

AMPEDEK: Atlas geochemischer, petrophysikalischer und felsmechanischer Gesteinskennwerte des kristallinen Grundgebirges in Deutschland

Leandra Weydt¹, Ángel Ramírez¹, Ingo Sass^{1,2}
TU Darmstadt¹, GFZ Potsdam²

Keywords: Tiefe und mitteltiefe Geothermie, Gesteinskennwerte, Kristallin, Reservoircharakterisierung, Datenbank

Zusammenfassung

Das kristalline Grundgebirge in Deutschland besitzt ein hohes Potenzial für die Nutzung mitteltiefer bis tiefer Geothermie sowie zur Wärmespeicherung. Bisher liegen jedoch nur wenige Daten über die verschiedenen geologischen Einheiten des Kristallin und ihren Gesteinseigenschaften vor. Aus diesem Grund verfolgt das AMPEDEK-Projekt das Ziel, eine Referenzdatenbank zur Charakterisierung kristalliner Grundgebirgsgesteine in Deutschland, basierend auf Literaturdaten und neuen Messkampagnen, aufzubauen. Zu Beginn des Projektes wurden die Struktur der Datenbank sowie Qualitätskriterien festgelegt und es konnten bereits Daten aus über 40 Studien zusammengetragen, bewertet und in die Datenbank integriert werden. Im Rahmen einer ersten Messkampagne wurden 650 zylindrische Prüfkörper, hergestellt aus Bohrkernen und Aufschlussproben, systematisch hinsichtlich ihrer geochemischen, petrophysikalischen und felsmechanischen Eigenschaften analysiert, mit dem Ziel, möglichst viele verschiedene Einheiten des Kristallin abzudecken. Laborversuche unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen dienen zudem der Untersuchung des hydraulischen, thermischen sowie mechanischen Verhaltens der Gesteine unter Reservoirbedingungen. Die Datenbank umfasst derzeit 34 Gesteinsparameter und 25.700 gemessene Messwerte von rund 8.200 Gesteinsproben, die an über 3.400 Probenahmestellen in acht deutschen Bundesländern entnommen wurden. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Variabilität innerhalb der gemessenen Parameter, was die Komplexität des kristallinen Grundgebirges in Deutschland unterstreicht. Lithologie-spezifische Trends konnten u. a. in den Messdaten der Gesteinsdichte, der magnetischen Suszeptibilität, den Ultraschallgeschwindigkeiten und der Wärmeleitfähigkeit festgestellt werden. Die Ergebnisse der Hochdruck-/Hochtemperaturversuche zeigten z. B. für die Permeabilität eine Änderung von mehr als einer Größenordnung bei 90 °C und 30 MPa vertikalen Druck im Vergleich zu Messungen unter Laborbedingungen.

1. Einleitung

In den letzten Jahren haben sowohl Industrie als auch Wissenschaft ein wachsendes Interesse am kristallinen Grundgebirge in Deutschland gezeigt – nicht nur im Hinblick auf verschiedene geothermische Anwendungen, sondern auch als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Jüngste Projekte konzentrierten sich auf die Nutzung des kristallinen Grundgebirges für die Implementierung tiefer geschlossener geothermischer Systeme im Süddeutschen Molassebecken (z. B. das Eavor-Loop-Projekt in Geretsried; Eavor, 2025), die Identifikation von Störungszonen und thermischen Anomalien zur Entwicklung tiefer Geothermieprojekte (z. B. das Enhanced Geothermal System in Soultz-sous-Forêts; Genter et al., 2010) sowie in einigen Fällen auf die kombinierte Gewinnung von geothermischer Energie und Lithium im Oberrheingraben (z. B. Koppar Resources, 2019; Jungmann et al., 2025). Darüber hinaus wurde am Campus der TU Darmstadt im Rahmen der Projekte SKEWS und Push-IT ein mitteltiefes

Bohrlochwärmespeichersystem (BTES) entwickelt (Seib et al., 2024; Sass et al., 2024). Zusätzlich haben frühere Studien das erhebliche Potenzial des kristallinen Grundgebirges für die Entwicklung von Enhanced Geothermal Systems (EGS) hervorgehoben, die einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und dezentralen Deckung des Wärmebedarfs in Deutschland leisten könnten (Bracke et al., 2022). Neben Untersuchungen zur Wärme- und Stromproduktion hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) das kristalline Grundgebirge aufgrund seiner besonders hohen Festigkeit und Stabilität, geringen Temperaturempfindlichkeit, niedrigen Löslichkeit und geringen Permeabilität im ungestörten Zustand als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle identifiziert – Eigenschaften, die eine sichere und langfristige Einschlusswirkung des Atommülls gewährleisten (Bauer, 2021).

Allerdings liegen bislang nur begrenzte Informationen zu den verschiedenen granitischen und metamorphen Gesteinen des kristallinen Grundgebirges in Deutschland vor, da dieses in der Vergangenheit nicht im Fokus der Öl- und Gasindustrie, des Bergbaus oder anderer größerer Bohrprojekte stand. Ein fundiertes Wissen über geochemische, petrophysikalische und mechanische Gesteinseigenschaften ist jedoch entscheidend für eine robuste Reservoircharakterisierung, die präzise Interpretation geophysikalischer Explorationsdaten und eine zuverlässige Parametrisierung numerischer Modelle in Reservoirsimulationen (Bär et al., 2020). In diesem Zusammenhang haben sich Aufschlussanalogstudien als effektiver und kostengünstiger Ansatz erwiesen, um Zielgesteinseinheiten zu untersuchen und wesentliche Reservoirparameter abzuschätzen (Bertrand et al., 2021; Anees et al., 2024).

Zur Erstellung einer umfassenden Gesteinskennwertedatenbank des kristallinen Grundgebirges in Deutschland wurden im Rahmen des AMPEDEK-Projekts (Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften deutscher kristalliner Wirtsgesteine) umfangreiche Literaturauswertungen sowie neue Probenahmen- und Messkampagnen durchgeführt. Das Hauptziel der ersten Projektphase bestand darin, ein breites Spektrum an Lithologien zu erfassen und die resultierenden Daten in einer benutzerfreundlichen und zugänglichen Form (= Referenzdatenbank) zusammenzustellen, einschließlich hinreichender Metadaten und Qualitätskontrollen. Dabei wurden neu gewonnene Gesteinsproben systematisch hinsichtlich ihrer petrophysikalischen, hydraulischen, thermischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften untersucht und diese durch mineralogische, geochemische sowie petrographische Analysen ergänzt. Um die unter Umgebungsbedingungen ermittelten Gesteinseigenschaften auf repräsentative in-situ Reservoirbedingungen zu übertragen, wurden ausgewählte Hochtemperatur- und Hochdruckexperimente (HTHP) durchgeführt.

Dieser Beitrag präsentiert die Ergebnisse der ersten Phase des AMPEDEK-Projekts und soll ein robustes Datenset bereitstellen, das die Nutzung kristalliner Gesteine für Untergrundanwendungen unterstützt und zum besseren Verständnis ihres physio-mechanischen Verhaltens unter Reservoirbedingungen beiträgt.

2. Das kristalline Grundgebirge in Deutschland

Als Folge der variszischen Orogenese im späten Paläozoikum wurden weite Teile des heutigen Deutschlands herausgehoben und stark erodiert, wodurch verschiedene Einheiten des variszischen Grundgebirges in der innerorogenen Zone aufgeschlossen wurden, die heute diskordant von Sedimentbedeckungen überlagert sind (Reinhold, 2005). Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte geologische Karte Deutschlands sowie die wichtigsten Strukturzonen des kristallinen Grundgebirges. Diese sind: die Rhenoharzynische Zone, die Nördliche Phyllitzone, die Mitteldeutsche Kristallinschwelle, die Südliche Phyllitzone, die Saxothuringische Zone sowie die Moldanubische Zone. Die Rhenoharzynische Zone besteht überwiegend aus schwach metamorphen paläozoischen Sedimentgesteinen, während kristalline Gesteine lokal in tektonisch angehobenen Antiklinalen, in Störungszonen sowie als früh-variszische Grundgebirgseinlagerungen vorkommen, wie sie im Lahn-

Dill- und im Rheinischen Schiefergebirge aufgeschlossen sind (Krawczyk & Franke, 1995). Die Mitteldeutsche Kristallinschwelle besteht aus mittel- bis hochgradig metamorphen Gesteinen sowie aus syn- bis postorogener Granitoidintrusionen. Sie bildet die interne Zone zwischen der Rhenoharzynischen Zone im Nordwesten und der Saxothuringischen Zone im Südosten (Franke, 2000) und tritt u. a. im Odenwald, Spessart, Ruhlaer Kristallin und in Nord-Sachsen an die Oberfläche. Die Saxothuringische Zone ist in Teilen Ost- und Mitteldeutschlands gut aufgeschlossen (z. B. Erzgebirge, Thüringer Wald, Sachsen) sowie im Böhmischem Massiv (Franke, 2000). Sie umfasst hochgradig metamorphe Gesteine sowohl sedimentären als auch magmatischen Ursprungs. Die Moldanubische Zone stellt den tiefen internen Bereich des variszischen Orogens dar (Franke, 2000). Sie tritt hauptsächlich im Bayerischen Wald zutage und setzt sich in das Böhmisches Massiv fort. Sie besteht aus hochgradig metamorphen Gesteinen (z. B. Paragneise, Orthogneise, Amphibolite), enthält jedoch auch größere granitische Körper, die während spätkollisionaler und postorogener Extension intrudierten (z. B. Plutone im Bayerischen Wald). Die Nördliche und Südliche Phyllitzone repräsentieren zwei schmale, langgestreckte tektonometamorphe Gürtel, die aus Phylliten und Schiefen im Grünschiefer-Faziesbereich aufgebaut sind. Diese sind mit metavulkanischen Gesteinen und lokalen Radiolariten vergesellschaftet, die aus frühpaläozoischen siliziklastischen Sedimenten hervorgegangen sind (Linnemann et al., 2004). In der Südlichen Phyllitzone treten zusätzlich allochthone hochgradig metamorphe Einheiten auf.

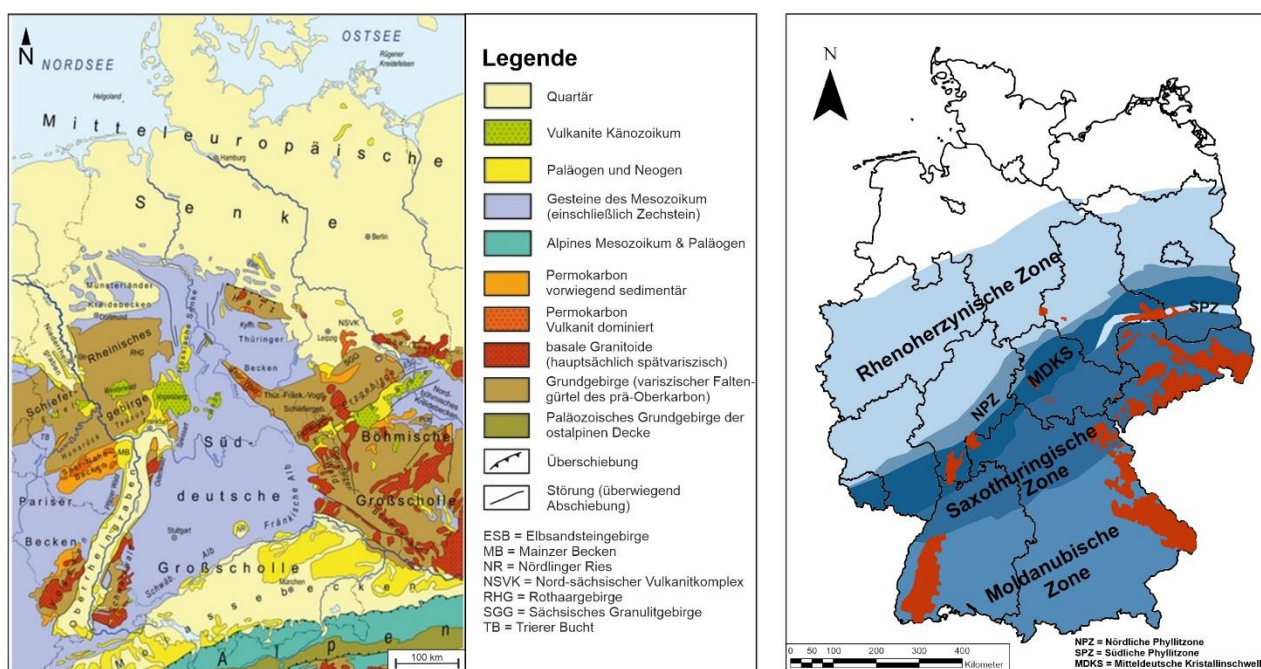


Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte von Deutschland (links), modifiziert nach Moeck et al. (2019) und den dort angegebenen Quellen. Auf der rechten Seite sind die Hauptstrukturbereiche des variszischen Grundgebirges in Deutschland dargestellt, einschließlich einer vereinfachten Darstellung der aufgeschlossenen kristallinen Grundgebirgsgesteine (rot) (modifiziert nach Bauer (2021) und Reinhold (2005)).

3. Methodik

3.1 Datenerhebung und Aufbau der Datenbank

Zu Beginn des Projekts wurden Datensätze, die von den verschiedenen geologischen Landesämtern in Deutschland zur Verfügung gestellt wurden sowie Daten aus der Literatur zusammengetragen und systematisch ausgewertet. Die Struktur der initialen Referenzdatenbank orientierte sich an der P³-Petrophysical Rock Property Database (Bär et al., 2020), einem relationalen Excel-basierten System, das verschiedene Tabellen zur Speicherung von Metadaten (z. B. Referenzen, Probenstandorte, Stratigraphie, Petrographie, Probendimensionen und Messbedingungen) sowie unterschiedlicher Gesteinseigenschaften umfasst, darunter petrophysikalische, thermische, hydraulische, magnetische, elektrische und mechanische Parameter. Innerhalb des AMPEDEK-Projekts wurde jede Probe mit einer eindeutigen Proben-ID versehen, um die Nachverfolgbarkeit sicherzustellen. Zusätzlich berücksichtigt die Datenbank Qualitätsindizes, um Unsicherheiten in Bezug auf die Vollständigkeit der Metadaten sowie Beschreibungen der Messbedingungen zu erfassen. Im Fall des AMPEDEK-Projekts wurden nur Daten mit ausreichenden Metadaten und eindeutiger Beschreibung der Messmethoden in die Referenzdatenbank aufgenommen.

3.2 Neue Probenahme- und Messkampagne

Zur Schließung bestehender Datenlücken wurden neue Probenahmen und Laboruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde Probenmaterial von acht verschiedenen Bohrkernen (Bohrungen in Baden-Württemberg, Niedersachsen und Thüringen) sowie aus Aufschlüssen (Baden-Württemberg, Hessen) und Steinbrüchen (Hessen, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern) entnommen. Insgesamt wurden 26 neue Lithologien granitischer und metamorpher Gesteine beprobt und anschließend im Labor der TU Darmstadt nach dem in Weydt et al. (2021) beschriebenen Arbeitsablauf analysiert. Zunächst wurden ca. 650 zylindrische Probenkörper mit einer Länge von ~25 bis 128 mm und einem Durchmesser von 30 bis 64 mm gemäß ASTM D4543-19 (2019) aus dem gewonnenen Probenmaterial hergestellt. Anschließend wurden zerstörungsfreie Tests an den hergestellten Probenkörpern durchgeführt und danach – soweit möglich – wurden destruktive Tests durchgeführt. Zusätzlich wurde pro Lithologie die geochemische und mineralogische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF), ICP-MS, Röntgendiffraktometrie (XRD) und Dünnschliffanalysen bestimmt.

Der gesamte Messablauf umfasste dabei die folgenden Parameter (Weydt et al., 2021):

- **Zerstörungsfreie Messungen:** Rein- und Rohdichte, Permeabilität, Porosität, magnetische Suszeptibilität, Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit, P- und S-Wellengeschwindigkeiten, dynamischer E-Modul, dynamische Querkontraktionszahl, dynamischer Schermodul, dynamischer Kompressionsmodul
- **Destruktive Messungen:** Einaxiale Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, statischer E-Modul, statische Querkontraktionszahl, statischer Schermodul, statischer Kompressionsmodul, Kohäsion und Reibungswinkel sowie Scherfestigkeit
- **Geochemische Analysen** (RFA, ICP-MS, XRD) sowie Dünnschliffanalysen, Berechnung der radiogenen Wärmeproduktion

3.3 Labormessungen unter erhöhten Temperatur- und Druckbedingungen

Um das Verhalten der Gesteinsproben unter Reservoirbedingungen besser abschätzen zu können, wurden, wenn möglich, vereinzelte Parameter unter erhöhten Temperatur- und Druckbedingungen untersucht. Dies beinhaltete thermische Parameter, wie die spezifische Wärmekapazität sowie die Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten, aber auch hydraulische und mechanische Eigenschaften (Weydt et al., 2025). Zur Untersuchung von hydraulischen Eigenschaften unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen wurde im Labor der TU Darmstadt eine Thermo-Triaxial-Messanlage (Pei et

al., 2015; technische Daten: Temperatur bis 180 °C, maximale Vertikallast von 1000 kN, maximaler Manteldruck von bis zu 50 MPa, Steuerung des Porendrucks erfolgt mittels zweier Volume-Pressure-Controller, die an die Messzelle angeschlossen sind) verwendet, die nicht nur konventionelle Triaxialversuche unter Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen, sondern auch Durchströmungsexperimente, die für ein besseres Verständnis von Gesteins-Fluid-Wechselwirkungen unerlässlich sind, ermöglicht.

Zur Untersuchung der Permeabilitätsänderungen unter Reservoirbedingungen wurden sechs Durchströmungsversuche mit zylindrischen Probenkörpern des Tromm Granits (Odenwald-Komplex, Hessen; Länge = 128 mm, Durchmesser = 64 mm) bei verschiedenen Temperaturen (30, 60 und 90 °C) sowie bei schrittweise steigendem vertikalem sowie Manteldruck von bis zu jeweils 30 bzw. 15 MPa durchgeführt. Vor Beginn der Versuche wurden die Proben 48 Stunden lang in einer Vakuummzelle wassergesättigt (British Standards Institution, 2006) und anschließend vorkonditioniert, um plastische Deformationen während der Versuche zu vermeiden. Das Vorkonditionieren bestand aus drei Last-Entlastungszyklen, bei denen die Vertikalspannung jeweils von 6 auf 70 MPa erhöht und für zwei Minuten gehalten wurde, bevor sie wieder auf 6 MPa abgesenkt wurde (ebenfalls zwei Minuten Haltedauer). Der Manteldruck und der Porendruck blieben währenddessen konstant. Nach dem Vorkonditionieren erfolgte der eigentliche Test, bestehend aus ein oder zwei Zyklen gestufter Lastaufbringung und Entlastung pro Temperaturstufe (siehe Skizze des Versuches in Abb. 2). Ein Zyklus bestand dabei aus fünf Kombinationen von Vertikalspannung und Manteldruck, wobei der Manteldruck stets die Hälfte der Vertikalspannung betrug: 6–3 MPa, 10–5 MPa, 15–7,5 MPa, 20–10 MPa und 30–15 MPa. Nach Erreichen des maximalen Drucks, wurde die Belastung in derselben Reihenfolge wieder zurückgefahren. Jede Belastungsstufe dauerte ca. 12 Stunden, wobei die Permeabilität basierend auf dem Darcy-Gesetz kontinuierlich gemessen wurde. Ein Differenzdruck von 0,5 MPa wurde während des gesamten Versuchablaufes konstant gehalten. Bei den Experimenten bei 60 und 90 °C wurde die Permeabilität zunächst bei 30 °C bestimmt, bevor die Temperatur weiter erhöht wurde. Nach dem ersten Belastungs-Entlastungszyklus wurde der Versuch an drei der sechs Proben ein zweites Mal durchgeführt, um langfristige Veränderungen in den Proben und der Permeabilität zu untersuchen.

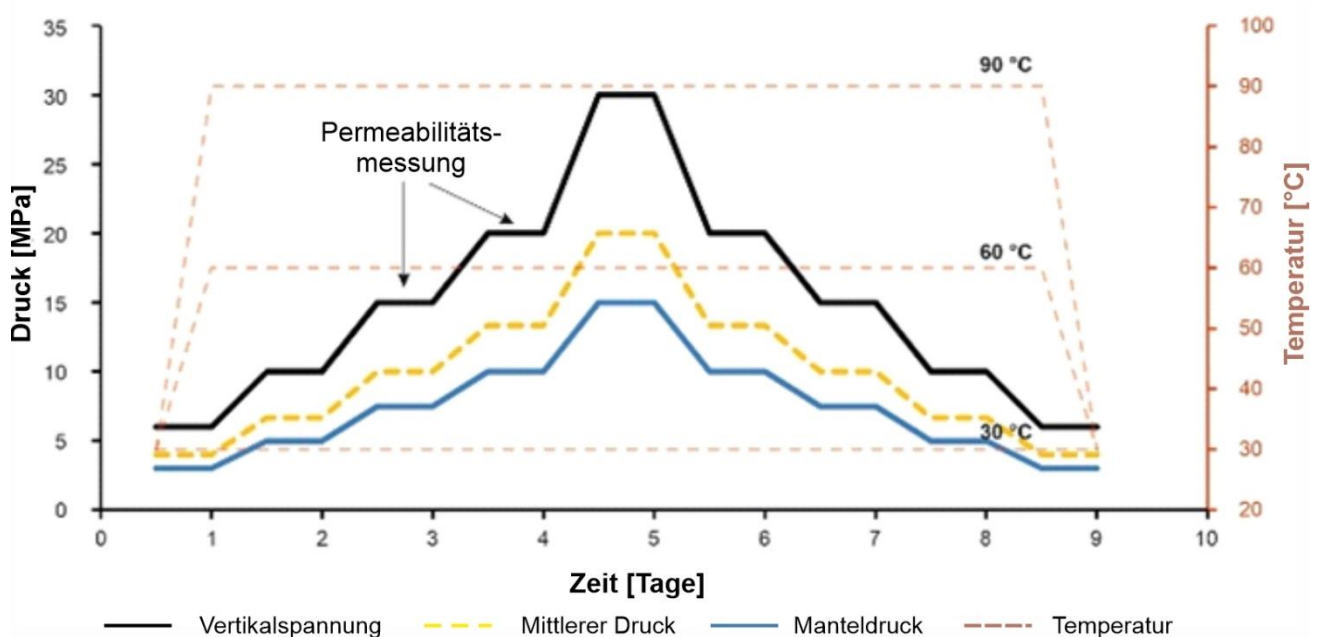


Abb. 2: Schematischer Versuchsablauf der Durchströmungsversuche, die mit Hilfe des Thermo-Triaxial-Messgerätes an der TU Darmstadt durchgeführt wurden.

4. Ergebnisse

4.1 Referenzdatenbank

Die Struktur der Referenzdatenbank wurde fortlaufend aktualisiert und an die sich entwickelnden Anforderungen des Projekts angepasst. Im Gegensatz zu der P³-Datenbank (Bär et al., 2020), erfolgt die Eintragung neuer Daten nun nach der Struktur von Weydt et al. (2021), in dem jeder Probe eine eindeutige Proben-ID zugeordnet ist und alle unter identischen Druck- und Temperaturbedingungen gemessenen Gesteinsparameter in einer einzigen Zeile erfasst werden. Zudem wurde die Datenbank um thermische und dynamische mechanische Parameter, die unter gesättigten Bedingungen gemessen wurden, ergänzt und neue Tabellen integriert, um geochemische Analysen des Festgesteins (RFA; Haupt- und Spurenelemente sowie seltene Erden), XRD-Daten und petrographische Beschreibungen aufnehmen zu können. Während der Datenerhebung wurden Daten aus über 40 Publikationen sowie Datensätze geologischer Landesaufnahmen, die den definierten Qualitätskontrollstandards entsprachen, identifiziert und in die Referenzdatenbank übernommen, wodurch mehr als 20.000 Datenpunkte beigetragen wurden. Diese wurden zudem durch die Ergebnisse der neuen Messkampagnen mit etwa weiteren 5.000 Datenpunkten, bestehend aus den oben genannten Gesteinsparametern, ergänzt. Die Datenbank umfasst nun mehr als 30 petrophysikalische und mechanische Gesteinsparameter, ergänzt durch geochemische und mineralogische Analysen, die an rund 8.200 Gesteinsproben von über 3.400 Probenstandorten in acht Bundesländern gemessen wurden. Wie in Abb. 3 dargestellt, variieren jedoch sowohl die Datenmenge als auch die räumliche Verteilung erheblich zwischen den Bundesländern. Darüber hinaus liegen in den meisten Regionen entweder petrophysikalische oder geochemische Daten vor, während Daten zur Gesteinsmechanik unterrepräsentiert sind. Umfassende Datensätze, die petrophysikalische, geochemische und mechanische Eigenschaften kombinieren, stehen derzeit nur für Proben die im Rahmen des AMPEDEK-Projekts gemessen wurden zur Verfügung.

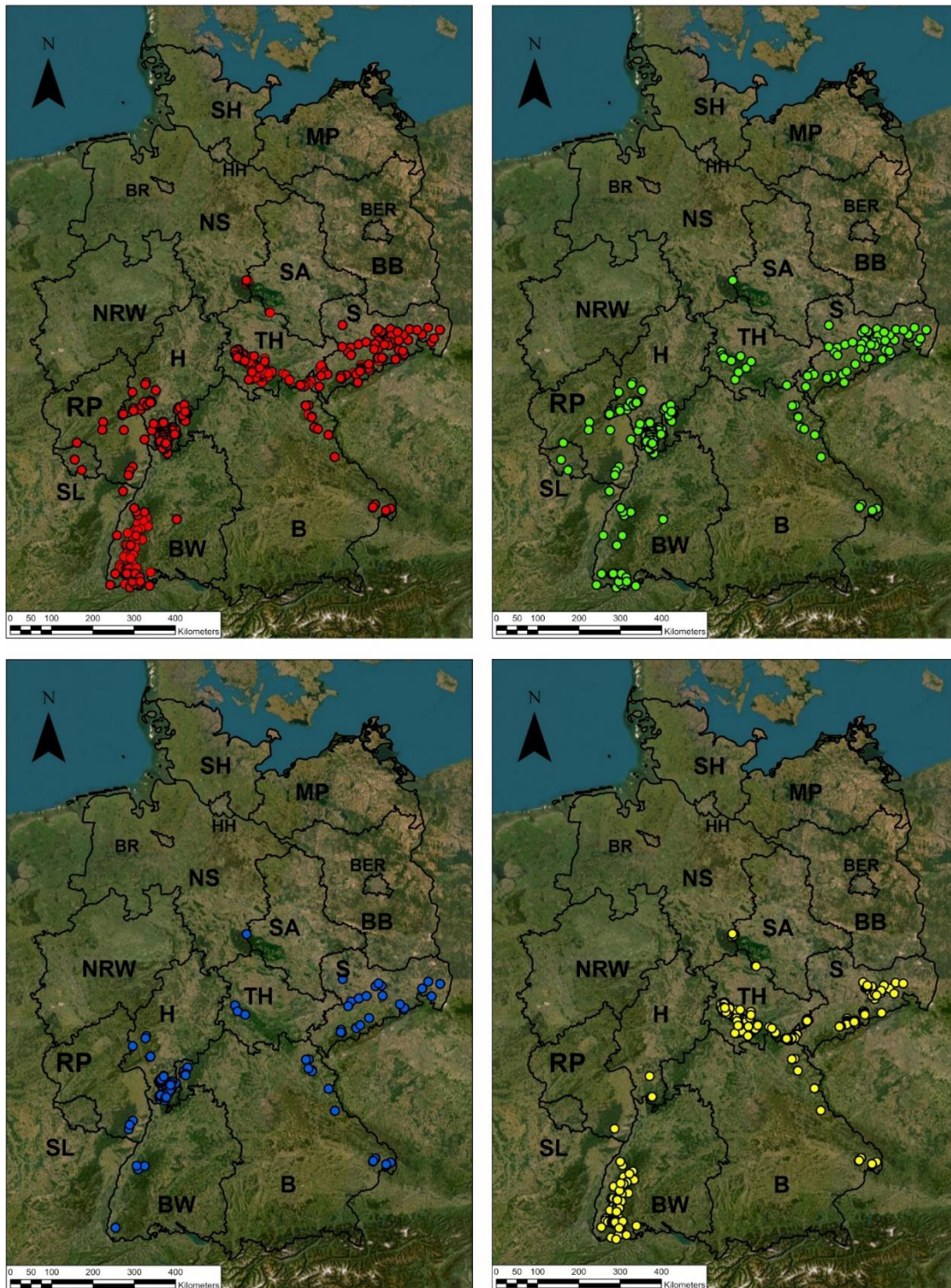


Abb. 3: Räumliche Darstellung der zugehörigen Probennahmelokationen der Messdaten in der Referenzdatenbank (rot = alle Daten, grün = petrophysikalische Messwerte, blau = destruktive felsmechanische Tests, gelb = geochemische Daten).

4.2 Ergebnisse der Messkampagne

Abbildung 4 zeigt ausgewählte petrophysikalische Eigenschaften, die unter Laborbedingungen (ungesättigt) an den neu gewonnenen Bohrkern- und Aufschlussproben gemessen wurden. Die Ergebnisse verdeutlichen eine breite Spannweite der Messwerte für sämtliche Parameter sowie eine erhebliche Variabilität innerhalb des Datensatzes, obwohl der Großteil der analysierten Proben aus frischen, unveränderten Graniten besteht – mit Ausnahme weniger Gneis- und Gabbroproben. So reicht beispielsweise die Rohdichte von 2,59 bis 3,20 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, während die P-Wellengeschwindigkeit Werte von etwa 1700 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Paragneis) bis 6500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Harzburger Gabbro) umfasst. Ebenso variiert die magnetische Suszeptibilität über mehr als drei Größenordnungen, von 0,001 bis etwa $30\cdot 10^{-3}$ SI. Darüber hinaus hebt Abbildung 4 sowohl lithologie- als auch standortspezifische Trends hervor, die als wertvolle Indikatoren für künftige Explorationskampagnen im Untergrund dienen können. Die Analyse bestimmter Bohrkern- offenbart jedoch zugleich deutliche Schwankungen einiger Parameter über kurze vertikale Distanzen (Zehnermeter-Skala) wie dies beispielsweise im Murgtal-Gneis-Anatexits (Baden-Württemberg) und im Harzburger Gabbro (Niedersachsen) zu beobachten ist.

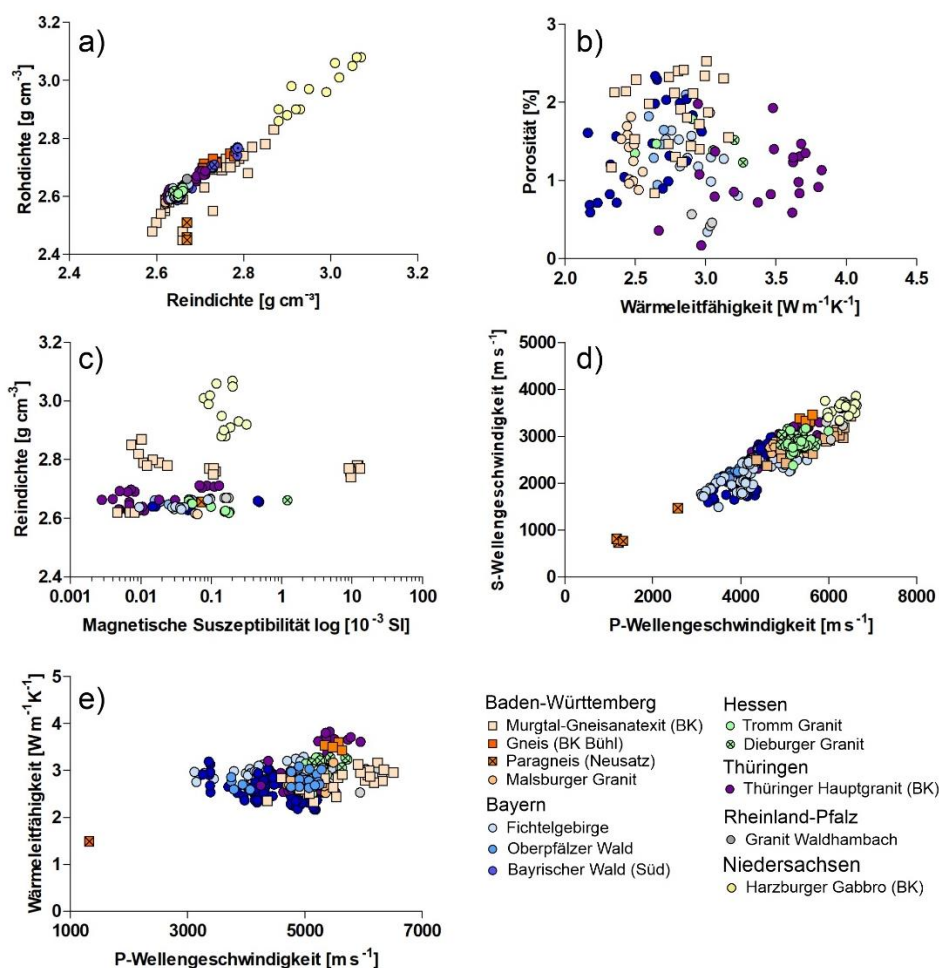


Abb. 4: Darstellung ausgewählter petrophysikalischer Gesteinsparameter, die im Rahmen des AMPEDEK-Projekts an den neu gewonnenen Bohrkern- (BK) und Aufschlussproben gemessen wurden.

4.3 Ergebnisse der Durchströmungsversuche

Die bei 30 °C gemessenen Permeabilitätsmesswerte (Abb. 5) zeigten nach Erhöhung der mittleren Spannung lediglich geringe Veränderungen. Die Permeabilität verringerte sich von $4,15 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ auf $1,20 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ sowie von $2,94 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ auf $5,27 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ für die Proben 1 (Abb. 5A) und 2 (Abb. 5B). Nach dem ersten Lastzyklus zeigte sich hierbei kein signifikanter Abfall. Die Permeabilitätsentwicklung bei 60 °C (Abb. 5C und D) offenbarte zwei unterschiedliche Trends: Probe 3 wies eine ähnliche Entwicklung wie die Proben bei 30 °C auf, mit einem leichten Rückgang der Permeabilität von $8,12 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ auf $2,19 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$. Demgegenüber zeigte die Probe 4 eine deutliche Verringerung der Permeabilität um nahezu zwei Größenordnungen von $1,07 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ auf $3,15 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$. Die Permeabilitätsentwicklung bei 90 °C verlief in beiden Experimenten ähnlich und zeigte eine Verringerung der Permeabilität von $5,03 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ auf $1,42 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ sowie von $3,89 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ auf $1,18 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für die Probe 5 (Abb. 5E) bzw. Probe 6 (Abb. 5F). Nach dem ersten Belastungs-Entlastungszyklus zeigten die Proben 4, 5 und 6 eine dauerhafte Reduktion der Permeabilität um 94 %, 98 % bzw. 96 % im Vergleich zum Ausgangswert. Dagegen lag die Abnahme bei den Proben 1, 2 und 3 bei rund 20 %. Ein zweiter Belastungs-Entlastungszyklus wurde an den Proben 2, 4 und 6 durchgeführt. Die Permeabilitätsentwicklung während dieses zweiten Zyklus zeigte nur geringe Änderungen, die den Beobachtungen an den Proben bei 30 °C während des ersten Zyklus entsprachen. Es wird deutlich, dass die Permeabilität sowohl vom Spannungszustand der Probe als auch von der Versuchstemperatur abhängt. Die dargestellten Experimente zeigen, dass die Permeabilität des Tromm Granits nicht nur unterschiedliche Trends in Abhängigkeit von der Temperatur aufweist, sondern auch nach Wiederherstellung der ursprünglichen Druckbedingungen nicht auf ihren Ausgangswert zurückkehrt. Diese Irreversibilität wird durch den zweiten Last-Entlastungszyklus der Proben 2, 4 und 6 untermauert. Die angegebenen Permeabilitätswerte stellen Mittelwerte über einen Zeitraum von 12 Stunden Durchfluss pro Druckstufe dar. Weitere Ergebnisse und Diskussionen zur Entwicklung der Permeabilität sowie der Deformationen während dieser Phasen werden in zukünftigen Arbeiten behandelt.

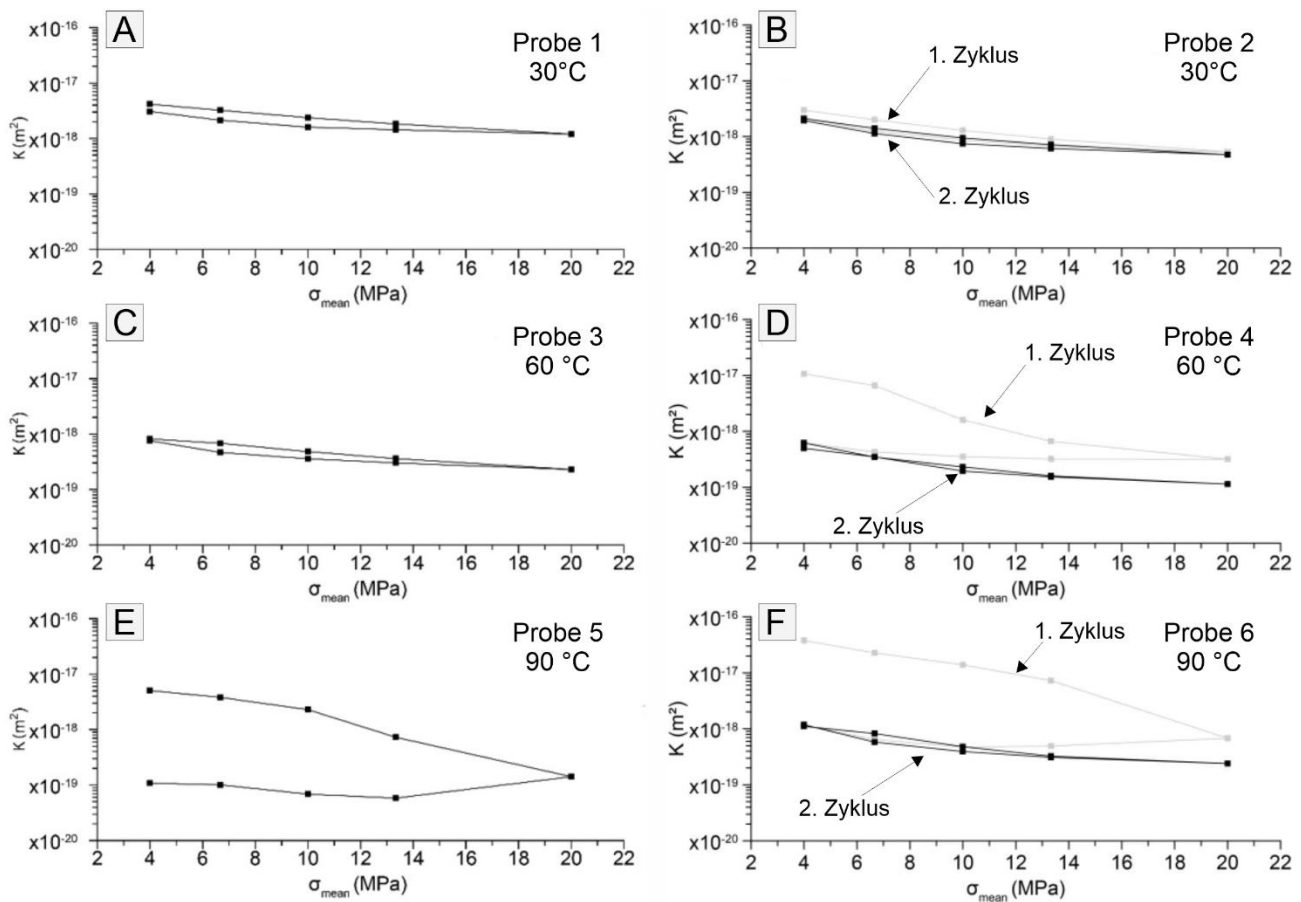


Abb. 5: Veränderung der Permeabilität gemessen an sechs Granitproben unter erhöhten Temperaturbedingungen (30 °C, 60 °C und 90 °C) und schrittweise zunehmender und anschließend abnehmender mittleren Spannung. An den Proben 2, 4 und 6 (Teilabbildungen B, D und F) wurde der Belastungs- und Entlastungszyklus ein zweites Mal durchgeführt. Die angegebenen Permeabilitätswerte entsprechen dem Mittelwert über 12 Stunden Versuchsdauer pro Druckstufe bei einem konstanten Differenzdruck von 0,5 MPa.

6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen des AMPEDEK-Projekts wurde eine umfassende Gesteinsdatenbank auf Basis von Literaturdaten, Daten geologischer Landesämter sowie neuen Messkampagnen erstellt, um die physikalisch-chemischen und mechanischen Eigenschaften des kristallinen Grundgebirges in Deutschland besser zu charakterisieren. Die resultierende Datenbank umfasst derzeit etwa 25.700 Datenpunkte, die 34 verschiedene Gesteinsparameter abdecken. Die Daten stammen von rund 8.200 Gesteinsproben, die von mehr als 3.400 Probenahmelokationen in Deutschland stammen und dabei das kristalline Grundgebirge aus acht Bundesländern abdecken. Die Datenbank bietet damit eine solide Grundlage für standortspezifische Charakterisierungen, Ressourcenabschätzungen und zukünftige regionale geologische Untersuchungen.

Zukünftig wird die Datenbank kontinuierlich durch neue Probenahmen- und Messkampagnen erweitert, insbesondere in Regionen mit geringer Datenabdeckung. Neben der Charakterisierung bisher unterrepräsentierter Lithologien wird der Fokus auf die Untersuchung der Homogenität von Plutonen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, den Einfluss von Anisotropie sowie der Einfluss von Verwitterung auf die Gesteinseigenschaften gelegt. Zusätzliche Hochtemperatur-Hochdruckexperimente sollen dazu beitragen, die Veränderungen hydraulischer und thermischer Parameter unter in-situ-Bedingungen für Upscaling-Zwecke besser zu verstehen sowie den Prozess

der Rissinitiierung und -ausbreitung in Lithologien mit unterschiedlichen mineralogischen Eigenschaften zu untersuchen.

Danksagung

Das AMPEDEK-Projekt wurde unter der Referenznummer STAFUE-21-03-Klei von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE, Federal Company for Radioactive Waste Disposal) gefördert.

Quellenangaben

ASTM D4543-19: Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, (2019), 13 pp.

ANEES, M., SOSA, G., VAN DEN KERKHOFF, A., LEISS, B., KLEY, J., SHAH, M. M., und WEYDT, L.: Granitoids of the western Himalaya and Karakoram as potential geothermal reservoirs – A petrological, geochemical and petrophysical study, *Geothermics*, (2024), 103040.

BAUER, M. E.: Arbeitsgruppe D2 – Kristallin Mindestanforderungen im Gesetz und in der Anwendung, 1. Beratungstermin Fachkonferenz Teilgebiete, 06.02.2021, Online Conference, SG01101/19-3/2-2021#14, (2021).

BÄR, K., REINSCH, T., und BOTT, J.: The PetroPhysical Property Database (P³) – a global compilation of lab-measured rock properties, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, (2020), 2485–2515.

BERTRAND, L., GÉRAUD, Y., und DIRAISON, M.: Petrophysical properties in faulted basement rocks: Insights from outcropping analogues on the West European Rift shoulders, *Geothermics*, 95, (2021), 102144.

BRACKE, R., HUENGES, E., ACKSEL, D., AMANN, F., BREMER, J., BRUHN, D., BUDT, M., BUSSMANN, G., GÖRKE, J.-U., GRÜN, G., HAHN, F., HANSSKE, A., KOHL, T., KOLDITZ, O., REGENSPURG, S., REINSCH, T., RINK, K., SASS, I., SCHILL, E.: ROADMAP TIEFE GEOTHERMIE FÜR DEUTSCHLAND - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende, (2022), 37 pp.

BRITISH STANDARDS INSTITUTIONS: Natural stone test methods, Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity, *BSI*, (2006).

EAVOR: Eavor-Loop Gerretsried, Eavor Deutschland, available at: <https://eavor.de/projekt-geretsried/> (last access 22.04.2025), (2025).

FRANKE, W.: The mid-European segment of the Variscides: Tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution, *Geological Society*, London, Special Publications, 179, (2000), 35–61.

GENTER, A., EVANS, K., CUENOT, N., FRITSCH, D., und SANJUAN, B.: Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS), *Comptes Rendus Geoscience*, 342, 7-8, (2010), 502–516.

JUNGMANN, M., WALTER, B. F., EICHE, E., GIEBEL, R. J., und KOLB, J.: The source of lithium in connate fluids: Evidence from the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France, *Journal of Geochemical Exploration*, 270, (2025), 107641.

KOPPAR RESOURCES: Report SUBSTANTIAL LITHIUM BRINE EXPLORATION TARGET IDENTIFIED AT THE VULCAN LITHIUM PROJECT IN EUROPE, verfügbar unter: <https://www.aspecthuntley.com.au/asxdata/20190820/pdf/02135314.pdf> (last access 22.04.2025), (2019), 1–25.

KRAWCZYK, C. M., und FRANKE, W.: Geophysical constraints on the structure and evolution of the Rhenohercynian Belt in Germany, *Tectonophysics*, 250, (1995), 1–17.

LINNEMANN, U., GERDES, A., KRAFT, P., und HOFMANN, M.: Early Paleozoic evolution of peri-Gondwanan terranes: Constraints from U–Pb dating of detrital zircons, *Geological Society*, London, Special Publications, 219, (2004), 29–46.

MOECK, I., DUSSEL, M., WEBER, J., SCHINTGEN, T., und WOLFGRAMM, M.: Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: A modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability, *Neth. J. Geosci.*, 98, (2019), E14.

PEI, L., RÜHAAK, W., STEGNER, J., BÄR, K., HOMUTH, S., MIELKE, P., und SASS, I.: Thermo-triax: an apparatus for testing petrophysical properties of rocks under simulated geothermal reservoir conditions, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 38, 1, (2015).

REINHOLD, K.: Tiefenlage der "Kristallin-Oberfläche" in Deutschland – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover, (2005), 1–89.

SASS, I., KRUSEMARK, M., SEIB, L., BOSSENNEC, C., PHAM, T. H., SCHEDEL, M., WEYDT, L., BUNESS, H., und HOMUTH, B.: Medium-Deep Borehole Thermal Energy Storage (MD-BTES): from Exploration to District-Heating Grid Connection, Insights from SKEWS and PUSH-IT Projects, *Proceedings 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, USA, 12–14 February 2024, (2024), SGP-TR-227, 1–12.

SEIB, L., FREY, M., BOSSENNEC, C., KRUSEMARK, M., BURSCHILL, T., BUNESS, H., WEYDT, L., und SASS, I.: Assessment of a medium-deep borehole thermal energy storage site in the crystalline basement: A case study of the demo site Lichtwiese Campus, Darmstadt, *Geothermics*, 119, (2024), 102933.

WEYDT, L. M., RAMÍREZ-GUZMÁN, Á. A., POLA, A., LEPILLIER, B., KUMMEROW, J., MANDRONE, G., COMINA, C., DEB, P., NORINI, G., GONZALEZ-PARTIDA, E., AVELLÁN, D. R., MACÍAS, J. L., BÄR, K., und SASS, I.: Petrophysical and mechanical rock property database of the Los Humeros and Acoculco geothermal fields (Mexico), *Earth Syst. Sci. Data*, 13, (2021), 571–598.

WEYDT, L., RAMÍREZ, Á., und SASS, I.: Mineralogical, geochemical and petrophysical rock characterization of the crystalline basement in Germany, *Proceedings European Geothermal Congress 2025*, Zurich, Switzerland, 6–10 October 2025, (2025), 10 pp.