von feingeschichteten Siltsteinen bis hin zu konglomeratischen Lagen auf. Die Ablagerung der Sedimente erfolgte fluviatil und äolisch in einem Wadi-Milieu (LEGLER 2006). Weiterhin sind schon im Aufschluss größere Variationen in der Zementation und Festigkeit zu erkennen.

Im Steinbruch Dönstedt sind die Andesite von einer Vielzahl von unebenen Trennflächen durchzogen. Weiterhin sind die Gesteine stellenweise stark alteriert, was sich in einer rötlichen bis grünlich-hellgrauen Färbung des Gesteins äußert. Die Rhyolithe im Steinbruch Flechtingen sind tektonisch stark beansprucht und von sehr engständig-planaren Trennflächen durchzogen, die häufig Harnische aufweisen.

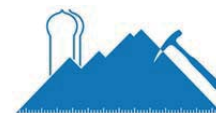
4.2 Petrographie

4.2.1 Sandsteine

Die beprobten Sandsteine umfassen gut sortierte fein bis mittelkörnige lithische Arkosen, schlechter sortierte Grobsandsteine bis feinkiesige Konglomerate, sowie feinkörnige Sandsteine mit feinkiesigen Einkornlagen. Die charakteristische Rotfärbung der Gesteine ist auf Eisenoxidkrusten auf den Komponenten zurückzuführen.

4.2.2 Vulkanite

Die Andesite besitzen ein porphyrisches Gefüge mit stark alterierter, feinkristalliner Matrix und grobkörnigen Einsprenglingen von Feldspat und Pyroxen, die in den meisten



Fällen sekundär chloritisiert sind. Mikrorisse sind häufig unregelmäßig und kalzitisch, chloritisch oder durch Quarz verheilt.

Typisch für die Rhyolithe ist eine mikro- bis kryptokristalline Grundmasse mit Einsprenglingen von Feldspat, Quarz und Granat. Die Proben weisen teilweise Fließgefüge und eine Einregelung der Einsprenglinge auf. Insgesamt sind die Rhyolithe nicht so stark alteriert wie die Andesite, jedoch von sehr engständigen (cm-Abstand), subparallelen, meist kalzitisch verheilten Mikroscherflächen durchzogen.

4.3 Petrophysikalische Untersuchungen

Die geometrischen Trockendichten (Korndichten) der Sandsteine liegen je nach Lithologie zwischen 2,3 und 2,5 g/cm³ (2,65 g/cm³), der Rhyolithe bei 2,63 g/cm³ (2,65 g/cm³) und der Andesite bei 2,72 g/cm³ (2,73 g/cm³). Die berechneten Porositäten liegen somit zwischen 5 und 12 % bei den Sandsteinen und bei unter 1,5% bei den Vulkaniten. Die große Spannweite an Porositäten spiegelt sich auch in den Ultraschallwellengeschwindigkeiten wieder (siehe Abb. 12). An den Sandsteinproben mit den höchsten Porositäten (ca. 12 %) wurden die niedrigsten Geschwindigkeiten gemessen. Mit abnehmender Porosität nehmen die Geschwindigkeiten zu. Die Vulkanite mit ihren relativ hohen Dichten und sehr geringen Porositäten zeigen Ultraschallwellengeschwindigkeiten zwischen 5 und 6 km/s. Teilweise gemessene, deutlich niedrigere Geschwindigkeiten sind vermutlich auf (teilweise offene) Trennflächen im Wellenpfad zurückzuführen.

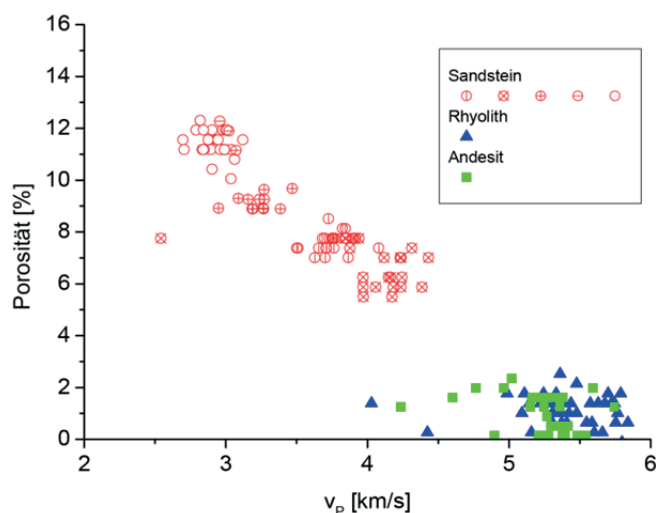


Abb. 12: Porosität gegen Ultraschallwellengeschwindigkeit (bei den Sandsteinen bezeichnen die Symbole jeweils unterschiedliche Lithologien).

Fig. 12: Porosity vs. ultrasonic wave velocity (differing sandstone lithologies are discriminated by red symbols).

4.4 Felsmechanische Laborversuche

Bei der Bestimmung der mechanischen Parameter wurde – soweit möglich – die Orientierung der Probe relativ zu Schicht- und Trennflächen berücksichtigt, um etwaige Anisotropien in den Eigenschaften feststellen zu können. Die einaxialen Druckfestigkeiten aller drei Gesteine besitzen eine relativ große Spannweite von ca. 50 MPa (Sandsteine) bis über 100 MPa (Vulkanite). Spannweiten in die-

ser Größenordnung deuten sich auch in den triaxialen Festigkeiten an. Diese großen Spannweiten werden einerseits durch lithologische Unterschiede, andererseits durch unterschiedliche Orientierungen der in den Proben vorhandenen Trennflächen zur Belastungsrichtung hervorgerufen.

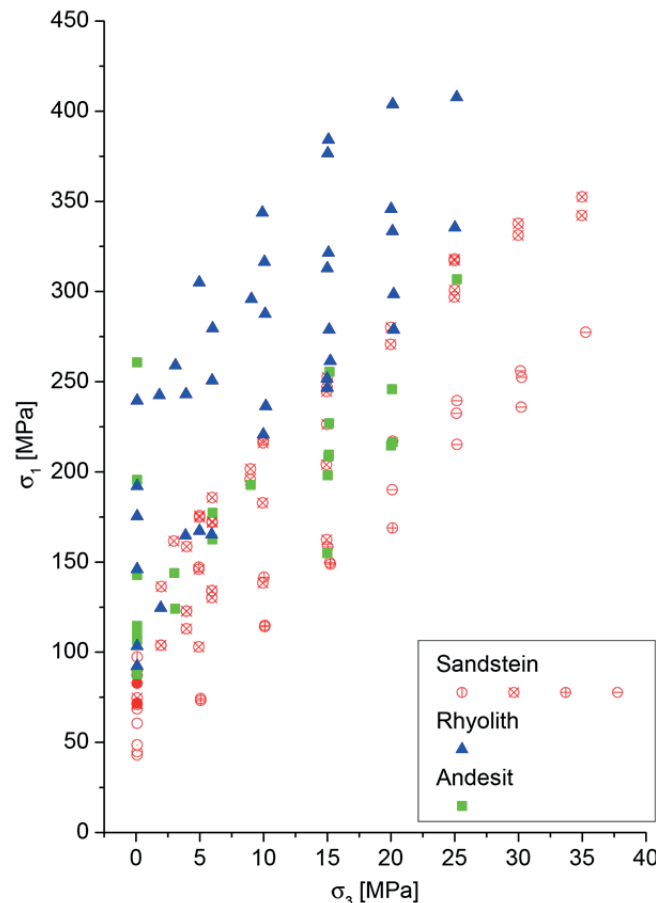


Abb. 13: Festigkeiten aus ein- und triaxialen Druckversuchen (bei den Sandsteinen bezeichnen die Symbole jeweils unterschiedliche Lithologien).

Fig. 13: Uni- and triaxial compressive strength (differing sandstone lithologies are discriminated by red symbols).

Bei den Sandsteinen zeigt sich, dass der Einfluss lithologischer Unterschiede wesentlich größer ist, als der der Orientierung der Schichtung. Die in den Vulkaniten vorhandenen Trennflächen und ihre Orientierung haben jedoch einen sehr großen Einfluss auf die Festigkeiten der gesteteten Proben. So haben Vulkanitproben mit ungünstig orientierten Trennflächen (Winkel zwischen Belastungsrichtung und Trennfläche kleiner als 45°) die geringsten Festigkeiten, Proben ohne Trennflächen und Proben, die senkrecht zu den Trennflächen belastet wurden, die jeweils höchsten Festigkeiten. In Tab. 3 sind für jeden Gesteinstyp minimale und maximale Mohr-Coulomb Festigkeitsparameter angegeben.

Der Elastizitätsmodul der Sandsteine mit hohen Porositäten liegt bei ungefähr 15 GPa, wohingegen die niedrigporösen Sandsteine mit 21 GPa deutlich steifer auf triaxiale Belastung reagieren. Die Orientierung der Trennflächen hat keine signifikanten Auswirkungen auf die E-Moduln der Vulkanite (ca. 30 GPa).

Die mechanischen Eigenschaften der Sandsteine sind somit hauptsächlich durch die Lithologie kontrolliert, bei den Vulkaniten haben die Trennflächen und ihre Orientierung einen großen Einfluss.

Tab. 3: Mechanische Parameter der getesteten Proben (Anzahl der Versuche: N = ein-/triaxiale Druckfestigkeit, n = Brazilian disk Zugfestigkeit).

Tab. 3: Mechanical properties of the rock samples tested for this work (number of tests: N = uni-/triaxial compressive strength, n = Brazilian disk tensile strength).

	Sandstein (Bebertal) N = 77		Andesit (Dönstedt) N = 30		Rhyolith (Flechtin- gen) N = 49	
	max	min	max	min	max	min
Kohäsion [MPa]	26	14	41	20	36	20
Reibungswinkel [°]	48	46	48	49	55	53
UCS [MPa]	95	65	225	120	230	125
Zugfestigkeit [MPa]	6	4	19	10	21	14
	(n = 25)		(n = 27)		(n = 39)	
E-Modul [GPa]	21	15	31	28	31	30

5 Berechnung der Bohrlochstabilität

Eine einfache Berechnung der Bohrlochstabilität wurde hier exemplarisch mit Spannungsdaten aus der Geothermiebohrung Groß Schönebeck im Norddeutschen Becken (MOECK ET AL. 2009) durchgeführt. In dieser Bohrung wurde das Top der Rotliegendesandsteine in ca. 3900 m Teufe angetroffen, darunter folgen in 4200m andesitische Vulkanite (HURTER ET AL. 2002).

Tab. 4: Spannungsregime in Geothermiebohrung Groß Schönebeck (Rotliegend Teufe ~4000m; Moeck et al. 2009).

Tab. 4: In situ stress field for the Groß Schönebeck geothermal site (depth ~4000m Rotliegend formation Moeck et al. 2009).

S_H [MPa]	S_h [MPa]	S_v [MPa]	P_p [MPa]
105	72	103	43

S_H und S_h wirken in der Berechnung senkrecht zur Bohrlochachse. Die Spannungsverteilung um das Bohrloch wird mit Hilfe der Gleichungen (2.1)-(2.3) berechnet. Ein auf einem linearen Mohr-Coulomb Festigkeitskriterium mit Zugfestigkeitsgrenzwert basierender Sicherheitsfaktor, der für den Bereich um das Bohrloch berechnet wird, dient zur ersten Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit und des Ausmaßes der Bohrlochrandausbrüche. Die verwendeten Mohr-Coulomb Parameter sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Ein Sicherheitsfaktor < 1 bedeutet in Richtung von S_H ein Überschreiten der Zugfestigkeit am Bohrlochrand, wohingegen in Richtung von S_h in diesem Fall die Scherfestigkeit überschritten wird.

Nach den Berechnungen ist das Bohrloch bei Spülungsüberdrücken von 12 MPa bis 22 MPa über dem Porendruck in allen Lithologien stabil. Unterhalb eines Spülungsüberdruckes von 12 MPa sind in den Sandsteinen unter Annahme der geringsten Festigkeiten kompressives Scherversagen und somit Bohrlochrandausbrüche wahrscheinlich. Hydraulisch induzierte Risse könnten sich im intakten Sandstein mit den geringsten Zugfestigkeiten bei Überdrücken von mindestens 21 MPa bilden. In den Vulkaniten wäre das Bohrloch über einen sehr viel größeren Druckbereich stabil. Der Druck im Bohrloch könnte unter Annahme der maximalen Festigkeiten dieser Horizonte unter den Porendruck abgesenkt werden, ohne die Bohrlochstabilität zu gefährden.

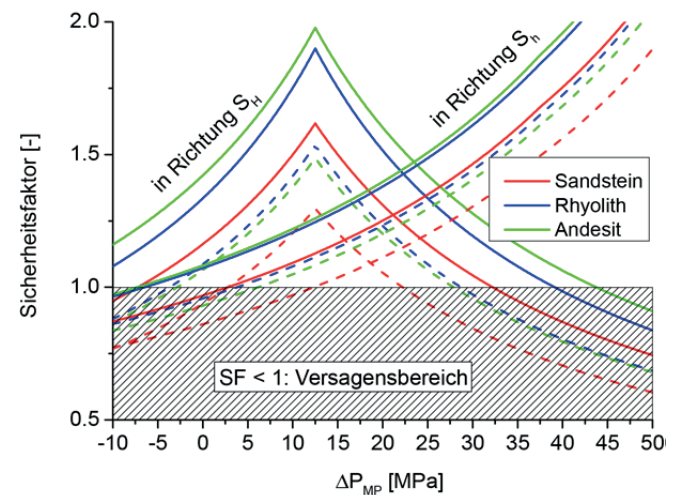


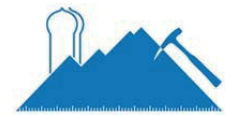
Abb. 14: Sicherheitsfaktor am Bohrlochrand in Richtung von S_H und S_h in Abhängigkeit vom Druckunterschied zwischen Druck im Bohrloch und Porendruck ΔP_{MP} (maximale Festigkeiten durchgezogene Linien; minimale Festigkeiten gestrichelte Linien).

Fig. 14: Factor of safety vs. difference between borehole pressure and pore pressure (ΔP_{MP}) at borehole wall in direction of S_H and S_h (maximum strength solid lines; minimum strength dashed lines).

6 Fazit

Die mechanischen Eigenschaften der Rotliegendhorizonte zeigen eine große Bandbreite. Vor allem zwischen den Sedimenten und den Vulkaniten bestehen große Unterschiede in Festigkeiten und mechanischem Verhalten. Die Berechnung der Bohrlochstabilität gibt grobe Grenzen vor, in denen der Druck im Bohrloch gehalten werden sollte, um Randausbrüche vorzubeugen.

Da die Proben aus übertägigen Aufschlüssen stammen, geben die Ergebnisse nur erste Anhaltspunkte für die mechanischen Eigenschaften der Reservoirhorizonte. Ein Vergleich der Daten mit Proben aus Bohrkernen erscheint sinnvoll. Weiterhin basiert die Berechnung der Bohrlochstabilität auf einem stark vereinfachten Modell, das unter anderem weder plastische Verformung noch Porendruckgradienten zwischen Formation und Bohrloch mit einschließt.



Danksagung

Diese Arbeit wird finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 0325279B). Weiterhin bedanken sich die Autoren bei der Norddeutschen Naturstein GmbH für die freundliche Unterstützung.

Literatur

- AWDANKIEWICZ, M.; BREITKREUZ, C.; EHLING, B.-C. (2004): Emplacement textures in Late Palaeozoic andesite sills of the Flechtingen-Roßlau Block, north of Magdeburg (Germany). – Geological Society, London, Special Publications, **234** (1): 51–66.
- BENEK, R.; PAECH, H.J.; SCHIRMER, B. (1973): Zur Gliederung der permosilesischen Vulkanite der Flechtinger Scholle. – Z. geol. Wiss., **1**: 867–878.
- FAIRHURST, C. E.; HUDSON, J. A. (1999): Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. – Int J Rock Mech Min, **36** (3): 281–289.
- HUENGES, E.; HURTER, S. (Hg.) (2002): In-situ Geothermielabor Groß Schönebeck 2000/2001. Bohrarbeiten, Bohrlochmessungen, Hydraulik, Formationsfluide, Tonminerale GFZ Potsdam (Scientific Technical Report STR, 02/14).
- HUENGES, E.; WINTER, H. (Hg.) (2004): Experimente zur Produktivitätssteigerung in der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90 GFZ Potsdam (Scientific Technical Report STR, 04/16).
- HURTER, S.; KUECK, J.; SAADAT, A.; CARNEIN, C.; BOHN, K.; TOEPFER, M. (2002): Logging Operations October 1990 – October 2001 In: Ernst Huenges und Suzanne Hurter (Hg.): In-situ Geothermielabor Groß Schönebeck 2000/2001. Bohrarbeiten, Bohrlochmessungen, Hydraulik, Formationsfluide, Tonminerale. GFZ Potsdam (Scientific Technical Report STR, 02/14): 43–61.
- ISRM (1978): Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **15** (3): 99–103.
- KIRSCH, G. (1898): Die Theorie der Elasticitaet und die Beduerfnisse der Festigkeitslehre. – Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, **42**: 797–807.
- LEGLER, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa) SDGG, **47**.
- MOECK, I.; SCHANDELMEIER, H.; HOLL, H.-G. (2009): The stress regime in a Rotliegend reservoir of the Northeast German Basin. – International Journal of Earth Sciences, **98** (7): 1643–1654.
- MUTSCHLER, T. (2004): Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises “Versuchstechnik Fels” der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern. – Bautechnik, **81** (10): 825–834.
- ZOBACK, M. D.; MOOS, D.; MASTIN, L.; ANDERSON, R. N. (1985): Well Bore Breakouts and in Situ Stress. – J. Geophys. Res., **90** (B7): 5523–5530.