Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Konrad

9KE264500000

Rheologisches Langzeitverhalten der im Endlager Konrad aufgeschlossenen Tonsteine

Ergebnisbericht

Hannover, Januar 2022

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE HANNOVER

Konrad

Bewertung Überwachungsmessungen K onrad

Rheologisches Langzeitverhalten der im Endlager Konrad aufgeschlossenen Tonsteine (Rheological long-term behaviour of claystones developed in Konrad final repository)

Ergebnisbericht

Autoren:	Mayr, Sibylle Irene, PD Dr. habil. Gräsle, Werner, Dr. Hesser, Jürgen, Dr.

Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Datum:	24.01.2022
TK-Nummer:	3828 (Lebenstedt Ost)
Geschäftszeichen:	B3.3/B50142-04/2021-0001/001
Gesamtblattzahl:	66

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis Seite

Verkürzte Zusammenfassung 4

Abstract 5

1 Einleitung 6

2 Mechanisches Deformationsverhalten von Gesteinen 8

2.1 Erklärungsmodelle und Mechanismen 9
2.2 Einführung in das Langzeitdeformationsverhalten 10
2.3 Prüfverfahren zur Bestimmung des Langzeitdeformationsverhaltens 12
2.4 Prinzipielles Verhalten 13

3 Grundsätzliche Überlegungen zum Verformungsverhalten von Tonstein 18

3.1 Initiale Deformation 19
3.2 Auswirkung mechanisch-hydraulischer Kopplung – transiente, abklingende Verformungsanteile aufgrund zeitlich veränderlicher Effektivspannung bei konstanter Totalspannung 20
3.3 Transiente, abklingende Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung 22
3.4 Stationäre Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung 24
3.5 Transiente, progressive Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung und Differentialspannung oberhalb der Schädigungsgrenze 25

4 Mikrostruktuelle Beschreibungsansätze 26

4.1 Textur und Struktur von Tonstein 26
4.2 Interaktion von Korngerüst und Porenfüllung, skalenabhängige Deformationen 29
4.3 Änderung im Korngerüst bei Entlastung 31
4.4 Änderung im Korngerüst bei Belastung 31

4.4.1 Erhöhung der isostatischen Belastung: initiale Verformung und mechanisch-hydraulische Kopplung 31
4.4.2 Erhöhung der Differentialspannung 32
4.4.3 Transiente Verformungsanteile 32
4.4.4 Stationäre Verformungsanteile: Sekundäres Kriechen 33
4.4.5 Transiente, progressive Verformungsanteile: Tertiäres Kriechen 33

Seite

5 Verfügbare Daten 34

5.1 Endlager Konrad 34

5.1.1 Kurzzeitverhalten 35

5.1.2 Langzeitverhalten, Bohrung Konrad 101: Tonsteine aus Alb und Mittelbarrême 35

5.2 Mont Terri + Bure: Deformationsraten und Abhängigkeiten 41

6 Zur Frage der Existenz eines Kriechverhaltens bei Tonstein 42

7 Diskussion 49

8 Zusammenfassung 52

Literaturverzeichnis 54

Abkürzungsverzeichnis 62

Tabellenverzeichnis 63

Abbildungsverzeichnis 64

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren: Mayr, Sibylle Irene, PD Dr. habil.
Gräsle, Werner, Dr.
Hesser, Jürgen, Dr.

Titel: Rheologisches Langzeitverhalten der im Endlager Konrad aufgeschlossenen Tonsteine

Schlagwörter: Endlagerung radioaktiver Abfälle, Geomechanische Laboruntersuchungen, Kriechen, Konsolidierung, Langzeitdeformationsverhalten, Mikrostruktur, Schacht Konrad, Tonstein

Im Schacht Konrad wird das Füllort des Schachtes Konrad 2 auf der 2. Sohle (850 m-Sohle) in der Fladentonstein-Serie mit Zwischenlagen aus Kalkstein mit einer Wechsellagerung aus Mergeltonstein – Mergelstein – Mergelkalkstein errichtet. Ziel dieser Studie war die Recherche nach Labormessdaten zum Langzeitdeformationsverhalten von Fladentonstein bzw. nach Daten, die an vergleichbarem Material gewonnen wurden, um auf dieser Basis Aussagen zum möglichen Langzeitverformungsverhalten des Fladentonsteins treffen zu können. Zum Langzeitdeformationsverhalten von Fladentonsteinen aus dem Bereich des Füllortes liegen keine Labordaten vor, daher werden anhand von Laborergebnissen für jüngere Unterkreidetonsteine (Alb, Barrême aus Konrad 101) sowie für Tonsteine aus den Untertagelaboratorien Bure und Mont Terri die prinzipiell auftretenden drei Phasen des Langzeitdeformationsverhaltens sowie deren Ursachen auf makroskopischer und mikroskopischer Skala erläutert. Diese Phasen beinhalten transiente Kompaktion (Konsolidierung + primäres Kriechen), stationäres sekundäres und beschleunigtes tertiäres Kriechen. Eine statistische Auswertung von Laborversuchen mit Versuchsdauern von ein bis zwei Jahren weist auf eine mögliche stationäre (sekundäre) Kriechrate hin. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die am Füllort aufgeschlossenen Fladentonsteine ist aufgrund vielfältiger Einflussgrößen nur qualitativ und nicht quantitativ möglich.

Abstract

Authors: Mayr, Sibylle Irene, PD Dr. habil.
Gräsle, Werner, Dr.
Hesser, Jürgen, Dr.

Title: Rheological long-term behaviour of claystones developed in Konrad final repository

Subject terms: consolidation, creep, Konrad mine, geomechanical laboratory studies, long-term deformation behavior, microstructure, mudstone, radioactive waste disposal

In the Konrad mine, the transfer station at Konrad 2 is constructed on the 2nd level (850 m level) in the Fladentonstein series with intermediate layers of limestone, marl- and claystones. The aim of this study was to search for laboratory data on the long-term deformation behaviour of claystone developed at the transfer station or data obtained on any comparable material in order to be able to make statements on the possible long-term deformation behaviour of Fladentonstein on this basis. No laboratory data are available on the long-term deformation behaviour of claystone from the area of the transfer station. Therefore, laboratory results for younger lower Cretaceous claystones (Alb, Barrême from Konrad 101) as well as for claystones from the underground laboratories Bure and Mont Terri are used to explain the three principal phases of long-term deformation behaviour and their origins on a macroscopic and microscopic scale. These phases comprise transient compaction (consolidation + primary creep), stationary secondary and accelerated tertiary creep. A statistical evaluation of laboratory tests with durations of one to two years indicates a possible stationary (secondary) creep rate. Due to the influence of various variables, the results can only be applied to the claystone developed at the transfer station in a qualitative way, and not in a quantitative one.

1 Einleitung

Das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad wird aktuell für die Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen umgebaut. Für den Zeitraum der Betriebsphase, die über ca. 40 Jahre angesetzt ist, soll der Ausbau der Grubenräume möglichst wartungsfrei ausgeführt werden (BGE 2021, Herold et al. 2020). Das Füllort der 2. Sohle des Schachtes Konrad 2 (850 m-Sohle) wird erweitert und ausgebaut und befindet sich teilweise im Ton des Malm (Unterer Korallenoolith), vgl. Abb. 1 und (Stahlmann et al. 2014, Herold et al. 2020).

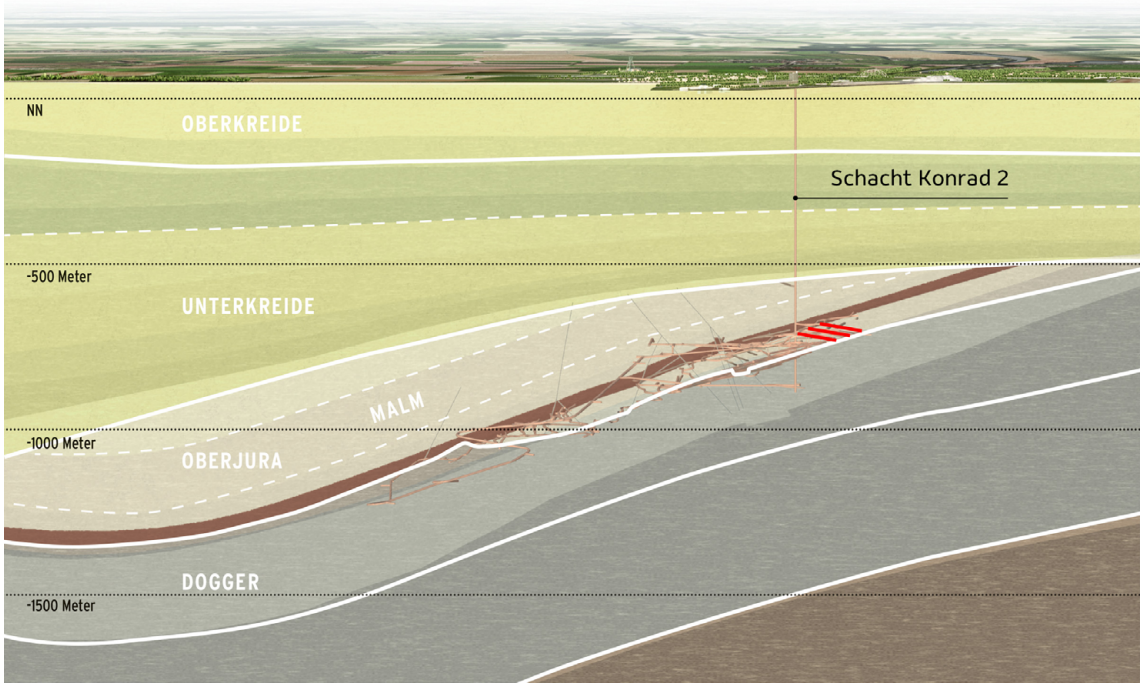

Abb. 1: Vereinfachter geologischer West-Ost-Schnitt im Bereich des Schachtes Konrad 2 (BGE 2021).

Dort sind Gesteine aus der Trümmerkalk-Serie, der Fladentonstein-Serie und der Erzkalk-Serie aufgeschlossen. Die Fladentonsteine haben eine geringere Festigkeit als die kalksteinhaltigen Gesteine (Stahlmann et al. 2014, DBE 2017). Darüber hinaus ist bei der Fladentonstein-Serie von zeitlich veränderlichen Verformungen auszugehen (Stahlmann et al. 2014, Gudehus 2014, DBE 2017).

Laut DBE (2017) besteht die ca. 15 m bis 18 m mächtige Schicht der Fladentonstein-Serie aus grauem, bis dunkelgrau-schwarzem, wasserempfindlichem, teils feinschichtigem, gebändertem Tonstein bis Ton-Mergelstein, welcher von kalkigen Lagen durchzogen ist (Abb. 2). Schichtgebunden treten im Liegend- und Hangendbereich bräunliche Toneisenstein-Fladen und z. T. kalkoolithische Nester auf. Das Gestein wird als bituminös und bereichsweise von feinstverteiltem Pyrit durchsetzt beschrieben (DBE 2017). Neben

der Feinschichtung wird auf einen hohen Durchtrennungsgrad sowie das insbesondere in Störungszonen auftretende kleinstückige, prismatische Zerfallen des Gesteins an der Stoßoberfläche hingewiesen.

Abb. 2: Konrad Schacht 2: Fladentonstein-Serie Füllorterweiterung 2. Sohle (BGE/Goyer 2021*)*.

Aus bergbaulicher Sicht ist Tonstein aufgrund seiner gekoppelten thermisch-hydro-mechanischen Eigenschaften grundsätzlich herausfordernd. Für die Beurteilung der langfristigen Entwicklung untertägiger Hohlräume in Tonsteinen und für die Bemessung eines erforderlichen Streckenausbaus sind die über die gesamte Lebensdauer des Grubenbaus zu erwartenden Belastungen sowie das Langzeitdeformationsverhalten des aufgeschlossenen Gebirgsbereiches im Zusammenhang mit den daraus resultierenden Änderungen der Gesteinseigenschaften zu berücksichtigen. Dabei ist u. a. von entscheidender Bedeutung, ob bei den aufgeschlossenen Tonsteinen mit einem Kriechverhalten[1] gerechnet werden muss. Vor diesem Hintergrund besteht Untersuchungsbedarf bezüglich des rheologischen[2] Verhaltens der Tonsteine. Zu diesem Zweck war zunächst die Frage zu klären, ob es entsprechende Labormessdaten gibt, die in der Vergangenheit an Tonsteinen aus Schacht Konrad gewonnen wurden. Die Datenbankrecherche ergab, dass das Langzeitdeformationsverhalten

[1] Durch unterschiedliche Belastungen hervorgerufene langanhaltende Deformationen, beschrieben durch das Langzeitdeformationsverhalten.

[2] Rheologie bezeichnet die Lehre und Wissenschaft des Fließ- und Deformationsverhaltens materieller Systeme (DRG 2021).

von Gesteinen aus der Fladentonstein-Serie bisher nicht im felsmechanischen Labor der BGR untersucht wurde. Ergebnislos blieb auch eine Literaturrecherche bezüglich entsprechender Untersuchungen und Erkenntnisse anderer Laboratorien. Daher wurde diese Studie um prinzipielle Überlegungen zum Thema rheologisches Deformationsverhalten von Tonstein ausgedehnt. Dieser Bericht erläutert die Grundlagen, die zur Bewertung des Langzeitdeformationsverhaltens von Tonsteinen notwendig sind. Es erfolgt eine detaillierte Darstellung der zu erwartenden Verformungsmechanismen mit Beispielen von Langzeitdeformationsversuchen für Gesteinsproben aus dem Deckgebirge der Schachtanlage Konrad und den Untertagelaboratorien Mont Terri und Bure. In der Diskussion wird auch auf Einflüsse von geologischen und geometrischen In-situ-Bedingungen eingegangen, die in kleinskaligen Laborversuchen prinzipiell nicht bestimmt werden können.

2 Mechanisches Deformationsverhalten von Gesteinen

Das mechanische Deformationsverhalten von Gesteinen im Allgemeinen, sowie Tonen und Tonstein im Speziellen, ist die Reaktion auf mechanische Belastung oder Beanspruchung. Die Reaktion variiert je nach Art der Belastung und wird durch unterschiedliche Kennwerte beschrieben. Die im Labor zur Bestimmung des mechanischen Deformationsverhaltens aufgebrachte Belastung kann kurz-, mittel- oder auch sehr langfristig sein und ist abhängig von den zu untersuchenden Prozessen. So ändert sich die notwendige Belastung bei der seismischen Wellenausbreitung[3] im Bereich von Bruchteilen von Sekunden; bei der Bestimmung der quasi-statisch bestimmten elastischen Eigenschaften[4] ändert sich die notwendige Belastung im Bereich von Minuten, bei der Bestimmung des Bruchverhaltens[5] im Bereich von Minuten bis Stunden. Bei der Bestimmung des Langzeitdeformationsverhaltens beträgt die notwendige Belastungszeit im Labor hingegen Tage bis Jahre.

[3] Gemessen werden die seismischen Geschwindigkeiten, aus diesen lassen sich für isotrope Gesteine der Elastizitätsmodul, die Poissonzahl oder der Kompressionsmodul und der Schermodul berechnen z. B. Blake et al. (2013). Diese werden als „dynamisch bestimmte Moduli“, kurz oder auch kurz als „dynamische Module“ bezeichnet. Für anisotrope Gesteine können die Komponenten des Elastizitätstensors bestimmt werden.

[4] Gemessen werden je nach Versuchsdurchführung der Elastizitätsmodul (z. B.Czaikowski 2011, Boley 2012), die Poissonzahl, der Kompressionsmodul oder der Schermodul. Diese werden als „statisch bestimmte Moduli“, oder auch kurz „statische Moduli“ bezeichnet.

[5] Gemessen werden Parameter, welche das plastische Bruchverhalten und Nachbruchverhalten beschreiben, wie die Scherfestigkeit, die üblicherweise durch die Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung charakterisiert werden.

Bei den unterschiedlichen Versuchen werden die Proben auf Kompression[6], Extension, auf direkte[7] oder indirekte[8] Scherung belastet. Auch die Amplitude der aufgebrachten Kräfte variiert stark: am kleinsten ist die Amplitude bei der seismischen Wellenausbreitung und am größten bei den Bruchversuchen. Entsprechend der Belastungsdauer und Amplitude variiert die Dauer der Reaktion des Tonsteins auf die Belastung. Dementsprechend werden auch unterschiedliche Größen zur Quantifizierung des mechanischen Verhaltens verwendet: Aus seismischen Geschwindigkeiten werden dynamisch bestimmte Moduli berechnet, aus quasi-statischen Versuchen die statisch bestimmten Moduli sowie aus Bruchexperimenten die Festigkeitsparameter. Die dynamisch und statisch bestimmten Moduli unterscheiden sich i. A. signifikant bezüglich ihrer Größe. Da aber beide von den mechanischen Eigenschaften des Gesteins abhängen, korrelieren die dynamischen Moduli durchaus mit den statischen Moduli und geben Hinweise auf den Zustand des Gesteins. Zur Quantifizierung des Deformationsverhalten bei langanhaltender Belastung werden meist sogenannte „Kriechversuche“ durchgeführt, d. h. die Verformungsentwicklung wird an Prüfkörpern bei konstanter Belastung erfasst und anschließend eine sogenannte „Kriechrate“ als Deformationsänderung pro Zeiteinheit (Deformationsrate) ermittelt.

2.1 Erklärungsmodelle und Mechanismen

Zur phänomenologischen Beschreibung des zeitabhängigen mechanischen Deformationsverhaltens von Material wird prinzipiell zwischen drei Arten des rheologischen Verhaltens unterschieden, die jeweils mit einfachen Modellen beschrieben werden können:

– elastisches Verhalten (reversibel, spannungsabhängig; Feder),

– plastisches Verhalten (bleibende Deformation, Grenzspannung, Gleitelement; St. Venant) und

– viskoses Verhalten (Deformationsverhalten in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit, zähes Fließverhalten, Dämpfer (Newton)), z. B. Witt (2017).

Beliebige Kombinationen der drei Arten sind möglich, z. B. elasto-plastisches oder visko-plastisches Verhalten.

In Abgrenzung zu einer rein phänomenologischen Beschreibung des mechanischen Verhaltens sind bei einer deterministischen Charakterisierung gesteinsspezifische

[6] Belastung mit isostatischem Druck, bei dem alle Hauptspannungen gleich sind, z. B. gleicher Manteldruck und Axialdruck beim Triaxialversuch). Zugspannungen (Extension) treten beim Zugversuch auf.

[7] Belastung auf Scherung, z. B. im Scherversuch.

[8] Z. B. uniaxialer oder triaxialer Prüfstand.

Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Alle mechanischen Eigenschaften eines Gesteins und auch deren Zeitabhängigkeit hängen von den unterschiedlichsten Faktoren ab: den Eigenschaften und dem Anteil der Bestandteile des Gesteins, der inneren Anordnung der Bestandteile (Korngröße und -form, i. e. Textur; Anordnung der Körner, Form der Hohlräume, d. h. Struktur), den Eigenschaften möglicher Porenfluide (Gas, Flüssigkeit oder Gemische daraus) und den Eigenschaften der Grenzflächen zwischen den Bestandteilen. Des Weiteren beeinflussen die thermodynamischen Zustände (Spannungsbedingungen in der festen Phase, Poren(fluid)druck, Temperatur) das zeitabhängige mechanische Verhalten, da diese z. B. die Eigenschaften der Grenzflächen beeinflussen, z. B. Schön (2010).

Die mechanischen Eigenschaften lassen sich durch Messungen ermitteln und hängen entscheidend vom aktuellen Zustand des Tonsteins (z. B. Grad der Verdichtung, Schädigung) und damit von der Belastungsvorgeschichte ab. Die Auswirkungen der thermodynamischen Zustände lassen sich theoretisch behandeln. Optische Analysen (REM, Mikroskop) von Fotos und Dünnschliffen geben Hinweise über die Menge der Bestandteile, deren innere Anordnung, der Grenzflächeneigenschaften sowie Änderungen der Anordnung der mikroskopischen Bausteine (Minerale).

2.2 Einführung in das Langzeitdeformationsverhalten

Die Beschreibung des Langzeitdeformationsverhaltens kann phänomenologisch auch unter Berücksichtigung logischer Einschränkungen erfolgen. So kann z. B. der Tonstein nur so weit komprimiert werden, bis die Porosität null ist. Die Beschreibung kann mittels unterschiedlicher Stoffmodelle erfolgen: neben den oben angeführten Modellen können dies Modelle sein, die entweder auf makroskopischen Betrachtungsweisen wie der Berechnung von thermodynamischen Zuständen basieren, z. B. unter Berücksichtigung der mechanisch hydraulischen Kopplung (Abschnitt 3.2) oder auf Betrachtungen des Aufbaus und der Struktur des Tonsteins im mikroskopischen Größenbereich (Kapitel 4) basieren.

Bei einer konstanten, von aussen aufgebrachten Totalspannung σ_{tot} wird eine Probe zunächst kompaktiert, das Volumen verringert sich. Diese transiente Kompaktion umfasst sowohl eine Konsolidierung als auch ggf. Beiträge eines primären Kriechens. Führt die Lastaufbringung zum Auftreten von erhöhten Porendrücken p_{por} (Druck im Porenfluid), dann setzt unter bestimmten Umständen (z. B. bei drainierten Versuchen oder Heterogenitäten in der Tonsteinprobe) eine Bewegung des Porenfluids ein, durch die der Porendruck mit der Zeit wieder abnimmt.

Die Verformung aufgrund der dadurch eintretenden zeitlichen Änderung der Effektivspannungen σ_{eff}

$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - p_{por} \tag{1}$$

wird als Konsolidierung bezeichnet. Durch Drainage an den Endflächen der Probe entsteht in der Probe ein zeitlich begrenzter Druckgradient: im Inneren der Probe ist der Porendruck am höchsten, an den drainierten Flächen der Proben ist er gleich dem Außendruck, z. B. dem Atmosphärendruck. Diese mit makroskopischen Parametern beschreibbare inhomogene Druckverteilung in der Probe nimmt mit der Zeit ab (Abschnitt 3.2), da allmählich ein Druckausgleich des höheren Druckes im Inneren der Probe auf das Niveau des Außendruckes erfolgt. Aufgrund der geringen Permeabilität von Tonsteinen dauert dieser Prozess sehr lange. Für Tonstein ist die Belastungsgeschwindigkeit unter Laborbedingungen im Allgemeinen schneller als der permeabilitätsabhängige Druckausgleich durch Drainage erfolgen kann. Neben der Konsolidierung kommt es gleichzeitig zu strukturellen Veränderungen im Korngerüst (Rissschliessung und Equilibrierung „innerer Zustandsgrößen“, vgl. Abschnitt 3.3). Diese als „primäres Kriechen“ bezeichneten Veränderungen treten auch bei konstanten Effektivspannungen auf und führen zu einer zeitlich variablen Deformationsrate in Verbindung mit einer Volumenabnahme. Bei flüssigkeitshaltigen Tonsteinen kann eine Kompaktion de facto nie allein aus primärem Kriechen erfolgen, sondern wird immer auch Beträge aus der Konsolidierung enthalten.

Im Gegensatz zur Kompaktion ist das sekundäre Kriechen durch volumeninvariante Veränderungen im Korngerüst begründet, die durch Scherkräfte hervorgerufen werden.

Das tertiäre Kriechen führt zu einer Volumenzunahme und ist in strukturellen Veränderungen im Korngerüst begründet: Durch Scherkräfte entstehen weitere Risse, die sich bei andauernder Last vergrössern und verbinden und schließlich eine oder mehrere Bruchflächen bilden. Die Spannungsverhältnisse im Gestein beeinflussen die Bildung und das Schließen von Mikrorissen oder die Einregelung von Mineralen/Mineralkörnern.

2.3 Prüfverfahren zur Bestimmung des Langzeitdeformationsverhaltens

Grundsätzlich eingesetzte Verfahren zur Bestimmung des Langzeitdeformationsverhaltens sind der Ödometerversuch[9] für Böden sowie uniaxiale und triaxiale Kriechversuche[10] für Festgesteine. Bei den im Folgenden beschriebenen Messungen des Langzeitdeformationsverhaltens werden Zugbeanspruchung und Relaxationsvorgänge nicht betrachtet, obwohl sie in situ auftreten können.

Der Ödometerversuch wird vornehmlich bei der systematischen und quantitativen Bestimmung des Langzeitsetzungsverhaltens von Böden (z. B. Boley 2012, Zilch et al. 2013, Kolymbas 2019) eingesetzt. Darüber hinaus eignet er sich dazu, prinzipielle Abhängigkeiten von unterschiedlichen Einflussparametern zu untersuchen. Der Versuchsaufbau wird für systematische Untersuchungen des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus als Material für geotechnische Barrieren (z. B. Kröhn et al. 2017, Hansen et al. 2014) wie auch bei der systematischen und quantitativen Bestimmung des Langzeitsetzungsverhaltens von Böden (z. B. Boley 2012, Zilch et al. 2013, Kolymbas 2019) genutzt. Für den Einwirkungsbereich von untertägigen Grubenräumen gibt der Lastfall des Ödometerversuchs die Situation nur sehr eingeschränkt wieder. Für die Untersuchung des Langzeitdeformationsverhaltens von Tonsteinen für Untertageanwendungen sind daher Ergebnisse von uniaxial- und triaxial-Kriechversuchen zu nutzen, wie sie auch für Salz Anwendung finden, z. B. Hunsche (1994). Da Tonstein ein anisotropes Gestein ist, muss bei der Prüfkörperherstellung und dem Einbau in die Prüfzelle die Richtung der Schichtung zur Belastungsrichtung beachtet werden. Anwendung finden senkrecht zur Schichtung präparierte S-Proben, parallel zur Schichtung präparierte P-Proben (z. B. Gräsle et al. 2019) sowie Prüfkörper mit schräg einfallender Schichtung (Z-Proben).

Bei Tonstein haben die Sättigung und der Porendruck p_{por} (Druck in dem Porenfluid) einen signifikanten Einfluss auf die Belastungsreaktion der Probe. Aufgrund der sogenannten mechanisch-hydraulischen Kopplung sind neben den mechanischen Messwerten auch die hydraulischen Werte wie Porendruck und Sättigung vor Versuchsbeginn zu bestimmen und deren Änderungen idealerweise während des Versuchs zu erfassen. Daher werden Versuche idealerweise in Triaxialzellen durchgeführt, bei denen die Probe ummantelt ist und zusätzlich hochdurchlässige Filterplatten an den Stirnflächen zur Drainage angebracht

[9] Im Ödometerversuch ist eine Seitendehnung des Probenmaterials versuchstechnisch unterbunden. Eine Drainage der Proben ist aber für die Durchführung von systematischen Untersuchungen möglich. Die Spannung in radialer Richtung ergibt sich aus der axialen Druckspannung, der bodenspezifischen Querdehnung und der Reibung zwischen Material und Ödometerwandung. Da sich die Probe nur in axialer Richtung deformieren kann, wird das Deformationsverhalten von Boden unter „eindimensionaler Deformation“ bestimmt. Es treten im Ödometerversuch auch Scherspannungen auf.

[10] Tonstein (wie auch jedes andere Festgestein) lässt sich rein technisch nicht ohne weiteres optimal in ein Ödometer einbauen, da er nicht plastisch genug ist, um eine gute Ankopplung an die Wände zu gewährleisten. Im Triaxialversuch können aber die Spannungsverhältnisse, die auch im Ödometerversuch herrschen, gewählt werden.

sind. Ggf. sind an den Probenendflächen Drucksensoren zur Erfassung und Kontrolle des Porendruckes angebracht. Mit dieser Anordnung der Drucksensoren ist allerdings nur die Ermittlung des Druckgradienten über die gesamte Probenlänge möglich. Die Druckverteilung innerhalb einer Probe kann dagegen nicht erfasst werden.

Bei den triaxialen Kriechversuchen wird zunächst die Belastung der Probe isostatisch (Manteldruck und axiale Belastung) erhöht, die Probe nur auf Kompression belastet. Anschließend werden bei konstantem Manteldruck diskrete Laststufen[11] (Differentialspannungen) gefahren, die über jeweils längere Zeiten konstant gehalten werden. Die aufgebrachten Druckspannungen σ_{max} und σ_{min} sind Totalspannungen σ_{tot}. Im Triaxialversuch ist die minimale Totalspannung der Manteldruck, d. h. die Spannung in radialer Richtung $\sigma_{rad} = \sigma_{min}$, und die maximale Totalspannung die Spannung in axialer Richtung (parallel zur Probenachse) $\sigma_{ax} = \sigma_{max}$. Die Different(ial)spannung σ_{diff} ergibt sich als die Differenz zwischen maximaler und minimaler Spannung $\sigma_{diff} = \sigma_{max} - \sigma_{min}$. Die Differentialspannungen führen in der Probe zu Scherspannungen, d. h. die Proben werden auf Scherung belastet. Eine Deformation in radialer Richtung ist in Abhängigkeit von der Größe des Manteldruckes möglich. Bei geeigneter Wahl der Mantelspannung kann die Deformation in radialer Richtung aber auch vermieden werden. In der Gesteinsprobe selbst wirkt die um den Porendruck reduzierte effektive Spannung, siehe Gleichung (1). Detailliertere Ausführungen zur mechanisch-hydraulischer Kopplung sind in Abschnitt 3.2 beschrieben.

2.4 Prinzipielles Verhalten

Bei drainierten Setzungsversuchen im Ödometer, wie auch in der Triaxialmesszelle, wird zunächst eine instantan einsetzende „Sofortsetzung“ beobachtet, auch Initialsetzung genannt, gefolgt von einer Setzung, deren Zunahme anfänglich relativ groß ist und mit der Zeit stetig abnimmt (z. B. Kolymbas 2019, Zilch et al. 2013). Im Anschluss kann es auch zu einer weiteren Sekundärkonsolidation kommen (siehe Abb. 3), z. B. Boley (2012, Bild 2-24) und Kavazanjian & Mitchell (1980). Die Deformation nimmt einen konstanten Wert an, wenn die Setzung zum Stillstand kommt.

[11] Laut DGGT-Empfehlung (Hunsche 1994) wird eine Belastungsgeschwindigkeit (Änderung der Spannung/Zeit) von ca. 1MN/m²/min = 1MPa/min vorgeschlagen.

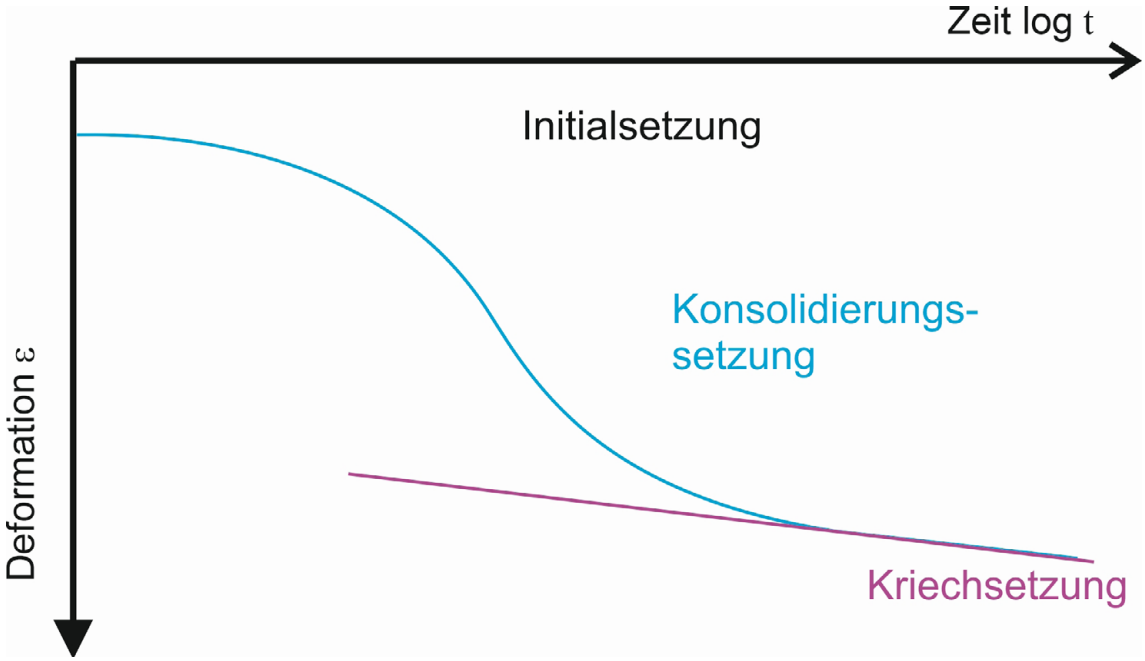

Abb.3: Schematische Darstellung einer Zeitsetzungslinie, die im Ödometer in einem endlichen Zeitraum gewonnen wurde. Im verwendeten halblogarithmischen Maßstab ist die Zeit logarithmisch und die Deformation linear dargestellt. Die nach Gleichung (2) angenäherte „Kriech-"Setzung ist nicht in unendliche Zeiten zu extrapolieren, da es zu negativen Porenzahlen führen würde, näheres siehe Text. Abbildung nach z. B. Boley (2012).

Für den Bereich der Sekundärkonsolidation (Kriechsetzung) kann die zeitliche Änderung der Porenzahl e (= Verhältnis Porenvolumen/Feststoffvolumen) mit einer logarithmischen Deformationsrate mit dem Kriechbeiwert

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \tag{2}$$

angenähert werden, d. h. die Deformationsrate sinkt zunächst sehr schnell und kann für lange Zeiten mit $1/t$ angenähert werden, siehe Abb. 4.

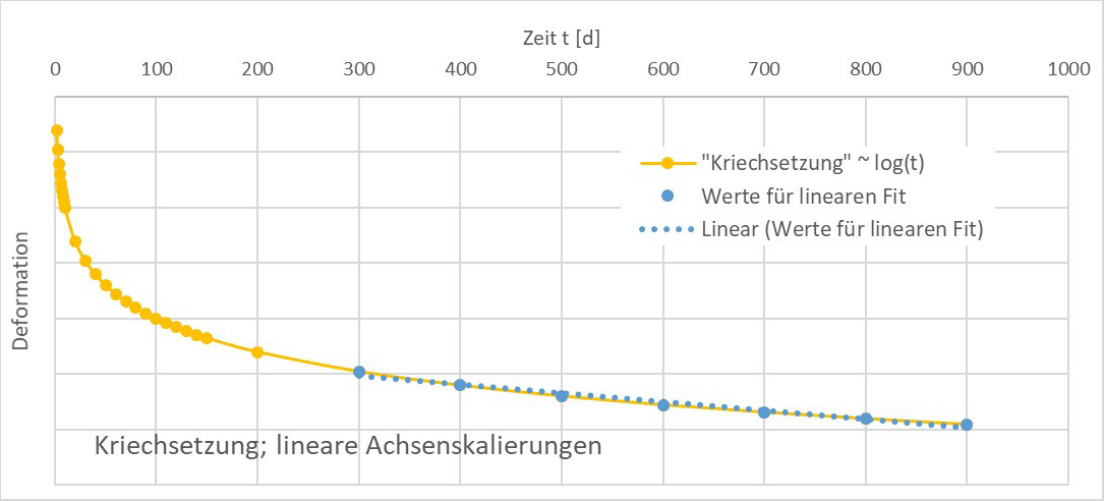

Abb. 4: Darstellung einer nach Gleichung (2) berechneten Kriechsetzung. Die in blau dargestellten Punkte der nichtlinearen Kurve sind durch einen linearen Fit angepasst worden. Die Abweichung ist kaum zu erkennen.

Im Ödometerversuch würde eine durch Gleichung (2) definierte Deformationsrate bei langer Versuchsdurchführung zu einer physikalisch sinnlosen theoretisch negativen Probenzahl führen. Dies bedeutet, dass bei längerer Versuchsdurchführung der Prozess bei begrenztem Volumen zum Stillstand kommen muss. Obwohl mit dem Ödometerversuch das Langzeitdeformationsverhalten über Jahrzehnte nicht untersucht werden kann, sind auf Grundlage der Versuche prinzipielle Abhängigkeiten abzuleiten z. B. ist eine Korrelation des Kriechbeiwertes mit dem Wassergehalt festzustellen (z. B. Boley 2012). Dieses impliziert, dass auch das Langzeitdeformationsverhalten von dieser Größe abhängen kann.

Wie bei dem Ödometerversuch wird beim triaxialen Kriechversuch nach Beanspruchungsbeginn zunächst eine initiale Deformation mit einer Abnahme der Porenzahl beobachtet. Diese teils elastische und teils plastische instantane Verformung wird gefolgt von einer nichtlinearen, transienten Übergangsdeformation. Es wird vermutet (z. B. Simmer 1994, Lacasse & Berre 2005, Frieling et al. 2019), dass sich in der weiteren zeitlichen Entwicklung eine stationäre Deformationsphase mit konstanter Deformationsrate (sekundäres Kriechen) einstellt (Abb.5). Die Feststellung des Erreichens eines stationären Deformationsverhaltens stellt i. A. eine schwierige und sehr oft fehleranfällige Aufgabe dar. Allein anhand der Betrachtung gemessener $\varepsilon(t)$-Verläufe ist eine Feststellung des Erreichens einer stationären Deformationszunahme praktisch nicht möglich, da unser Auge sehr schnell einen „linearen Kurvenabschnitt“ diagnostiziert, wo in Wahrheit immer noch eine leichte Krümmung vorliegt, vgl. Beispiel in Abb. 4 und siehe Kapitel 6. Alternativ ist nach der transienten Übergangsdeformation keine weitere Verformung erkennbar, eine beanspruchungsabhängige Endverformung ist erreicht.

Bei hohen Differentialspannungen wird die Probe verstärkt auf Scherung belastet und es kann hierdurch zu einem weiteren transienten Deformationsverhalten (tertiäres „Kriechen“) kommen, z. B. Simmer (1994), Mitchell (1976) in Lacasse & Berre (2005), Rybacki et al. (2017), das unter zunehmender Schädigung der Probe mit einhergehender Ausbildung von (Mikro-) Rissen und steigender Deformationsrate zum Kriechbruch führt.

Die Beobachtungen variieren je nach angelegter Differentialspannung und Gesteinsart. In Abb. 5 sind beispielhaft drei mögliche Varianten für das Langzeitdeformationsverhalten von Tonstein skizziert:

– Nach Belastungsbeginn tritt ein mit der Zeit abnehmendes transientes Kriechen auf (blauer dargestellter Abschnitt der Kurven).
– Sind die angelegten Differentialspannungen unter einer eventuell vorhandenen „Kriechgrenze“, oder handelt es sich um ein Gestein mit geringem oder fehlen dem Kriechvermögen, tritt danach keine weitere Deformation mehr auf (schwarzer Abschnitt der unteren Kurve).
– Ist dagegen ein Kriechvermögen vorhanden, oder überschreitet die Beanspruchung eine potenzielle Kriechgrenze, dann wird sekundäres Kriechen beobachtet (in Rot dargestellter Abschnitt der beiden oberen Kurven).
– Das tertiäre Kriechen oder der Bruch nach beschleunigter Verformung (grüner, gestrichelt dargestellter Abschnitt) tritt bei Differentialspannungen oberhalb einer gesteinsspezifischen Schädigungs- oder Dilatanzgrenze auf.

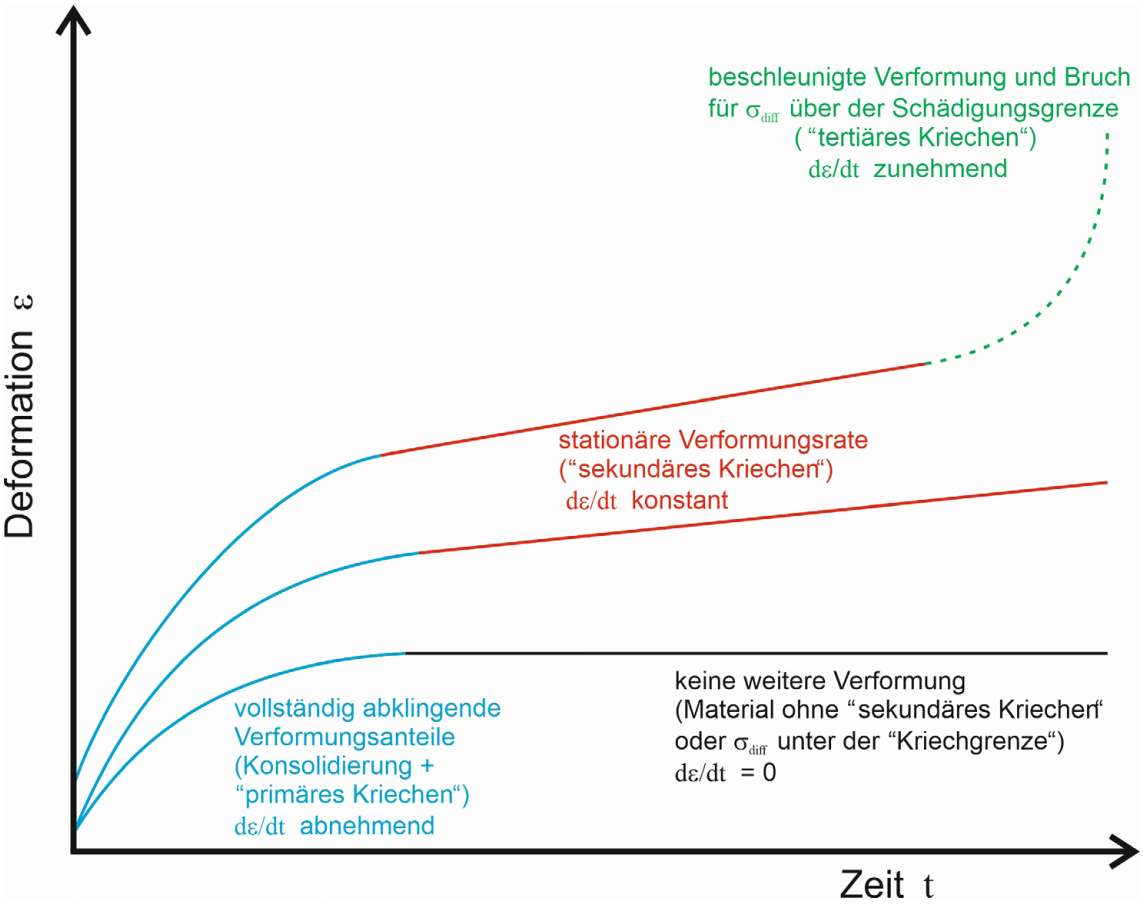

Abb. 5: Prinzipskizze zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonen und Tonsteinen bei konstanter Spannung, siehe z. B. Simmer (1994), Lacasse & Berre (2005), Frieling et al. (2019) und Text.

Der zeitliche Verlauf der Deformation hängt unter anderem auch von der Probenlänge l ab. Der Zeitbedarf des Konsolidierungsprozesses skaliert ungefähr mit l^2, wenn die Proben nur über die Stirnflächen drainiert werden. Laufende Versuche der BGR an niedrig permeablem Opalinuston aus Mont Terri zeigen, dass der transiente Deformationsprozess Wochen oder sogar viele Monate dauern kann (bei Proben mit einer Länge von $l = 20$ cm). Eine detaillierte Betrachtung der Deformationsprozesse enthält Abschnitt 3.2. In situ skaliert der Zeitbedarf des Konsolidierungsprozesses mit der Schichtmächtigkeit und den Bedingungen, die eine Entwässerung ermöglichen bzw. unterstützen.

Im Gegensatz hierzu werden im Rahmen der Forschung zur Erdölförderung Laborversuche zum Kriechverhalten mit Versuchsdauern von nur wenigen Tagen durchgeführt (z. B. Chang & Zoback 2009, Rybacki et al. 2017, Geng et al. 2018). Bei diesen Versuchen werden kleine und teilgesättigte Prüfkörper verwendet und der Manteldruck über Gas aufgebracht. Die Autoren beschreiben auch für diese Versuche die Existenz der drei oben beschriebenen verschiedenen Bereiche (transiente Kompaktion, stationäres sekundäres Kriechen, beschleunigtes tertiäres Kriechen). Durch Verwendung von kleineren und von teilgesättigten Proben lässt sich zwar die Dauer der Konsolidierung verkürzen, die Dauer eines primären „Kriechens“ dagegen nicht. Es ist dahingegen schwerlich nachzuvollziehen, wie bei den Belastungszeiten von wenigen Tagen eine stationären Kriechphase zu erkennen ist, vgl. auch Darstellung in Abb. 4. Diese oben zitierten Versuche lassen unserer Meinung nach keine Rückschlüsse auf die mögliche Größenordnung des Deformationsverhaltens für einen Zeitraum von Jahrzehnten zu. Allerdings geben sie Hinweise auf prinzipielle Abhängigkeiten: So zeigen sie, dass die Erhöhung des Manteldruckes (auch „Stützdruck“ genannt) zu einer Verringerung der gemessenen Deformation, d. h. zu einer Stabilisierung der Probe führt, wogegen die Erhöhung der Temperatur und der Differentialspannung in einer Erhöhung der gemessenen Deformation resultiert.

3 Grundsätzliche Überlegungen zum Verformungsverhalten von Tonstein

Im Folgenden sollen unterschiedliche Formen des Verformungsverhaltens näher beschrieben werden, die bei Gesteinen auftreten können und insbesondere für die Interpretation von Langzeitbelastungsversuchen (oft als Kriechversuche bezeichnet) relevant sind, also von uniaxialen oder triaxialen Kriechversuchen mit konstanter Totalspannung. Da einerseits die Deformationsmechanismen bei Tonstein bislang nicht hinreichend verstanden sind, und andererseits Begriffe wie „Kriechen“ oder „viskoses Verhalten“ oft mit bestimmten Vorstellungen über die zugrundeliegenden Deformationsmechanismen verbunden werden, sollen die unterschiedlichen Formen des Verformungsverhaltens hier mittels rein phänomenologischer Charakterisierung definiert werden, ohne den Anspruch ein bestimmtes mechanistisches Prozessmodell damit zu verbinden.

Da für die Betrachtung des Langzeitdeformationsverhaltens Prozesspfade, bei denen die Differentialspannung die Kurzzeitfestigkeit erreicht und damit zum Bruch führt, nicht von Interesse sind, werden alle mit Kurzzeitfestigkeit oder mit Nachbruchverhalten verbunden Aspekte hier nicht diskutiert.

Im Hinblick auf eine mögliche phänomenologische Charakterisierung von Verformungstypen können z. B. nachfolgend aufgeführte Deformationsmechanismen oder Deformationsphasen

unterschieden werden, die nicht unbedingt getrennt bzw. nacheinander auftreten, sondern auch überlagert auftreten können:

– Initiale Deformation beschreibt nicht eine Deformation bei konstanter Totalspannung, sondern die instantane Reaktion bei Belastungsbeginn.

– Transiente, abklingende Deformation aufgrund zeitlich veränderlicher Effektivspannung bei konstanter Totalspannung (die zeitliche Änderung der Effektivspannung ergibt sich aus Porendruckänderungen infolge allmählicher Drainage). Diese wird oft als „Konsolidierung“ bezeichnet.

– Transiente, abklingende Deformation bei konstanter Effektivspannung wird oft als „primäres Kriechen“ bezeichnet.

– Stationäre Deformation tritt bei konstanter Effektivspannung auf und wird oft als „sekundäres Kriechen“ bezeichnet.

– Transiente, progressive Deformation bei konstanter Effektivspannung und Differentialspannung oberhalb einer Schädigungsgrenze führt letztlich zum („Kriech“-) Bruch und wird oft als „tertiäres Kriechen“ bezeichnet.

Nachfolgend werden diese Verformungstypen genauer charakterisiert.

3.1 Initiale Deformation

Bei Änderung des Spannungszustands reagieren Gesteine mit einer sofortigen Deformation. In Abb. 5 ist die initiale Deformation als Wert der Verformungskurve unmittelbar nach Lastaufbringung ($t = 0$) zu erkennen. Zur initialen Deformation können sowohl elastische (reversible) als auch plastische (irreversible) Verformungsanteile beitragen. Dabei ist die Größe der plastischen Verformungsanteile stark von der zurückliegenden Belastungshistorie abhängig. Während bei erstmaliger Belastung plastische Verformungen oft dominieren, kann das Materialverhalten bei Wiederbelastung weitgehend (oft praktisch vollständig) elastisch sein. Im Labor der BGR wurde bei Versuchen an Tonsteinproben mit vielen Belastungs-Zyklen mit Differenzspannungen auch in den Wiederbelastungspfaden immer ein plastischer (instantan irreversibler) Verformungsanteil beobachtet.

Bei Gesteinen, die (so gut wie) keine zeitabhängigen Verformungsprozesse zeigen (z. B. Kristallin), entspricht die initiale Deformation der instantanen Einstellung eines Gleichgewichts zwischen Spannungs- und Verformungszustand.

3.2 Auswirkung mechanisch-hydraulischer Kopplung – transiente, abklingende Verformungsanteile aufgrund zeitlich veränderlicher Effektivspannung bei konstanter Totalspannung

Wurde im Abschnitt 3.1 die initiale Deformation als instantane, elasto-plastische Reaktion auf die Änderung des Spannungszustands beschrieben, so ist dies eine vereinfachende Darstellung, die für Gesteine, in denen mechanisch-hydraulische Kopplung eine relevante Rolle spielt (also insbesondere Tonstein), eine weitere Präzisierung erfordert.

Grundlegend für diese Präzisierung sind das Konzept der effektiven Spannung (Terzaghi 1925) oder dessen Erweiterung in der poroelastischen Theorie (Biot 1941). Nach der poroelastischen Theorie ist die Verformung nicht in Abhängigkeit von der totalen Spannung, sondern in Abhängigkeit von der effektiven Spannung zu beschreiben. Die effektive Spannung, als die von der festen Gesteinsmatrix getragene Spannung, ergibt sich nach Biot (1941) als:

$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - \alpha \; p_{por} \tag{3}$$

mit σ_{tot} = totale Spannung
σ_{eff} = effektive Spannung
p_{por} = Porendruck (ungesättigt als Saugspannung <0)
α = Biot-Koeffizient (für gesättigte Tonsteine i. A. $\alpha \approx 1$)

Da für gesättigte Tonsteine i. A. $\alpha \approx 1$ gilt, vereinfacht sich dieser Ansatz zur in Gleichung (1) angegebenen üblichen effektiven Spannungsgleichung nach Terzaghi (1925):

$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - p_{por} \tag{4}$$

Nach Skempton (1954) führt bei relevanter mechanisch-hydraulischer Kopplung jede Änderung des Spannungszustandes auch zu einer Änderung des Porendrucks, die für eine undrainierte, triaxiale Belastung wie folgt beschrieben wird:

$$\Delta p_{por} = B\left(\Delta\sigma_{tot.3} + A\left(\Delta\sigma_{tot.1} - \Delta\sigma_{tot.3}\right)\right) \tag{5}$$

mit $\Delta\sigma_{tot.1}$ = Änderung der axialen (größten) totalen Hauptspannung

$\Delta\sigma_{tot.3}$ = Änderung der radialen (kleinsten) totalen Hauptspannung

A, B = Skempton's Porendruckparameter;
A variiert von -0.5 für stark überkonsolidierten Ton bis zu Werten im Bereich von 2 bis 3 für gesättigte, lose Feinsande; bei rein elastischem Verhalten ist $A = \frac{1}{3}$;
B variiert von $B = 0$ für völlig trockenes Gestein bis $B = 1$ für gesättigtes Gestein.

Die Aufbringung der Belastung am Beginn eines Kriechversuchs, die aufgrund ihrer Schnelligkeit auch bei drainierten Randbedingungen bei niedrig permeablem Tonstein quasi-undrainiert erfolgt, führt daher zu einer Änderung des Porendrucks (bzw. der Saugspannung im ungesättigten Fall). Daher ist bei Aufbringung der Belastung entsprechend Gleichung (4) die Änderung der effektiven Spannung geringer als die Änderung der Totalspannung. Die in Abschnitt 3.1 beschriebene initiale Deformation stellt also die instantane, elasto-plastische Reaktion auf die initiale (undrainierte) Änderung $\Delta\sigma_{eff}$ des effektiven Spannungszustandes dar.

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_{tot} - \Delta p_{por} = \Delta\sigma_{tot} - B\left(\Delta\sigma_{tot.3} + A\left(\Delta\sigma_{tot.1} - \Delta\sigma_{tot.3}\right)\right) \tag{6}$$

Für gesättigte Proben muss, für teilgesättigte kann, die Aufbringung der Belastung zum Aufbau positiver Porendrücke ($p_{por} > 0$) führen. In drainierten Tests resultiert dies in einer Phase allmählich durch Drainage abnehmender Porendrücke. Die Geschwindigkeit dieses Prozesses ist hydraulisch kontrolliert und hängt von der Permeabilität sowie der Probengeometrie ab. Aufgrund der z. T. sehr niedrigen Permeabilitäten von Tonstein kann der Drainageprozess Wochen oder sogar viele Monate dauern (bei Proben mit einer Länge von $l = 20\,\text{cm}$). Der Zeitbedarf für die Drainage über die Stirnflächen – nicht über die Mantelfläche der Probe – skaliert ungefähr mit l^2, bei kürzeren Proben ist der Prozess also entsprechend schneller.

Der Drainagevorgang führt zwangsläufig zu einer asymptotischen Abnahme der (während der Drainage in der Probe inhomogen verteilten) Porendrücke gegen den außen anliegenden Druck p_{ext}:

$$\lim_{t\to\infty} p_{por} = p_{ext} \tag{7}$$

Bei konstanter Totalspannung ergibt dies entsprechend Gleichung (4) einen asymptotischen Anstieg der effektiven Spannung gegen $\sigma_{tot} - p_{ext}$. Die damit verbundene transiente Verformungsantwort des Gesteins (Konsolidierung) muss eine gegen 0 abklingende Deformationsrate aufweisen:

$$\lim_{t\to\infty} \dot{\varepsilon}_{Konsol} = 0 \tag{8}$$

Generell ist die Konsolidierung mit einer Volumenabnahme verbunden.

An dieser Stelle ist noch darauf hinzuweisen, dass auch bei Versuchen an ungesättigtem Tonstein eine Phase transienter, abklingender und mit Volumenabnahme verbundener Verformung auftreten kann. Mögliche Gründe dafür sind z. B. bei Druckänderung zeitlich verzögerte, kinetisch kontrollierte Lösungsvorgänge der Gasphase in der flüssigen Phase.

Aber auch das mögliche Auftreten von Abweichungen vom lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (non-LTE Zustände) hinsichtlich der Fluiddrücke in unterschiedlich weiten Poren kann dabei eine Rolle spielen; eine Beschreibung mittels Gleichung (1) sowie (3) bis (6) ist dann allerdings nicht mehr möglich, da diese Gleichungen auf der Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichts basieren.

3.3 Transiente, abklingende Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung

Auch bei Gesteinen, bei denen mechanisch-hydraulische Kopplung vernachlässigbar ist (z. B. ungeschädigtes Steinsalz) und daher die in Abschnitt 3.2 diskutierten, hydraulisch kontrollierten Konsolidierungsvorgänge keine Rolle spielen, kann unter Belastung mit Differentialspannung bei konstanter effektiver Spannung ein transientes, abklingendes Verformungsverhalten auftreten. Die zeitliche Veränderung der Deformationsrate ist aus den deformationssteuernden Zustandsgrößen (effektive Spannung, Temperatur) nicht erklärbar, da diese konstant sind. Die zeitliche Veränderung der Deformationsrate kann daher nur als Ausdruck einer mikrostrukturellen Änderung des Gesteins interpretiert werden. Sofern die zugrundeliegenden Mechanismen hinreichend verstanden sind, kann der transiente Prozess durch die asymptotische Annäherung mikrostruktureller Parameter an einen Zustand beschrieben werden, der mit dem äußeren Systemzustand (effektive Spannung, Temperatur) im Gleichgewicht steht. Der oder die relevanten mikrostrukturellen Parameter können dann im Sinne „innerer Zustandsgrößen“ verstanden werden.

Anschaulicher wird diese abstrakte Darstellung an dem physikalisch gut verstandenen Beispiel des transienten Verformungsverhaltens von Steinsalz (i. A. als „transientes Kriechen“ oder „primäres Kriechen“ bezeichnet): Hier stellt die Versetzungsdichte, d. h. die Häufigkeit bestimmter Typen von Kristallgitterfehlern pro Volumen, die entscheidende innere Zustandsgröße dar (Heemann 1989). Solange die Versetzungsdichte nicht im Gleichgewicht zum herrschenden Spannungszustand steht, entstehen entweder mehr neue Versetzungen als vernichtet werden (der typische Fall der abnehmenden primären Kriechrate) oder es werden mehr Versetzungen vernichtet als neu gebildet (der Fall zunehmender Kriechrate bei Proben, die durch vorangegangene höhere Differentialspannungen

„verfestigt“ sind). Dieses Beispiel illustriert aber auch, dass es sich beim transienten Kriechen um komplexe Prozessgefüge aus mehreren Einzelprozessen mit jeweils eigenen inneren Zustandsgrößen handeln kann: In unterschiedlichen Spannungsbereichen sind unterschiedliche Einzelprozesse dominant, so ist bei mittleren Differentialspannungen das Gleiten von Stufenversetzungen der wichtigste Prozess, während bei höheren Differentialspannungen das Klettern von Schraubenversetzungen dominiert. Im Steinsalz erfolgt das primäre Kriechen im Rahmen der Messgenauigkeit volumentreu (Hampel et al. 2016), für andere Gesteine muss dies aber nicht zutreffen.

Wie in Kapitel 3 einleitend festgestellt, erfolgt die Unterscheidung der in den weiteren Unterkapiteln beschriebenen Verformungsanteile nach rein phänomenologischen Kriterien und impliziert keine Aussagen über die zugrundeliegenden Mechanismen. Dies bedeutet nicht nur, dass phänomenologisch gleiche Verformungsanteile in verschiedenen Gesteinen oder sogar in einem Gestein auf ganz unterschiedliche Verformungsmechanismen zurückzuführen sein können. Es bedeutet auch, dass die Auswirkungen eines einzigen Verformungsmechanismus in dieser Darstellung künstlich in zwei phänomenologisch unterschiedliche, additive Anteile aufgespalten werden. Dies gilt insbesondere für die in den Abschnitten 3.3 und 3.4 vorgenommene Trennung von transienten und stationären Verformungsanteilen bei konstanter Effektivspannung. Für Steinsalz ist diese Unterscheidung unter dem Blickwinkel wirkender Verformungsmechanismen künstlich[12], da es sich stets um ein Versetzungskriechen handelt. Für andere Gesteine kann dagegen ein Verformungsmechanismus auch auf einen phänomenologischen Verformungstyp beschränkt sein (z. B. wird für Beton ein transientes Verformungsverhalten bei konstanter Effektivspannung beschrieben, ein stationäres Kriechen aber meist ausgeschlossen). Wird die Aufteilung in phänomenologisch definierte, additive Verformungsanteile verwendet, so gilt für die transienten, abklingenden Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung:

$$\lim_{t \to \infty} \dot{\varepsilon}_{prim} = 0 \tag{9}$$

Im Gegensatz zum Steinsalz sind die Verformungsmechanismen in Tonsteinen noch wenig verstanden, so dass hier über mögliche Kandidaten für „innere Zustandsgrößen“ kaum mehr als plausible Erklärungsansätze möglich sind. Kennzahlen für mikrostrukturelle Parameter wie die Einregelung von Tonmineralplättchen, sowie für die Dichte, die mittlere Flächenausdehnung und den Hydratisierungszustand von Kornkontakten wären mögliche Beispiele, siehe auch Kapitel 4. Da der experimentelle Nachweis derartiger Mechanismen sehr schwierig ist, herrscht bislang noch nicht einmal Einigkeit darüber, ob ein transientes

[12] Sie ist aber allgemein gebräuchlich als Unterscheidung von primärem und sekundärem Kriechen. Dabei wird aber meist weniger eine additive Kombination eines konstanten und eines abklingenden Anteils gedacht, sondern eher eine zeitliche Abfolge verschiedener Phasen (wobei die Abgrenzung der Phasen jedoch vage bleibt, da es sich in Wirklichkeit um eine asymptotische Annäherung an die Stationarität handelt).

Verformungsverhalten von Tonstein bei konstanter effektiver Spannung überhaupt existiert (und ob es ggf. als „primäres Kriechen“ bezeichnet werden dürfte).

Die Schwierigkeit des Nachweises einer transienten, abklingenden Deformationsrate bei konstanter Effektivspannung in Tonsteinen ergibt sich daraus, dass sich (außer für den uninteressanten Fall stärker ausgetrockneten Tonsteins, für den kaum ein zeitabhängiges Verformungsverhalten zu erwarten ist) dieser Prozess aufgrund der starken mechanisch-hydraulischen Kopplung nicht ohne die Überlagerung durch die in Abschnitt 3.2 beschriebenen hydraulisch kontrollierten transienten Prozesse realisieren lässt. Für drainierte Laborversuche ist dies offensichtlich. Aber auch im Fall undrainierter Laborversuche an vollständig gesättigten Proben können entsprechende transiente Vorgänge als Folge des Auftretens von Abweichungen vom lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (non-LTE Zustände) nach Aufbringung der Differentialspannung nicht ausgeschlossen werden.

Allein anhand der Verformungsverläufe (vgl. Abb. 5) lassen sich die in Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.3 diskutierten Prozesse nicht unterscheiden.

Auch der Versuch, eine Unterscheidung durch Porendruckmessung (an mehreren Punkten der Probe, um Porendruckgleichgewicht oder Abweichungen davon nachweisen zu können) zu erreichen, konnte unseres Wissens noch nirgends durchgeführt werden. Zum einen stellt der Einbau entsprechender Sensoren in die Probe eine Störung der mechanischen und der hydraulischen Situation dar, die sich gerade in transienten Situationen am stärksten auswirkt (z. B. die Trägheit der Porendruckmessung, da diese immer mit der Ankopplung eines Totvolumens oder Reaktionsvolumens des Sensors verbunden ist). Außerdem kann eine Porendruckmessung auftretende non-LTE Zustände prinzipiell nicht erkennen.

3.4 Stationäre Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung

Bei einigen Gesteinen (z. B. Steinsalz) stellt sich bei konstanter Effektivspannung unter deviatorischer Belastung nach dem Abklingen transienter Verformungsanteile asymptotisch eine stationäre Deformationsrate ein, die oft als sekundäres Kriechen bezeichnet wird.

$$\dot{\varepsilon}_{stat} = const \neq 0 \tag{10}$$

Das sekundäre Kriechen wird als Scherkriechen[13] des Korngerüstes ohne Volumenänderung erklärt, z. B. Boley (2012), Kolymbas (2019). Aus der Stationarität folgt unmittelbar, dass dann alle Zustandsgrößen konstant sein müssen – also auch innere Zustandsgrößen wie

[13] D. h. anhaltende Verformungen bei Scherbelastung.

die in Abschnitt 3.3 genannten mikrostrukturellen Parameter. Die inneren Zustandsgrößen haben somit bei Erreichen einer stationären Deformationsrate ein Gleichgewicht mit den äußeren Zustandsgrößen erreicht. Daher muss sekundäres Kriechen auch volumentreu sein, sonst wäre Stationarität langfristig nicht möglich.

Die stationäre Deformationsrate ist u. a. abhängig von der Differentialspannung z. B. Rybacki et al. (2017) für kurze Versuchslaufzeiten sowie Zhang (2013) und Zhang & Laurich (2020) für lange Versuchslaufzeiten und natürlich auch, wie alle thermodynamisch kontrollierten Fließgleichgewichte, von der Temperatur. Auch starke Abhängigkeiten vom Feuchtezustand werden beobachtet, z. B. bei verdichtetem Salzgrus, vgl. Kröhn et al. (2017).

Während das Auftreten sekundären Kriechens für viele Salzminerale unstrittig und physikalisch gut verstanden ist (z. B. Heemann 1989) ist dies für Tonstein weder verstanden noch unumstritten. Diese Frage wird in Kapitel 6 eingehend diskutiert.

3.5 Transiente, progressive Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung und Differentialspannung oberhalb der Schädigungsgrenze

Übersteigt die Differentialspannung die Schädigungsgrenze, so kommt es in zunehmendem Maße zur Bildung von Mikrorissen, was sich in einer Volumenzunahme (Dilatanz) und einer ansteigenden Deformationsrate äußert. Diese beschleunigt sich bis es zum Versagen des Gesteins kommt. Dieses Verhalten wird auch als schädigungsinduziertes tertiäres Kriechen mit nachfolgendem Versagen der Probe („Kriechbruch“) bezeichnet, z. B. Simmer (1994), Czaikowski (2011) und Zhang et al. (2013). Die Grenzspannung für das Einsetzen progressiver Schädigung (Schädigungsgrenze; oft auch unter dem Aspekt der Volumenzunahme als Dilatanzgrenze bezeichnet, wobei hier aber unterschiedliche Definitionen dieses Begriffs in Gebrauch sind) stellt faktisch die Langzeitfestigkeit des Gesteins dar. Sie ist eine Materialeigenschaft, die generell abhängig ist von den stabilisierenden effektiven Hauptspannungen (effektiver Stützdruck), daneben aber auch von der Temperatur, ggf. vom Feuchtezustand (z. B. Hesser & Spies 2007) und von der Spannungs- und Verformungshistorie.

Für Gesteine mit hoher plastischer Verformbarkeit (z. B. Steinsalz) kann die Schädigungsgrenze weit unter der Kurzzeitfestigkeit liegen (z. T. bei nicht mehr als einem Drittel) und ein sehr ausgeprägtes tertiäres Kriechen auftreten. Für sehr spröde Gesteine (z. B. Kristallin) ist ein Unterschied zwischen Schädigungsgrenze und Kurzzeitfestigkeit sowie ein tertiäres Kriechen dagegen i. A. kaum feststellbar (z. B. Spies et al. 2007). Für Tonstein wird in

Kapitel 6, Abb. 14 ein Beispiel präsentiert, das über einen Zeitraum von mehreren Monaten deutlich transiente, progressive Verformungsanteile bis zum Materialversagen zeigt.

4 Mikrostruktuelle Beschreibungsansätze

Dieses Kapitel zielt darauf ab, zu erklären, was sich bei Belastung im Korngerüst verändert, welche Kräfte wirken, mögliche Kandidaten für „innere Zustandsgrößen“ zu identifizieren und wie sich hierdurch ein Kriechen erklären oder ausschließen lässt.

4.1 Textur und Struktur von Tonstein

Das Foto der Fladentonstein-Serien (Abb. 2) zeigt deutlich die Schichtung im cm-Maßstab des dunkelgrauen bis schwarzen Ton- Mergelsteins, unterbrochen durch helle kalkige Lagen. Posidonienschiefer aus Dotternhausen ist wie der Tonstein der Fladentonsteinserie feinschichtig, mit hohem Durchtrennungsgrad in Mikrometerskala, bituminös und von Pyritkörnern durchzogen. Bei höherer Auflösung mittels REM zeigt sich in dieser Aufnahme, dass die Schichtung des Korngerüstes[14] auch im 100-µm-Bereich (Abb. 6) erkennbar ist.

[14] Das Korngerüst wird gebildet aus den Feststoffen des Gesteins, es wird manchmal in der Gesteinsphysik als „die Gesteinsmatrix“ bezeichnet.

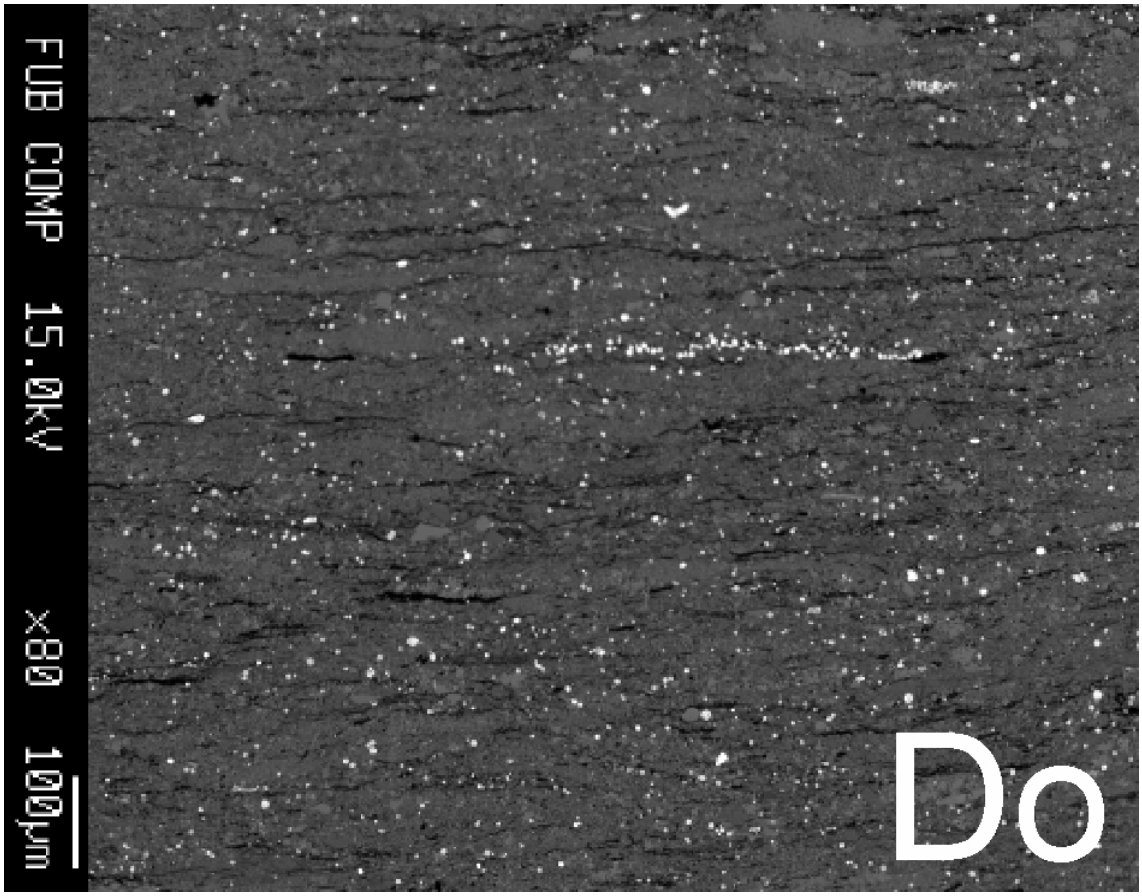

Abb. 6: REM-Aufnahme eines Posidonienschiefer aus Dotternhausen, Er ist wie der Fladenton bituminös und von Pyritkörnern durchzogen. Calcit und Ton-Calcit-Gemisch sind grau, Pyritkörner weiß. Die schwarzen erkennbaren Klüfte (Poren, Klüfte und Mesorisse) sind möglicherweise durch Entlastung der Probe nach Entnahme aus dem Gebirge verursacht, aber auch durch Trocknung während der Dünnschliffpräparation. Sie sind entstanden entlang von Schwächezonen zwischen den einzelnen Bettungsebenen. Abbildung nach Mayr et al. (2014b, 2014a).

In Abb. 7 ist eine Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahme mit zurückgestreuten Elektronen (backscattered electrons, BSE) eines mit Ionenstrahlen polierten (broad ion-beam polished sample) undeformierten Opalinustons (OPA) aus Mont Terri gezeigt. Er zeigt, wie heterogen ein Tonstein aufgebaut sein kann: In dem gezeigten OPA befinden sich isometrische Körner aus Kalzit oder Quarz, Mikrofossile, aber auch langestreckte Tonminerale in einer noch feinkörnigeren Matrix. Die Tonminerale haben zwar eine Vorzugsrichtung, sind aber nicht komplett eingeregelt. D. h., hier zeigt sich das Potential zur Umlagerung der noch nicht vollständig ausgerichteten Tonminerale auf mikrostruktureller Ebene.

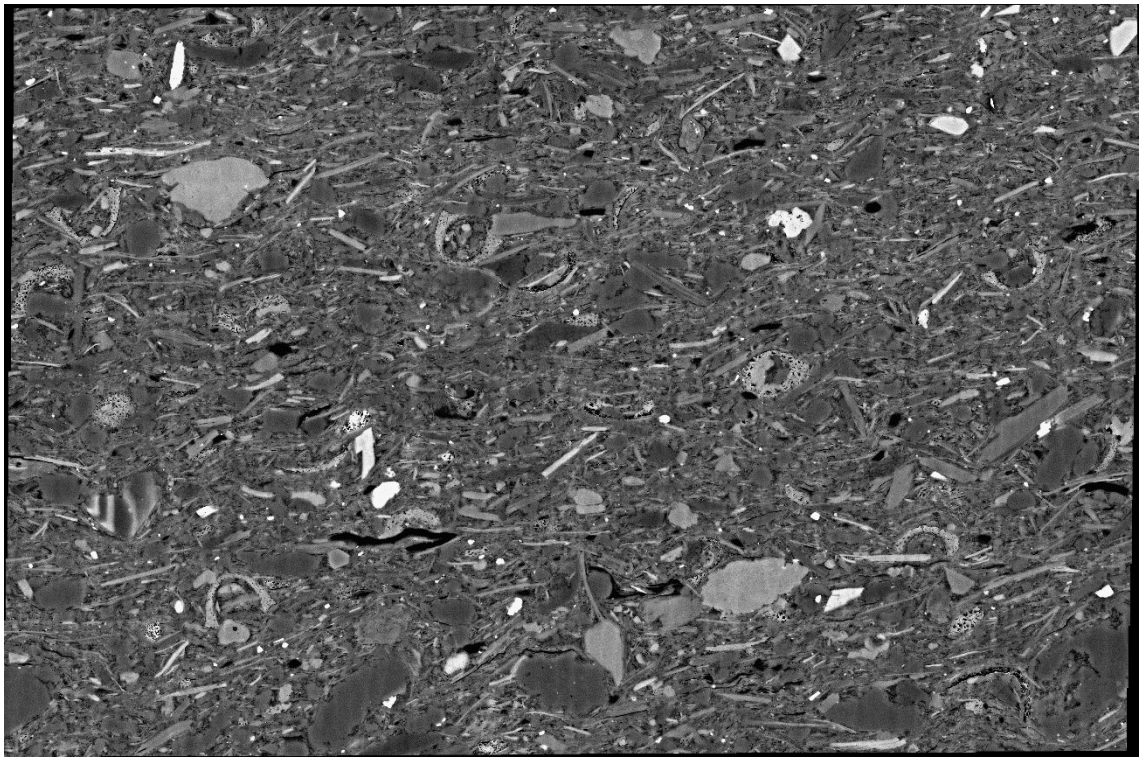

Abb. 7: BIB-SEM (BSE Aufnahme) eines undeformierten OPA aus Mont Terri. Grau: Kalzit, Mikrofossil. Dunkelgrau Quarz, Schwarz: Hohlräume. Gesamtbreite 120 µm Höhe: 100 µm. Verändert nach Laurich et al. (2018).

Erst bei der Betrachtung eines Tonsteins (hier eine Aufnahme eines schlecht konsolidierten Opalinustons aus dem Scheibengipfeltunnel bei Reutlingen in Baden-Württemberg) mit noch höherer Auflösung sind einzelne Tonminerale zu erkennen, die miteinander verzahnt sind und die grauen Schichten bilden (Abb. 8). Diese Abbildung visualisiert auch, dass der Porenraum gebildet wird aus: isometrischen Poren (Höhe in etwa gleich der Breite); Mesorissen (die sich über mehrere Minerale hinweg erstrecken), Mikrorissen (lange flache Mikroporen zwischen einzelnen Tonmineralen/Körnern), letztere sind nur in einer sehr hohen Auflösung zu erkennen. Wie weit sich eine isometrische Pore oder ein Riss in der 3. Dimension erstreckt, ist nicht erkennbar. Prinzipiell kommen im Tonstein eher flächenhafte Risse als röhrenartige Poren vor.

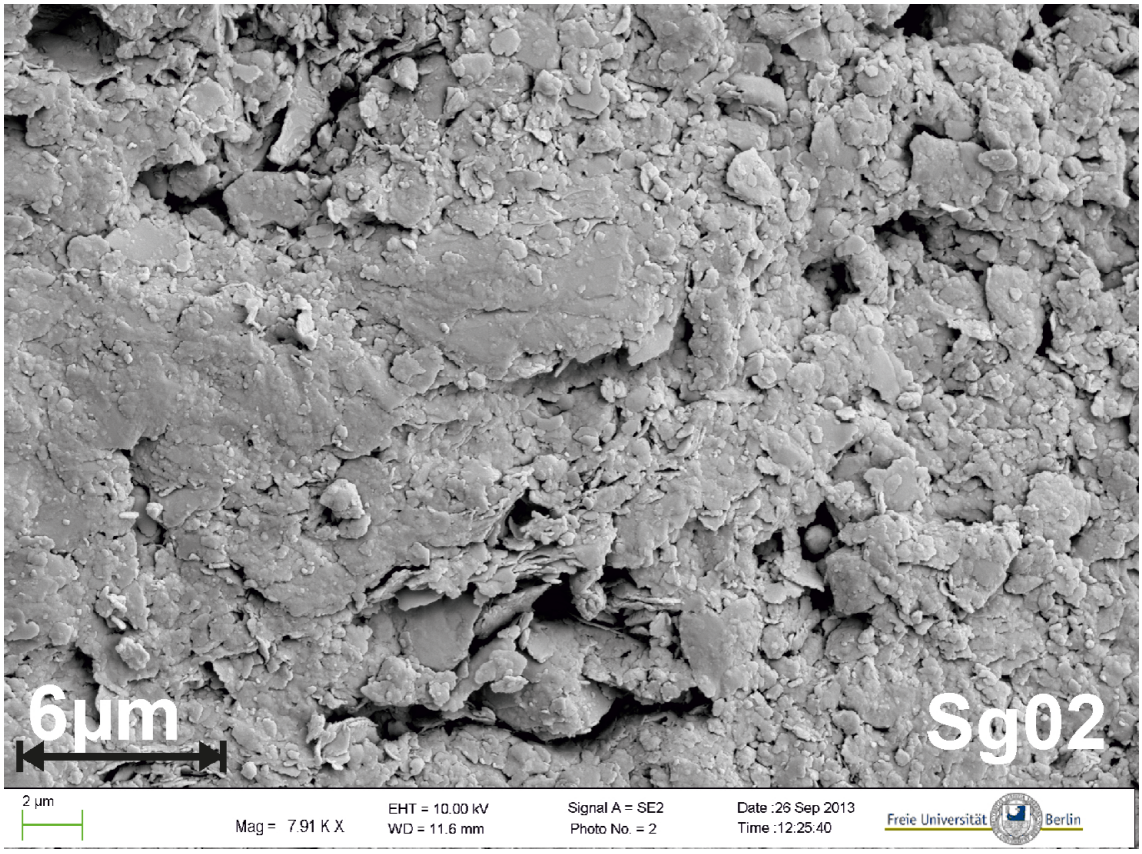

Abb. 8: REM-Aufnahme eines schlecht konsolidierten Opalinustons aus dem Scheibengipfeltunnel bei Reutlingen. Mit Gold beschichtetes Bruchstück. Erkennbar sind vollständig massive Bereiche aber auch einzelne Tonminerale, die sich nicht vollständig eingeregelt haben, im unteren Bereich ein ca. 10 µm langer Mikroriss, darüber und im oberen Teil einzelne unregelmäßig geformte in etwa isometrische Poren mit ca. 1-2 µm Höhe und Breite, nach Mayr et al. (2015).

4.2 Interaktion von Korngerüst und Porenfüllung, skalenabhängige Deformationen

Tonstein verändert seine Eigenschaften bei Veränderung der Feuchte stark, so auch jener der Fladentonstein-Serie, wie der geotechnischen Kurzbeschreibung (DBE 2017) zu entnehmen ist: das Gebirges ist *„mild; nachbrüchig besonders in Störungszonen kleintückig und gebräch, extrem bei Feuchteeinwirkung“.* Die Tatsache, dass der Tonstein feuchteempfindlich ist, zeigt, dass eine veränderliche Festigkeit vorliegt z. B. durch quellfähigen Ton, welcher im Korngerüst vorhanden ist und zwar als eine der Schichten, die den Tonstein als Ganzes bilden. Folgerichtig simulieren theoretische Gesteinsmodelle Tonstein als geschichtetes Medium, mit harten, elastischen Schichten und weichen viskoplastischen Schichten (Choo et al. 2021).

Da Tonstein in unterschiedlichen Skalen unterschiedliche Struktur und Textur aufweist, werden bei Belastungen auch unterschiedlich große Bereiche in die Deformationsprozesse eingeschlossen. Auf mikroskopischer Ebene werden Silt- und Sandkörner bei den betrachteten Spannungsverhältnissen nicht deformiert, Tonminerale können dagegen deformiert, neu ausgerichtet und verschoben werden. Feeser (1991) erklärt Kriechen durch eine Rate-Process-Theorie (z. B. Kavazanjian & Mitchell 1980, Zhang et al. 2013), also durch Prozesse, die auf der Größenskala der einzelnen Tonminerale erfolgen. Auf Mesoskala führt die Reorientierung von Bestandteilen dazu, dass größere Bereiche, die aus Tonmineralen gebildet werden, verändert werden. Informationen über die Veränderbarkeit von Tonstein durch Langzeitdeformation erhält man aus der Betrachtung von Tonstein, der über einen langen Zeitraum deformiert wurde. Arbeiten von z. B. Laurich et al. (2018) zeigen Beispiele für die oben erwähnten Veränderungen der Mikrostruktur in Opalinus Ton (scaly clay) aus der Hauptverwerfung im Felslabor Mont Terri. Schuck et al. (2020) zeigen Beispiele für Rissbildung und Ausrichtung der Tonminerale in Boom Clay, der im Labor deformiert wurde. Solche Vorgänge des Ausrichtens können dazu führen, dass Tonstein auch nach langer Zeit der Belastung noch deformiert wird, also kriecht. Andererseits können größere Körner bei Belastung verkanten, wodurch das Gleiten, sprich das Kriechen verhindert wird (geometric locking); für Tonminerale ist dieses aufgrund der geringeren Festigkeit aber eher unwahrscheinlich. Wird ein Tonstein auf Kompression oder Scherung belastet, können auch parallele Ton-Schichten, die zuvor keinen Kontakt hatten, in Kontakt kommen, und sich hierdurch mögliche Gleitflächen für lokales Kriechen ausbilden.

Die Porenfüllung (Gas, Fluid oder eine Mischung) interagiert mit den Bausteinen des Korngerüstes. Die Oberflächen der Bausteine, wie die der Tonminerale, sind negativ geladen. Wasser in den Poren wird aufgrund seiner Dipolstruktur gebunden, z. B. durch elektrostatische Dipolbindung, „Wasserstoffbrückenbindung“, Van-der-Waals-Kräfte. Diese Bindung wird umso stärker, je näher die Wassermoleküle an die Oberfläche des Feststoffes kommen. Diese chemischen Kräfte in extrem dünnen zylinderförmigen oder flachen Poren (Mikroporen und Mikrorisse) führen zu Veränderungen der Eigenschaften des Wassers, aber auch zu hohen Bindungskräften zwischen den Tonmineralen. Diese Bindungskräfte führen auch dazu, dass die feinen Mikrorisse immer gesättigt sind, während die eher größeren und isometrischen Poren bei Teilsättigung auch mit Luft gefüllt sein können (z. B. Mayr & Burkhardt 2006). Zhang (2013) erklären das Quellverhalten von Ton durch die Einlagerung von gebundenem Wasser an die Tonminerale. Das viskose Wasser in den kleinen Poren/Mikrorissen verlangsamt auch die Umlagerungsprozesse im Korngerüst. Dieses ist eine mögliche Erklärung für die Zeitabhängigkeit des Deformationsverhaltens, also dem viskosen Verhalten des Tonsteins.

4.3 Änderung im Korngerüst bei Entlastung

Tritt Spannungsentlastung auf, entweder bei Entnahme von Probenmaterial durch Bohren oder aber durch Auffahrung eines Hohlraumes, dann führt dieses zur Öffnung von Klüften, Poren und zu Rissbildungen (excavation damage), z. B. Zhang et al. (2013). Für Schacht Konrad zitieren Lux et al. (2005) Arbeiten von Wittke & Beratende-Ingenieure (1991a, 1991b), die festgestellt haben, dass „Entfestigung 10 m um den Schachtausbauaußenrand zu beobachten ist.“ Lux et al. (2005) weisen darauf hin, dass die Entfestigung bei der Einschätzung der Kriechfähigkeit zu berücksichtigen wäre. Die Risse bilden sich bevorzugt parallel zur Schichtung, wie auch in Abb. 6 zu erkennen. Hierdurch wird der Tonstein anisotroper, die Festigkeit verringert sich in einer Richtung extrem. Die Möglichkeit eines Gleitens der Flächen bei Beanspruchung auf Scherung nimmt zu. Zusätzlich vergrößern sich durch die Spannungsentlastung der Porenraum und das Gesamtvolumen. Da jedoch die Menge an Wasser gleich bleibt, verringert sich die Sättigung des Gesteins. War der Tonstein vollgesättigt und das Porenfluid unter Druck, so führt die Druckverringerung zu einem Entgasen des Fluids oder zum Entstehen einer Wasserdampfatmosphäre. In Folge dessen treten Saugspannungen auf. Auch diese Veränderungen führen zu Änderungen des Langzeitdeformationsverhaltens bzw. der Kriechfähigkeit des Tonsteins.

4.4 Änderung im Korngerüst bei Belastung

4.4.1 Erhöhung der isostatischen Belastung: initiale Verformung und mechanisch-hydraulische Kopplung

Bei einer Erhöhung der isostatischen Belastung im Triaxialversuchsstand wird die Probe komprimiert, es werden vorhandene Risse und isometrische Poren in der Tonsteinprobe geschlossen bzw. deren Größe verringert. Bei dieser Volumenreduktion kommt die Porenfüllung (Gas, Fluid oder eine Mischung) unter Druck, der Porendruck wird erhöht (bzw. die Saugspannung verringert), und wirkt der Schließung entgegen. Da die Porenfüllung kompressibel ist, Gas mehr als Wasser, kann diese instantan zusammengedrückt werden. Luft löst sich in Folge auch teilwiese oder komplett im Porenfluid. Insgesamt führt dieser Prozess zu einer Veränderung der Sättigung. Bei Drainage nimmt der Porendruck langsam ab und es kommt zu der bereits beschriebenen Zunahme der Effektivspannungen und das Korngerüst („die Gesteinsmatrix“) übernimmt nach und nach komplett die von außen aufgebrachten totalen Spannungen. Dies führt zu einer Deformation und es kommt zu einer weiteren Kompaktion der aufgelockerten Proben (Konsolidierung). Näheres siehe frühere Ausführungen zur transienten Deformation bei Verringerung des Porendruckes (Abschnitt 3.2). Diese Kompaktion führt auch zu einer besseren „Verzahnung“ der

Tonpartikel. Je höher die Kompaktion durch die isostatischen Belastung ist, desto höher sind auch lokal die Normalkräfte auf die Kornkontakte.

4.4.2 Erhöhung der Differentialspannung

Bei Erhöhung der Differentialspannung, z. B. durch Belastung in axialer Richtung, werden zusätzlich Risse und isometrische Poren in der Tonsteinprobe belastungsabhängig geschlossen bzw. deren Größe verringert oder diese werden deformiert. Hierdurch verändern sich die mechanischen Eigenschaften des Gesteins, was sich sowohl in einer Erhöhung der statisch bestimmten Verformungs-Moduli als auch der dynamisch bestimmten Verformungs-Moduli auswirkt. Beobachtet werden kann dieses durch veränderte seismische Geschwindigkeiten z. B. Mayr et. al. (2018, 2019). Welche Poren und Risse geschlossen werden, hängt von der Richtung der Belastung in Relation zur Ausrichtung der Poren und Risse ab. Es schließen sich die Poren und Risse, die ganz oder teilweise senkrecht zur Belastungsrichtung und der damit im Gestein wirkenden größten Hauptspannung ausgerichtet sind. Die Rissschließung und Verringerung des Porenraumes führt zu einer Veränderung der ursprünglichen seismischen Anisotropie der Tonsteine. Die Veränderung hängt von der Richtung der Belastung bezüglich der Schichtung ab: bei Belastung senkrecht zur Schichtung nimmt der ursprüngliche Grad der seismischen transversalen Isotropie ab. Eine Belastung parallel zur Schichtung führt zu einer weiteren Symmetrieebene, wodurch aus einem seismisch transversal isotropen Gestein eines mit seismisch orthorhombischer Symmetrie wird (z. B. Mayr et al. 2019). Nur ein Teil dieser Rissschließung ist reversibel. Daher liegt nach einer Entlastung nicht wieder das Ausgangsmaterial vor. Für Ton ist dieses plastische Verhalten bei Belastung auf Differentialspannung auch bei häufiger Wiederbelastung beobachtbar.

Bei Erhöhung der Belastung in axialer Richtung wird auch die Differentialspannung erhöht, und es kommt in Folge auch zu Scherspannungen im Korngerüst. In Folge dieser Belastung auf Scherung können sich die Bausteine des Tonsteins aufgrund höherer Scherspannung an den Mineral-Kontaktflächen gegeneinander verschieben, es kommt zum tertiären Kriechen.

4.4.3 Transiente Verformungsanteile

Wie vorab ausgeführt, ist bei der transienten Deformation zwischen Verformungsanteilen bei sich ändernder Effektivspannung (Druckdiffusion) und solchen bei konstanter Effektivspannung zu unterscheiden. Bei Teilsättigung kann der Druckdiffusionsprozess auch zwischen Bereichen mit Vollsättigung und Bereichen mit Teilsättigung erfolgen. Der Umlagerungs- und Umorientierungsprozess von Mineralen kann auch bei gleichbleibendem

Porendruck erfolgen. Da aber viskoses Fluid in den kleinen Poren/Mikrorissen sich befindet, erfolgt dieser Umlagerungsprozess langsam.

Schulze (1986) erklärt: *„Instationäre Verformung ist immer dann zu erwarten, wenn die tragenden Verformungsmechanismen einer zeitlich oder durch die Verformung selbst bedingten Veränderung in der Gesteinsstruktur folgen müssen. … In einem Tongestein erfolgt eine bleibende Verformung interkristallin, stationäre Verformung bleibt der instabile Sonderfall.“ … „Wird die Bruchfestigkeit [jedoch] nicht überschritten, tritt Abgleitung auf den stets vorhandenen primären Gefüge-Trennflächen auf, bis die lokale Verformbarkeit, d. h. die lokal verfügbare Abgleitstrecke an Hohlräumen, Spalten, Einschlüssen, Schichten etc. sich zunehmend erschöpft. Bei einem derartigen Konsolidierungsvorgang wächst der Widerstand gegen Formänderung an, sodaß kein zeitlineares Spannungs-Verformungsverhalten mit z. B. konstantem Reibbeiwert angesetzt werden darf.“*

4.4.4 Stationäre Verformungsanteile: Sekundäres Kriechen

Höhere Normalspannungen führen zu einer höheren Festigkeit der Kornkontakte gegenüber Scherung, wodurch auch das Langzeitdeformationsverhalten verändert wird und die Wahrscheinlichkeit des sekundären volumeninvarianten „Kriechens“ verringert wird. Sekundäres Kriechen ist derart vorstellbar, dass sich lokale, chemisch begründete Bindungen zwischen Tonmineralen öffnen und in kurzer Distanz an anderer Stelle wieder schließen. Plastischer Ton ist auch duktil, d. h. wenn sich an einer Stelle Bindungen öffnen ist der Ton als Ganzes immer noch ein Festkörper. In Tonsteinen mit extrem gut ausgerichteten Mineralen ist die Fähigkeit zum Kriechen naturgemäß richtungsabhängig: bei Scherung parallel zur Schichtung kann er deformiert werden, bei Scherung senkrecht dazu nicht.

4.4.5 Transiente, progressive Verformungsanteile: Tertiäres Kriechen

Bei plastischen Verformungen durch höhere Belastungen, wie bei den Bruchversuchen oder bei den Kriechversuchen mit Differentialspannungen oberhalb der Schädigungsgrenze, bilden sich Risse unterschiedlicher Länge und Breite in der Gesteinsprobe aus. Zunächst bilden sich Mikrorisse, die sich bei anhaltender Belastung vergrößern und verbinden. Diese Rissentwicklung verändert das Gestein irreversibel und führt zu einer Volumenzunahme (Dilatanz) sowie nach weiter anhaltender Belastungsdauer zur Ausbildung von Scherflächen und nachfolgend zum Bruch der Gesteinsprobe. Dieser Prozess kann jedoch durch sich verringernde Differentialspannungen beendet werden kann. Schulze (1986) schreibt zum „tertiären“ Kriechen: *„Bei stärkerer Beanspruchung öffnen und vermehren sich durch bruchbehaftete Verformung nach lokalem Überschreiten der Bruchfestigkeit die Gefüge-Trennflächen und Kriech-Beschleunigung ist wegen fehlender Erholungsmechanismen die Folge. (Nur wenn, wie unter In-situ-Bedingungen möglich, mit der Verformung eine*

Spannungsumlagerung und damit der Spannungsabbau verbunden sind, kann der Rißfortschritt unterbleiben).“

5 Verfügbare Daten

Gebirgsmechanische Kurzzeitparameter und hydraulische Eigenschaften von Tonen und Tonsteinen wurden an anderen Stellen bereits ausführlich im Rahmen der Suche nach geeigneten Standorten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle gesammelt und beschrieben, z. B. Lux et al. (2005), Gerardi (2005), Boisson (2005), Jahn & Sönnke (2013), Jahn et al. (2016) und NEA (2017).

Das Langzeitdeformationsverhalten von Tonstein wird z. B. von Lux et al. (2005), Jobmann et al. (2007), Czaikowski (2011), Jahn & Sönnke (2013), Jahn et al. (2016) und Frieling et al. (2019) zum Thema Endlager in Bezug gesetzt. Aus den Arbeiten folgt, dass es einen Mangel an Daten zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonsteinen gibt.

Im Folgenden wird auf die Literatur bezüglich Konrad, sowie Mont Terri und Bure im Detail weiter eingegangen und deren Nutzbarkeit für die Fragestellung betrachtet.

5.1 Endlager Konrad

Im Zeitraum 1986-1992 wurden im Rahmen des Genehmigungsverfahrens Laboruntersuchungen an unterschiedlichem Probenmaterial aus der Lokation Konrad durchgeführt, darunter ein geringer Anteil Tonsteinproben. Es wurden meist Versuche zur Kurzzeitfestigkeit und zum elastischen Verformungsverhalten durchgeführt, aber vergleichsweise wenige Versuche zum Langzeitdeformationsverhalten. Alle diese Daten finden Anwendung bei der Ermittlung der gebirgsmechanischen Voraussetzungen (Lux & Eberth 2002) und anderen vorbereitenden Arbeiten zur Suche nach geeigneten Standorten (Lux et al. 2005, Czaikowski 2011). Auch Jahn & Sönnke (2013) stellen im Rahmen des Vorhabens AnSichT (Endlagerstandortmodell NORD) Gesteinseigenschaften - ermittelt an unterschiedlichen Gesteinsproben aus Schacht Konrad - umfänglich dar, die für Langzeitsicherheitsnachweise möglicher Endlagerstandorte Verwendung finden können. Stahlmann et al. (2014) verwenden Kurzzeitfestigkeits-Parameter zur Modellierungen für die Auffahrung von Strecken und Kammern in Schacht Konrad. Sönnke (2016) gibt im lagerstättenkundlichen Teil der Betriebschronik eine zusammenfassende Übersicht über alle Messungen in Schacht Konrad. Die von den genannten Autoren angeführten Daten und Zusammenfassungen zeigen insbesondere für den Standort Konrad, dass das Langzeitdeformationsverhalten von Tonsteinen aus Schacht Konrad nur in geringem Maße untersucht wurde.

5.1.1 Kurzzeitverhalten

Die Labordaten der BGR umfassen Wichten, P- und S-Wellengeschwindigkeiten, Bruchfestigkeiten, Nachbruchfestigkeiten sowie Elastizitäts- und Verformungsmoduli. Die Proben sind entnommen aus dem Hangenden und Liegenden (Schnier 1986a), dem Oxford und Kimmeridge (Schnier 1986c) den Schachtwiderlagerbohrungen (Schnier 1986b, 1987), Dogger 410 N (Schnier 1991), Bohrungen 4/111, 4/112, 4/114 (Schnier 1992), Bohrung Konrad 101: Alb aus der 343 m Sohle und Mittelbarrême aus der 541 m Sohle (Schulze 1986, Wittke & Beratende-Ingenieure 1991a, 1991b), Versuchsfeld 5/1 (Schnier 1990). Lux et al. (2005) verwendeten über mehrere Jahre hinweg übertage gelagerte Proben aus den Bereichen Alb (Bohrung K 101) und untertage gewonnene und gelagerte Proben aus dem Alb und Mittelbarrême für eigene Messungen. Jahn & Sönnke (2013) greifen unter anderem auf Daten von Schnier (1986b), 1987) zurück und geben eine umfassende Übersicht über die gewonnenen Labordaten. Lux et al. (2005) sowie Jahn & Sönnke (2013) geben eine Übersicht über die Ergebnisse der Kurzzeitversuche von Wittke & Beratende-Ingenieure (1991a, 1991b). Lux et al. (2005) geben auf Seite 70 zusammenfassende Ergebnisse der Kompressionsbruchfestigkeit an. Sie zitieren Ergebnisse der Bestimmung von Bruchfestigkeiten von der DBE (1986, 1998) im Bereich der 850 m Sohle, Dogger und Kimmeridge (s. S. 49 und 110 in Lux et al. 2005) und geben Werte für die Druckfestigkeit, Scherfestigkeit und dynamisch bestimmte elastische Parameter basierend auf den eigenen Messungen an altem Probenmaterial (S. 106 ff) an. Wittke & Beratende-Ingenieure (1994) führten auf der 2. Sohle ein Untersuchungsprogram zur Bestimmung der gesteins- und gebirgsmechanischen Eigenschaften durch. Dies beinhaltet Messungen der einaxialen Druckfestigkeit und Scherfestigkeit an einzelnen Tonstein und Tonmergelsteinproben.

Es findet sich kein Hinweis, dass die Temperaturabhängigkeit untersucht worden wäre. Stahlmann et al. (2014) geben Kurzzeit-Parameter an, die sie für numerische Berechnung verwendeten.

5.1.2 Langzeitverhalten, Bohrung Konrad 101: Tonsteine aus Alb und Mittelbarrême

Daten zum Langzeitverhalten von Gesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 finden sich in Schulze (1986). Die Proben sind aus dem Bereich Oberalb, Mittelalb und Barrême. Die Teufe, aus welcher die fünf untersuchten Proben entnommen wurden und die jeweilige stratigraphisch petrographische Beschreibung sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Gesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101, an denen die in Abb. 9 gezeigten Dauerstanduntersuchungen durchgeführt wurden, Auszug aus Schulze (1986).

Kernkennung/ Probe	Versuchsart	Teufe in m	Stratigraph. Beschreibung	Petrographische Beschreibung
Probe 1 / 41	Einaxial	326,55 - 326,80	Oberalb	Tonstein: schluffig, bioturbat, Belemniten
Probe 3 / 44	Einaxial	352,38 - 352,63	Mittelalb	Tonmergel: schluffig, dünne helle karbon. Lagen, bioturbat
Probe 6 / 45	Triaxial	358,87 - 359,12	Mittelalb	Keine Angabe
Probe 7 / 75	Einaxial	527,80 - 528,05	Mittelbarrême	Tonstein: schluffig
Probe 8 / 76	Einaxial	533,03 - 533,28	Mittelbarrême	Tonstein: schluffig, schwach karbonat., Bruchschill

Messungen an vier Proben Nr. 1, 3, 7 und 8 (siehe Tab. 1) mit jeweils einem Durchmesser von ca. 100 mm und einer Länge von ca. 250 mm wurden bei uniaxialen Dauerbelastungen in einem Säulenprüfstand durchgeführt. Die gemessenen Verformungen und weitergehende Auswertungen sind in Abb. 9 und Abb. 10 dargestellt. Diese vier einaxialen Langzeitversuche wurden durch einen triaxialen Langzeitversuch ergänzt (Abb. 11, Probe Nr. 6, Tab. 1). Alle Versuche wurden bei kontrollierter Raumtemperatur, i. e. 22±1 °C durchgeführt. Zur Gewinnung der Proben, Konservierung, Transport und Lagerung der Proben bis zur Versuchsdurchführung ist nichts bekannt. Die Proben wurden während des Versuches mit PE Schlauch ummantelt, um ein Austrocknen zu reduzieren. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die Proben zu den Zeitpunkten der Laborversuche lediglich teilgesättigt waren, und die Verteilung der Feuchte in den Proben zu Versuchsbeginn nicht bekannt und ggf. inhomogen war.

Für die mehrstufigen Versuche unter uniaxialer Belastung wurden Laststufen in der Reihenfolge von 8 MPa, 10 MPa, 11 MPa, 8 MPa und abschließend 13 MPa gewählt (Abb. 9). Die Messdauer nach jeder Laständerung betrug zwischen 45 und 60 Tage.

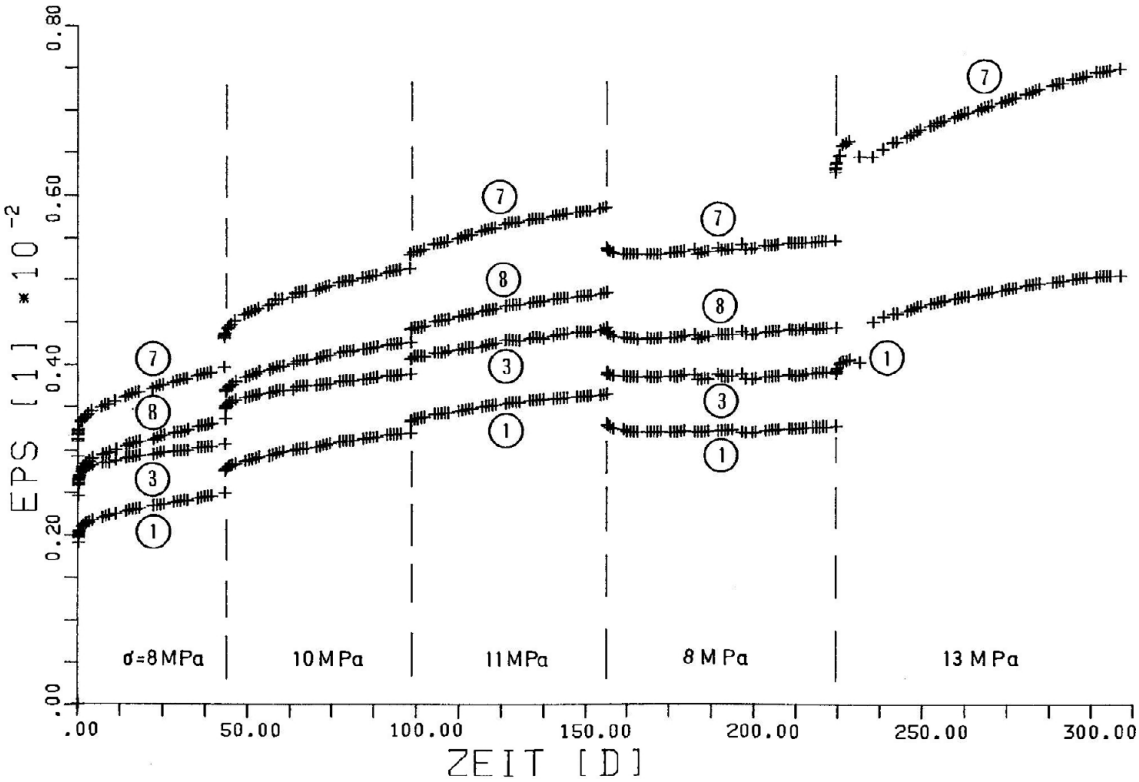

Abb. 9: Verformungs-Zeit-Diagramme ε(t) aus uniaxialen Dauerstandbelastungen in einem Säulenprüfstand für Mehrstufenversuche mit Laststufen 8, 10, 11, 8 und 13 MPa für die Proben 1, 3, 7 und 8 (Schulze 1986); Probenkennung siehe Tab. 1.

Alle vier Proben in Abb. 9 zeigten ein ähnliches Verformungsverhalten. Die Deformationen ε nehmen innerhalb einer Laststufe mit der Zeit kontinuierlich zu bzw. ab. In den ersten ca. 10 – 15 Tagen nach Beginn einer jeden Laststufe verringert sich die Zunahme der Deformation (transiente Deformation), danach nähert sich die Zunahme scheinbar einem linearen Verhalten an (8 MPa und 10 MPa). Schulze (1986) interpretiert, dass sich auch mittelfristig während der Laststufen kein stationäres Kriechen einstellt. Bei der Laststufe 11 MPa ist die nichtlineare (transiente) Phase kurz.

Die transiente Deformation ist erklärbar durch eine Überlagerung von Kriechen und Kompaktion. Möglicherweise traten trotz Teilsättigung hydraulische Effekte (Konsolidierung durch mechanisch hydraulische Kopplung) auf, welche verbunden waren mit lokalen Veränderungen des Porendrucks. Schulze (1986) gibt an, dass *„Die Zeitabhängigkeit des Verformungsverhaltens … keine Gleichgewichts-Substruktur … für das stationäre Kriechen enthält wie es für Salz der Fall ist.“* Mit zunehmender Axialspannung von 8, 10, 11, 13 MPa nimmt die Deformation zu (Schulze, 1986).

Nach der Laststufe 11 MPa folgt eine Laststufe mit nur 8 MPa. Hier nimmt die Deformation verzögert ab (möglicherweise begründet durch mechanisch hydraulische Kopplung), um

nach ca. 10 Tagen erneut leicht zuzunehmen. Diese erneute Zunahme ist ein Hinweis auf langanhaltende Prozesse, die während der Zeit nach Aufbringung der Laststufe 11 MPa nicht abgeschlossen sind. Die letzte Laststufe mit 13 MPa ist nicht interpretierbar, da nicht erklärbare Sprünge im Signal auftreten.

Auffällig ist die Variabilität der Amplitude der Deformation aufgrund der Heterogenität des untersuchten Probenmaterials: Bei Probe 1 wird die kleinste Deformation (ca. $0.35 \cdot 10^{-2}$ vor der Entlastung auf 8 MPa) beobachtet, gefolgt von den Proben 3, 8 und 7 (ca. $0.6 \cdot 10^{-2}$ vor der Entlastung auf 8 MPa). Bei den aufgebrachten Belastungen wurde kein progressives (tertiäres) Kriechen beobachtet. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen (maximale Belastungszeit von 70 Tagen) wurden Deformationen von maximal $0.8 \cdot 10^{-2}$ beobachtet.

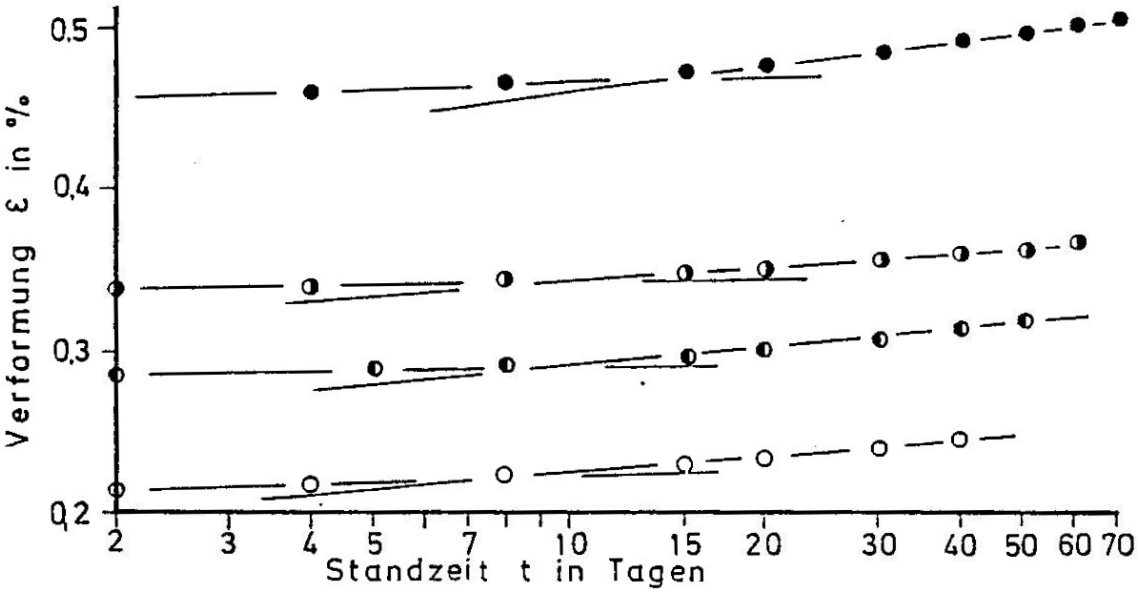

Abb. 10: Verformung ε versus logarithmischer Zeitskala für einzelne Belastungsschritte aus der einaxialen Dauerstandsbelastung für Probe 6. Die axiale Spannung (Last) nimmt von unten (8 MPa, offenes Symbol) nach oben (13 MPa, gefülltes Symbol) mit den Zwischenschritten 10 MPa und 11 MPa zu, aus Schulze (1986). Eine lineare Anpassung für je zwei Teilabschnitte wie von Schulze durchgeführt, ist zwar im ε (log(t))-Diagramm optisch möglich, jedoch kein Beweis für exponentiell abnehmende Deformationsraten, da auch ein nichtlinearer Fit der Kurven durchführbar wäre.

Bei dem in Abb. 11 dargestellten Triaxial-Versuch an Probe 6 betrug der Manteldruck 10 MPa, für die Differentialspannungen $\sigma' = \sigma_{ax} - \sigma_{mantel}$ wurden Laststufen von 10, 11, 13, 15 und 17 MPa gewählt. Die Deformation bei Erhöhung der Last auf 10 MPa nimmt zu, zunächst etwa linear mit der Zeit dann mit abnehmender Änderung der Deformation. Nach der weiteren Erhöhung der axialen Belastung nehmen die Deformationen mit der Zeit zu. In den ersten ca. 10 - 15 Tagen nach Beginn einer Laststufe verringert sich die Deformationszunahme, dies ist erklärbar durch Konsolidierung. Bei der Laststufe 11 MPa ist nach dem Konsolidierungsprozess die Änderung der Deformation verschwindend klein, bei den Laststufen 13 und MPa ist die Zunahme nach ca. 10 Tagen nur näherungsweise

linear, es hat sich noch keine konstante Änderung der Deformation eingestellt. Am Ende der letzten Laststufe mit 17 MPa treten nicht erklärte Abnahmen der Deformationen im Signal auf.

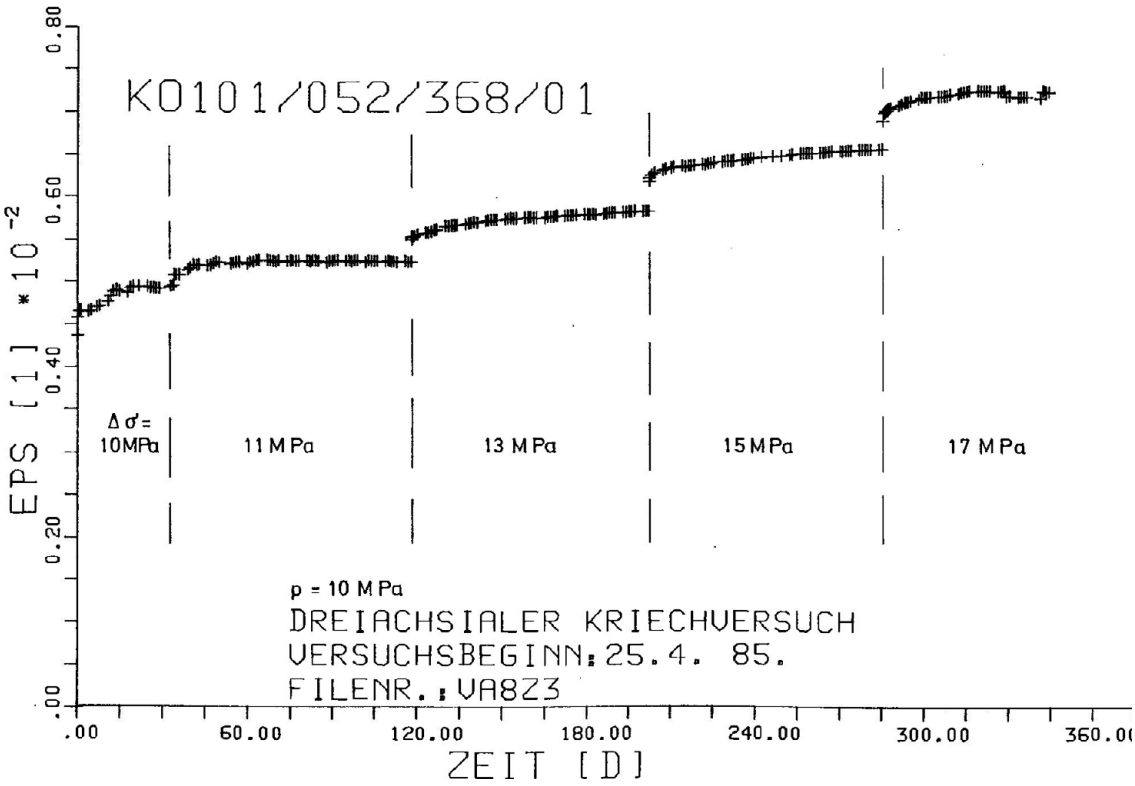

Abb. 11: Verformungs-Zeit-Diagramm aus der dreiaxialen Dauerstandbelastung für einen Mehrstufenversuch mit Differenzlaststufen σ′=10, 11, 13, 15 und 17 MPa für Probe 6, aus Schulze (1986). Probenkennung siehe Tab. 1.

Auch Lux et al. (2005) führten Messungen zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonstein durch (Proben KON-23, KON-24, KON-35 aus Alb und KON-15 bis KON-19 & KON 57 bis KON-61 aus Barrême). Die Messungen wurden an Proben, die bereits mehrere Jahre gelagert waren, bei 30 °C in Triaxialmessständen bei einem Manteldruck von max. 60 MPa durchgeführt. Die Axiallast wurde mittels Gewichten erzeugt. Die Probendimensionen der Proben aus dem Alb ($d = 90$ mm, $l = 180$ mm) waren vergleichbar mit den von Schulze (1986) verwendeten Gesteinsproben. Die Proben aus dem Barrême waren deutlich kleiner ($d = 40$ mm, $l = 80$ mm). Die Größenunterscheide der Proben haben bei Tonsteinen aus heutiger Sicht einen erheblichen Einfluss auf die Vergleichbarkeit von Ergebnissen, in denen hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse eine deutliche Rolle spielen. Es liegen jedoch keine Vergleichsmessungen an Proben desselben Materials mit der jeweils anderen Größe vor.

Exemplarisch stellen Lux et al. (2005: S. 118 Abb. 4.13) Ergebnisse einer 70 Tage laufenden Messung (an der mit KON-34 bezeichneten Probe, Bereich Alb) gemeinsam mit der zeitgleich gemessenen Schallwellenlaufzeit dar (Abb. 12). Für die Probe KON- 34 ist der Bereich mit abnehmender Deformationsrate mit ca. 5 Tagen kürzer als bei den Versuchen von Schulze. Die Abbildung verdeutlicht die Korrelation der Schallwellenlaufzeit mit der Deformation.

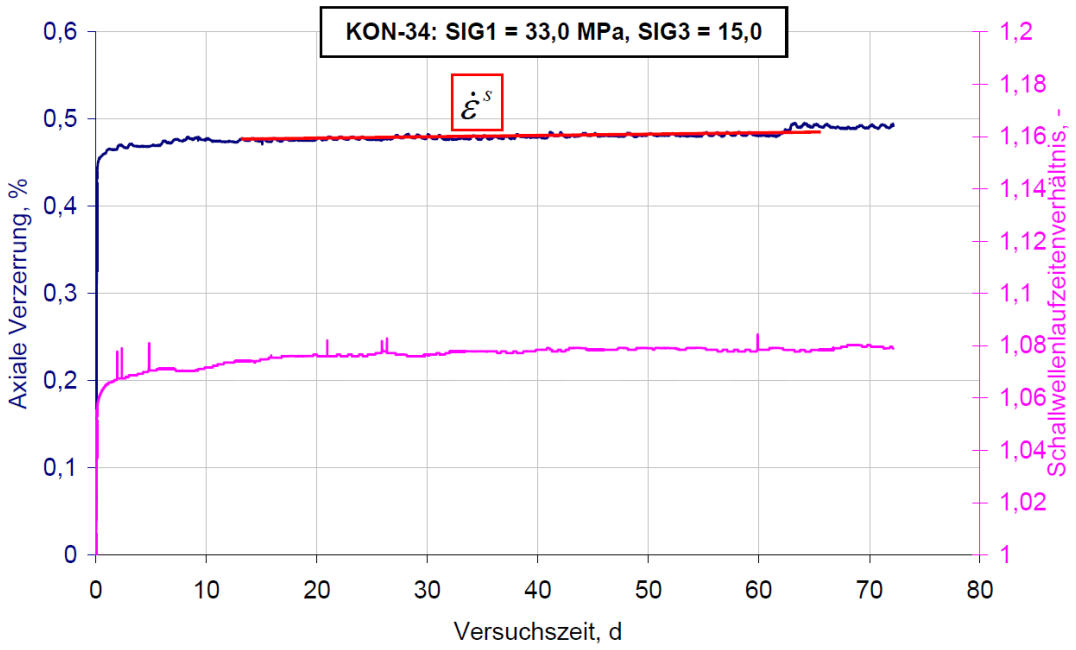

Abb. 12: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für KON-34 mit Angabe der Spannungsbedingungen sowie der Darstellung der Schallwellenlaufzeiten zur Ermittlung der stationären Kriechrate. Die Abbildung ist (Lux et al. 2005) entnommen.

Lux et al. (2005) bestimmen eine konstante Deformationsrate für den Zeitbereich 15-60 Tage und geben stationäre Deformationsraten zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ 1/d ($5.8 \cdot 10^{-12}$ 1/s) und $2 \cdot 10^{-5}$ 1/d ($2.3 \cdot 10^{-10}$ 1/s) für Proben aus Alb und zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ 1/d ($5.8 \cdot 10^{-11}$ 1/s) und $2 \cdot 10^{-5}$ 1/d ($2.3 \cdot 10^{-10}$ 1/s) für Proben aus Barrême an. Abbildung 4.19 in Lux et al. (2005) zeigt eine schwache Abhängigkeit der Deformationsraten von der Belastung und der Lithologie. Aufgrund der Variabilität der Versuchsbedingungen (z. B. Probenalter, Probenlagerung und Probengröße) sowie wegen des Materials selbst (Unterkreide vs. Malm) kann aus den vorliegenden Werten keine belastbare Aussage zum Langzeitdeformationsverhalten des Fladentonsteins abgeleitet werden.

5.2 *Mont Terri + Bure: Deformationsraten und Abhängigkeiten*

Zhang & Laurich (2020) vergleichen Deformationsraten von Proben der sandigen sowie tonigen Fazies des Opalinustons (OPA aus Mont Terri) mit Tonstein aus dem Callovo-Oxfordium (COX aus Bure, Zhang et al. 2013). Der Vergleich zeigt die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der Herkunft der untersuchten Tonstein-Proben (siehe Abb. 12). Die Daten zeigen auch die Abhängigkeit der Deformationsrate von der Differentialspannung. Für die tonige Fazies des OPA ist diese Abhängigkeit nicht so deutlich, wie für die COX Proben und die sandige Fazies des OPA. Die Deformationsraten liegen allesamt unter denen, die für die weicheren Unterkreidetone (Alb, Barrême) bestimmt wurden.

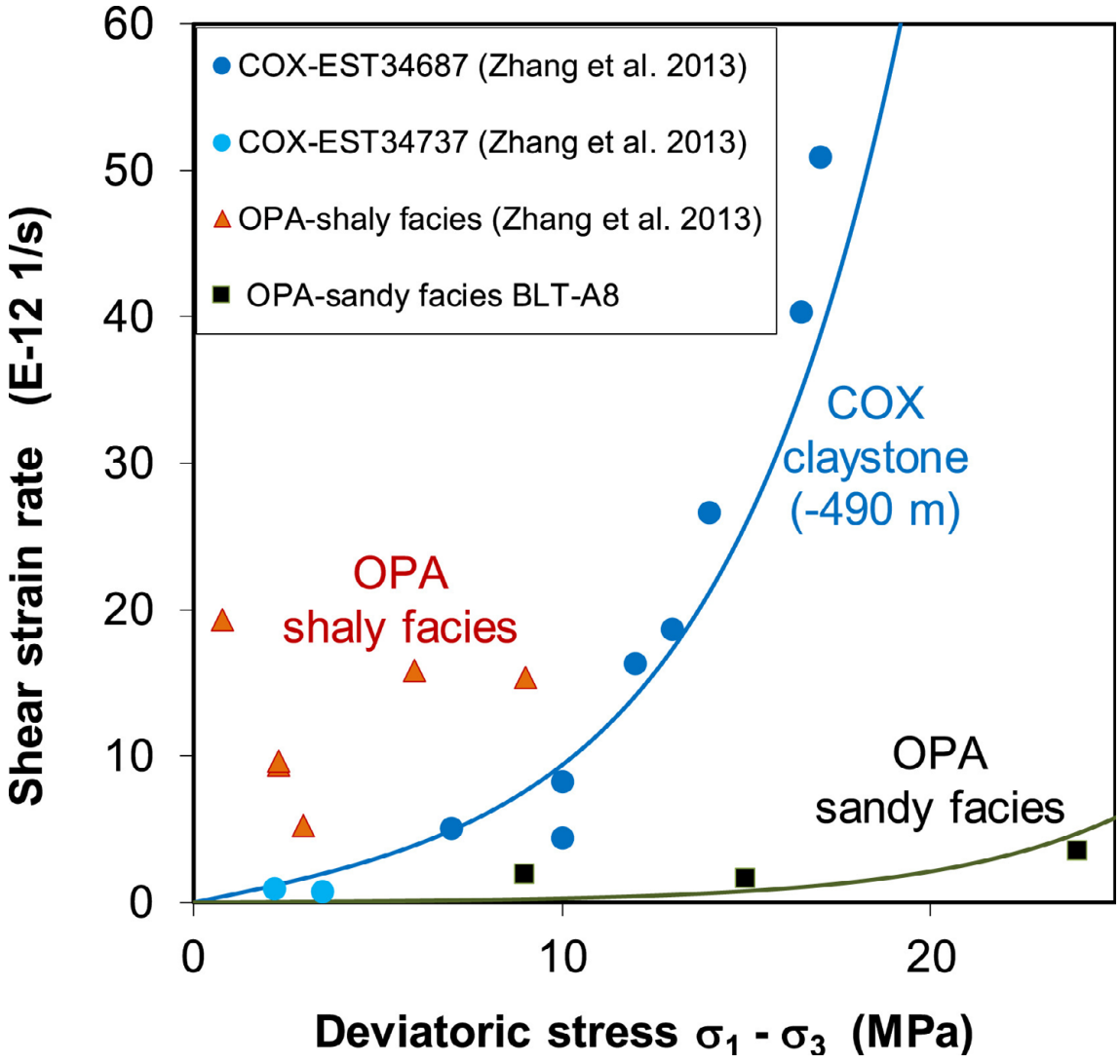

Abb.13: Deformationsraten nach definierter Messdauer (beginnend ca. 130 Tage nach Belastungsbeginn, endend bei ca. 250 Tage nach Belastungsbeginn) für Proben aus Mont Terri und Bure (Zhang et al. 2013) verglichen mit Daten aus Zhang & Laurich (2020). Abbildung aus Zhang & Laurich (2020).

Arbeiten von Gräsle & Plischke (2009, 2010) weisen auf die Abhängigkeit des Verformungsverhaltens von der Sättigung der Proben sowie vom Porendruck hin.

Arbeiten von Gräsle & Plischke (2009, 2010) sowie Zhang et al. (2015) zeigen die Abhängigkeit des Langzeitdeformationsverhaltens von der Probenorientierung (Anisotropie). Für S-Proben (senkrecht zur Schichtung) beobachten Gräsle et al. (2019) generell höhere axiale Deformationsraten (siehe auch Kapitel 6) als für P-Proben (parallel zur Schichtung).

Daten zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonsteinen aus den Hangendschichten der Schachtanlage Konrad und ergänzende Daten aus Bure und Mont Terri zeigen eine große Variabilität und Anisotropie. Auf die Ursachen dieser Variabilität wird in Kapitel 6 mit prinzipiellen Überlegungen sowie in Kapitel 7 im Rahmen einer Diskussion eingegangen. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass auf Grund der oben zitierten Arbeiten ein mögliches langanhaltendes Deformationsverhalten von Tonstein nicht ausgeschlossen werden kann.

Lux et al. (2002) und Lux et al. (2005) betonen, dass Messungen zum Kriechen und Schrumpfen/Quellen noch ausstehen, ebenso wie Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Sättigung auf die Verformungsprozesse. Für Proben aus Mont Terri führte z. B. Czaikowski (2011) entsprechende Versuche durch und weist signifikante temperatur- und sättigungsabhängige Änderungen nach. Zhang et al. (2013) weisen darauf hin, dass bei Wasserzugabe eine Volumenzunahme von bis zu 10% für Proben des Opalinustons und des Callovo-Oxfordium durch Quellen auftreten kann. Herold et al. (2020) weisen darauf hin, dass das Quellen von Tonstein neben dem Kriechen bei der Dimensionierung von Streckenausbauten Berücksichtigung finden muss.

6 Zur Frage der Existenz eines Kriechverhaltens bei Tonstein

Für die Beurteilung der langfristigen Entwicklung untertägiger Hohlräume in Tonsteinen und für die Bemessung eines erforderlichen Streckenausbaus ist von entscheidender Bedeutung, ob bei den aufgeschlossenen Tonsteinen mit einem langanhaltenden Kriechverhalten gerechnet werden muss, insbesondere mit dem Auftreten signifikanter, stationärer Verformungsanteile bei konstanter Effektivspannung („sekundäres Kriechen“). Die Bedeutung dieser Frage ergibt sich daraus, dass die Konvergenz untertägiger Hohlräume bei Vorliegen eines derartigen Kriechverhaltens zwangsläufig mit der Zeit bis zum vollständigen Verschluss der Hohlräume führt, während die Konvergenz ohne „sekundäres Kriechen“ nach Abklingen

der transienten Verformungsanteile[15] bei verbleibender Restöffnung der Hohlräume zum Stillstand kommt (sofern nicht Spannungszustände oberhalb der Schädigungsgrenze vorliegen, die entsprechend Abschnitt 3.5 langfristig zu Entfestigung und Materialversagen und damit zu fortschreitender Konvergenz oder Bruchprozessen führen).

Auch bei einer klaren Beschreibung der zugrundeliegenden Einzelprozesse, ist es außerordentlich schwierig, die Existenz bzw. die Nichtexistenz des sekundären Kriechens experimentell und auswertetechnisch zweifelsfrei nachzuweisen. Dies ist insbesondere deswegen der Fall, weil sich Auswirkungen von primärem Kriechen (welches mittelfristig abklingt) und sekundärem Kriechen (welches niemals abklingt) in den experimentell zugänglichen Zeitintervallen und hinsichtlich der messtechnisch zugänglichen Größen phänomenologisch nicht signifikant unterscheiden (vgl. auch Betrachtungen zu Abb. 4 in Abschnitt 2.4). Die experimentelle Klärung der Frage nach der Existenz einer stationären Verformungskomponente bei konstanter Effektivspannung für Tonstein ist daher äußerst schwierig.

Der Hintergrund dieser Schwierigkeit wird im Folgenden genauer dargestellt.

Im allgemeinsten Fall ist die Deformationsrate im Kriechversuch nach Aufbringung einer Belastung unterhalb der Schädigungsgrenze zu beschreiben als

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_{Konsol}(t) + \dot{\varepsilon}_{prim}(t) + \dot{\varepsilon}_{stat} \tag{11}$$

mit $\dot{\varepsilon}_{Konsol}(t)$ = transienter, abklingender Verformungsanteil aufgrund zeitlich veränderlicher Effektivspannung (Konsolidierung)

$\dot{\varepsilon}_{prim}(t)$ = bei konstanter Effektivspannung transienter, abklingender Verformungsanteil („primäres Kriechen“). Wenn kein primäres Kriechen auftritt ist $\dot{\varepsilon}_{prim}(t) \equiv 0$.

$\dot{\varepsilon}_{stat}$ = bei konstanter Effektivspannung stationärer Verformungsanteil („sekundäres Kriechen“). Wenn kein sekundäres Kriechen auftritt ist $\dot{\varepsilon}_{stat} = 0$.

[15] Dies bezeichnet hier nur die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebenen Verformungsanteile, die auf Mechanismen beruhen, die bei konstanter Totalspannung (wie im Kriechversuch) transient abklingendes Verhalten zeigen. Unter den Randbedingungen untertägiger Hohlräume treten natürlich auch diejenigen Verformungsanteile, die auf Mechanismen beruhen, die bei konstanter Effektivspannung eine stationäre Deformationsrate verursachen (vgl. Abschnitt3.4), in transienter Weise in Erscheinung, da hier die Differentialspannung zeitlich nicht konstant ist, sondern der Spannungszustand sich mit fortschreitender Hohlraumschließung asymptotisch einem hydrostatischen (isotropen) Zustand annähert, oder bei einem Schwellenwert des Kriechens auf einen anisotropen Grundspannungszustand.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, kann der Prozess der Konsolidierung ($\dot{\varepsilon}_{Konsol}(t)$, also die elasto-plastische Verformung durch zeitlich veränderliche Effektivspannungen als Folge langsamer Drainage bei konstanter Totalspannung) im Tonstein über Jahre andauern. Das Erreichen eines Zustands konstanter Effektivspannungen ist daher innerhalb praktikabler Versuchsdauern oft nicht möglich[16]. Außerdem lässt sich ein ggf. auftretendes primäres Kriechen ($\dot{\varepsilon}_{prim}(t)$, also eine auch bei konstanter Effektivspannung zeitlich variable Deformationsrate) phänomenologisch allein anhand der Deformationskurve nicht von der Verformung durch Konsolidierung unterscheiden. Auf die Schwierigkeiten, diese Unterscheidung mittels Porendruckmessung im Inneren der Probe zu erreichen, wurde in Abschnitt 3.3 bereits hingewiesen.

Die Zeitskala des Abklingens eines ggf. auftretenden primären Kriechens lässt sich durch Variation der Probengröße nicht beeinflussen. Da primäres Kriechen mit der Annäherung innerer (mikrostruktureller) Zustandsgrößen an ein Fließgleichgewicht verbunden ist, ist es eine plausible Erwartung, dass die mikrostrukturellen Veränderungen und damit auch das Abklingen des primären Kriechens mit der auftretenden Deformation verknüpft sind, also bei niedrigeren Spannungen und damit niedrigen Deformationsraten länger dauern als bei höheren Spannungen und damit hohen Deformationsraten. Da die beobachteten transienten Deformationsraten bei Tonsteinen generell niedrig sind (im Vergleich zu Steinsalz und unverfestigtem Ton), ist mit einem langsamen Abklingen eines etwaig auftretenden primären Kriechens zu rechnen. Eine Beschleunigung des Abklingens durch höhere Deformationsraten ist zwar grundsätzlich durch Erhöhung der aufgebrachten Differentialspannung möglich, praktisch sind diesem Ansatz aber enge Grenzen gesetzt, da Tonsteine eher geringe Festigkeiten aufweisen und die im Versuch aufgebrachten Differentialspannungen die Schädigungsgrenze nicht überschreiten dürfen.

Aus der langen Dauer transienter Verformungsanteile ergibt sich das Problem, dass in Langzeitdeformationsversuchen („Kriechversuchen“, d. h. uniaxialen oder triaxialen Langzeittests mit deviatorischer Belastung bei konstanter Totalspannung) an Tonstein zumindest bei gesättigten oder näherungsweise gesättigten Proben i. A. über die gesamte Versuchsdauer transiente Verformungsanteile in relevantem Ausmaß beobachtet werden. Ein etwaig vorhandenes stationäres Kriechverhalten ist daher i. A. nicht isoliert beobachtbar.

Allein anhand der Betrachtung gemessener $\varepsilon(t)$-Verläufe ist eine Feststellung des Erreichens von Stationarität praktisch gar nicht möglich, da unser Auge sehr schnell einen „linearen Kurvenabschnitt“ diagnostiziert, wo in Wahrheit immer noch eine leichte Krümmung vorliegt. Die Diagnose anhand von $\dot{\varepsilon}(t)$-Kurven ist grundsätzlich robust möglich.

[16] Durch Verkleinerung der Probenlänge l ist zwar eine Verkürzung der benötigten Zeiten proportional zu l^2 möglich, die Heterogenität vieler Tonsteine (Laminierung, knollige oder linsenartige Einschaltungen, Fossilien, …) limitiert diese Verkleinerung aber, wenn die Repräsentativität der Proben gewahrt bleiben soll.

Dafür müssen aber die $\dot{\varepsilon}(t)$-Werte erst aus jeweils mehreren gemessenen $\varepsilon(t)$-Werten berechnet werden, und die Wahl einer geeigneten Berechnungsvorschrift dafür stellt – zumindest bei niedrigen Deformationsraten – eine große, oft nicht zufriedenstellend lösbare Herausforderung dar. Die dabei konkurrierenden Anforderungen, einerseits das Rauschen in den $\dot{\varepsilon}(t)$-Werten auf ein erträgliches Maß herunter zu pegeln, und andererseits die Kurvenverläufe nicht zu stark zu glätten (was sonst z. B. scheinbare Linearität vortäuschen kann) sind nur schwer vereinbar.

Als Nachweis von Langzeitkriechverhalten reicht es nicht aus, nach einer bestimmten Versuchsdauer die dann beobachtet Deformationsrate als stationäre (sekundäre) Kriechrate $\dot{\varepsilon}_{stat}$ zu interpretieren. Vielmehr bedarf es grundsätzlich eines positiven empirischen Nachweises des vermuteten stationären Kriechens, in dem die Messdaten durch ein Modell mit entsprechendem Materialverhalten signifikant besser beschrieben werden, als dies durch ein Modell ohne dieses Materialverhalten möglich ist. Einzige bisher bekannte Arbeit, in der ein derartiger Nachweis geführt wurde, ist Gräsle et al. (2019).

Für einen belastbaren Nachweis einer stationären Kriechphase ist sicherzustellen, dass sowohl Konsolidierung als auch eine potenzielle primäre Kriechphase abgeklungen sind. Dieser Nachweis kann nur durch sehr lange Kriechversuche an Tonsteinproben gelingen. wie aus der prinzipiellen und theoretischen Darstellung in Abb. 13 ersichtlich wird. Die in Abb. 13 verwendeten beispielhaft gewählten Parameter sind zwar typisch für Tonsteine, können aber nicht allgemein zur Abschätzung von erforderlichen Versuchsdauern dienen. Erst danach weichen die „gemessenen“ Verformungen mit zunehmender Versuchsdauer mit einer hinreichend signifikanten Abweichung ($1-R^2$) von einer Modellbeschreibung ohne Kriechen (blaue, grüne und orange Geraden) ab. Selbst Langzeitversuche mit konstanter Belastung und Versuchsdauer von über einem Jahr entsprechen i. A. eher dem deutlich zu kurzen Zeitbereich, der durch die blaue Kurve in Abb. 13 anpasst ist, erlauben also kaum einen abgesicherten Nachweis von Langzeitkriechverhalten. Die erforderliche Verlängerung der Versuchsdauer, um belastbarere Nachweise z. B. entsprechend dem Zeitraum, der mit der grünen oder orangen Kurve in Abb. 13 angepasst ist, zu erhalten, ist oft nicht praktikabel (man beachte die logarithmische Skalierung der Abszisse in Abb. 13).

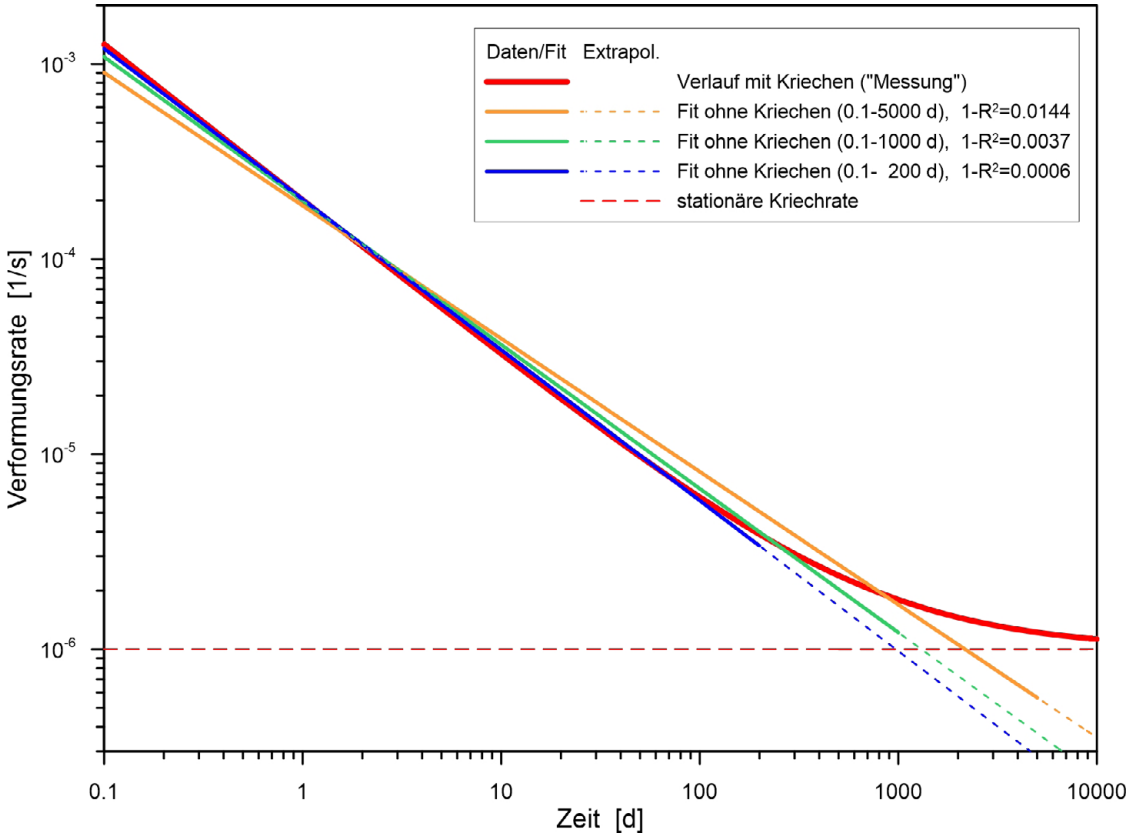

Abb. 14: Beispielrechnung zur Identifikation eines vorhandenen Kriechverhaltens; die zugrunde liegenden Parameter sind nicht für alle Tone gültig. In Rot dargestellt ist der Verlauf einer synthetischen Messung mit stationärem Kriechen. Die Geraden zeigen Anpassungen eines Modells ohne stationäres Kriechen an unterschiedlich lange Abschnitte dieser Kurve, die gestrichelt dargestellten Bereiche zeigen die Extrapolation der jeweiligen Anpassung. Für die blaue Gerade (Anpassungszeitraum 0.1 – 200 d) ist keine signifikante Abweichung (quantifiziert als 1 − R²) zwischen Modell und Messung feststellbar, für die grüne Gerade (0.1 – 1000 d) wird die Abweichung schon deutlicher und für die orange Gerade (0.1 – 5000 d) wird sie so groß, dass die Eignung des Modells ohne stationäres Kriechen für den Datensatz ausgeschlossen werden kann.

Außerdem stellt Abb. 13 die Situation noch insofern idealisiert dar, als hier eine fehlerfreie („ideale“) Messung angenommen wurde, bei der die Messdaten exakt den Verlauf des physikalischen Prozesses abbilden. Eine reale Messung wird immer eine gewisse Streuung der Werte um den idealen Kurvenverlauf aufweisen, also auch ein physikalisch exaktes Beschreibungsmodell die Daten nicht mit einem Bestimmtheitsmaß von $R_{ideal}^{2} = 1$, sondern nur mit $R_{real}^{2} < 1$ beschreiben. Zum Nachweis einer signifikant besseren Datenbeschreibung durch ein Modell mit sekundärem Kriechen kann daher nicht die Signifikanz von $1 - R^2$, sondern nur die von $R_{real}^{2} - R^2$ herangezogen werden, was naturgemäß schwieriger ist.

Gräsle et al. (2019) haben vier Langzeitdeformationsversuche (drei mit Laufzeiten von knapp 300 d, einen über fast 700 d) an Opalinuston aus Mont Terri ausgewertet (Abb. 14). Dilatanzbehaftete Verformungsanteile können in den Versuchen nicht mit absoluter

Sicherheit ausgeschlossen werden. Sie erscheinen aber angesichts der sehr langen erfassten Phasen mit abklingender Verformungsrate (insbes. bei Probe 13070) sehr unwahrscheinlich, da hier keine Indizien für das Einsetzen eines beschleunigten „Kriechens“ erkennbar sind. Im Gegensatz hierzu zeigt Probe 13067 den Verlauf, der bei dilatanzbehafteten Verformungsanteilen zu erwarten wäre. Ein robusterer Test auf das Vorliegen dilatanzbehafteter Verformungsanteile wäre theoretisch anhand der Analyse höherer Ableitungen von ε > möglich, z. B. wenn $d^3\varepsilon/dt^3$ für späte Zeiten positive Werte annimmt. Die Berechnung dritter Ableitungen aus Datensätzen, bei denen bereits die erste Ableitung nur mit Mühe aus dem Rauschen herausragt, ist aber praktisch nicht möglich.

Mit den Auswertungen von Gräsle et al. (2019) konnte in drei von vier Fällen eine signifikant bessere Datenerklärung durch Modelle mit Kriechverhalten nachgewiesen werden. Die Existenz von Langzeitkriechverhalten ist demnach für den untersuchten Tonstein sehr wahrscheinlich. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die ermittelten stationären Kriechraten trotz der hohen Differentialspannungen von 10 bis 12 MPa nur $\dot{\varepsilon}_{stat} \approx 3.8 \cdot 10^{-6}$ d^{-1} bei einer Belastung senkrecht zur Schichtung und sogar nur $\dot{\varepsilon}_{stat} = 2.5 \ldots 4.0 \cdot 10^{-7}$ d^{-1} bei einer Belastung parallel zur Schichtung erreichten. Die Differentialspannungen lagen trotz des hohen aufgebrachten Stützdrucks von 23 – 24 MPa bereits in der Nähe der Dilatanzgrenze, wie das Versagen von drei weiteren Proben der gleichen Versuchsserie bei einer Differentialspannung von 12 MPa belegt (vgl. Abb. 14). Bei Belastungen mit deutlich niedrigeren Differentialspannungen – wie sie z. B. in Konrad bereits in wenigen Metern Entfernung von aufgefahren Hohlräumen zu erwarten sind – wären die zu erwartenden stationären Kriechraten natürlich noch weitaus geringer.

Die Unterschiede der ermittelten stationären Kriechraten in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung unterstreichen die Tatsache, dass für Tonstein generell bei einem etwaig vorhandenen Langzeitkriechverhalten mit einer ausgeprägten Anisotropie gerechnet werden muss.

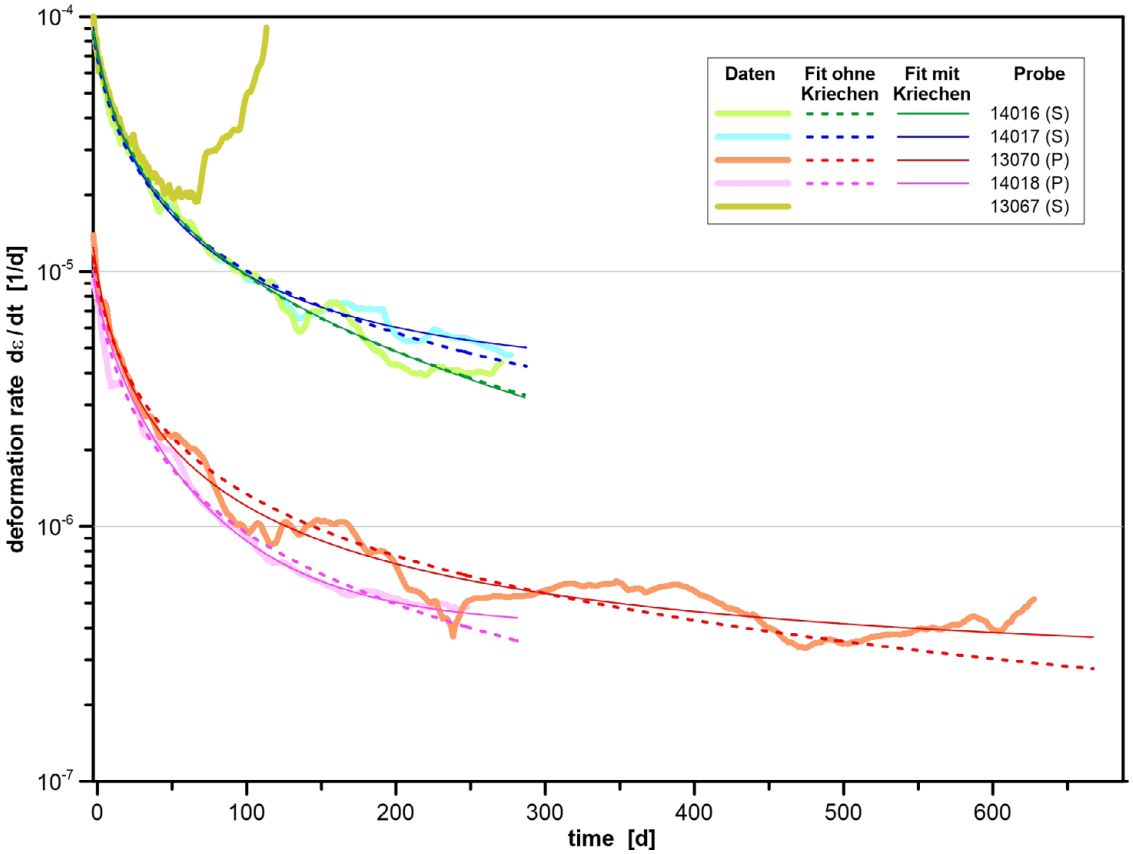

Abb. 15: Gemessene Deformationsraten sowie ihre Beschreibung durch Modelle mit und ohne Kriechverhalten für 5 Langzeitdeformationstests an Opalinuston aus Mont Terri (Daten aus Gräsle et al., 2019). Mit Ausnahme der Probe 14016(S) beschreibt das Modell mit Kriechverhalten (durchgezogene Linie) die Messdaten stabiler Tests signifikant besser, als das Modell ohne Kriechverhalten (gestrichelte Linie). Nur bei Probe 14016(S) stimmen beide Modelle überein. Der nicht auswertbare Test an Probe 13067(S) zeigt das Beispiel eines langsamen Kriechbruchs bei minimaler Überschreitung der Dilatanzgrenze.

Indirekte Rückschlüsse aus In-situ-Messungen, insbesondere Bestimmungen des In-situ-Spannungszustandes durch z. B. die Überbohrmethode, weisen ebenfalls auf ein allenfalls sehr geringes Kriechvermögen konsolidierter Tonsteine hin (Doe & Vietor 2012).

Unter statischen Ortsrandbedingungen führt die Kriechverformung in einem kriechfähigen Material üblicherweise langfristig zum vollständigen Abbau differentieller Spannungen, also zur asymptotischen Annäherung an einen hydrostatischen Spannungszustand. Der Nachweis von In-situ-Differentialspannungen von einigen MPa in Tongesteinen (z. B. Doe & Vietor 2012 für Mont Terri) würde somit im Widerspruch zu einem Kriechverhalten von Tonstein stehen, das langfristig zu einem Abbau des Scherspannungsanteils der primären Gebirgsspannungen führt. Dieser Sachverhalt ist allerdings noch kein Beweis dafür, dass Kriechverformungen des Opalinuston aus Mont Terri grundsätzlich nicht existieren, da keine statischen Ortsrandbedingungen an dieser Lokation vorliegen. Vielmehr führt die rezente Plattentektonik und die damit einhergehende alpine Gebirgsbildung in der Region

des Mont Terri Untertagelabors zu einer fortgesetzten Deckenüberschiebung entlang einer basalen Überschiebungsfläche. Dies verursacht eine andauernde Scherbeanspruchung des Gebirges in der Überschiebungsfläche und damit auch der Schichten des darüber befindlichen Opalinustons. Die Langsamkeit der tektonischen Bewegung liefert aber in Verbindung mit den gemessenen Differentialspannungen sehr niedrige Obergrenzen für das Kriechverhalten des Opalinuston.

Ein Kriechverhalten bei Tonsteinen ist also nicht generell auszuschließen. Belastbare Nachweise dafür sind aber nur in geringem Umfang vorhanden (s. Abb. 14) und belegen auch nur ein sehr geringes Kriechvermögen.

7 Diskussion

Wie in den vorgehenden Kapiteln 2, 3 und 6 erwähnt und theoretisch erläutert, wird das beobachtete mechanischen Kurz- und Langzeitverhalten von Tonsteinen durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die hier stichpunktartig zusammengefasst werden.

Zum einen sind die Eigenschaften des untersuchen Materials zu beachten:

- die mineralogische Zusammensetzung,
- der Aufbau der Matrix im geologischen Sinne durch feinkörniges Material oder durch grobkörniges Material: dieses bedeutet implizit, durch welche Bestandteile die Lastübertragung im Gestein stattfindet d. h. was ist das „loadbearing“ Material ist,
- die Kornverteilung,
- das Maß der Verfestigung des Tonsteins,
- der Anteil des quellfähigen Materials im Gestein,
- die Anisotropie des Tonsteins.

Zum anderen werden die Versuchsergebnisse zur Bestimmung des zeitabhängigen Verhaltens der gemessenen Deformation und Deformationsraten durch veränderliche Zustände der Probe sowie die Versuchsdurchführung beeinflusst (Kapitel 2):

- die Lagerung der Probe bis zum Versuchsbeginn,
- die Konsolidierung und Vorbelastung der Probe,
- der Sättigungszustand der Probe (teilgesättigt, vollgesättigt),

– ob die Probe im Versuch drainiert wird oder nicht,
– die Temperatur, bei der gemessen wird,
– die Belastungsgeschwindigkeit,
– die Art und Höhe der Belastung/Beanspruchung,
– wird belastet oder entlastet?
– Wird der Versuch lange genug gefahren, um die unterschiedlichen Phasen sauber charakterisieren zu können?
– Welcher Bereich der Kurve wird ausgewertet?
– …

Diese Liste der Abhängigkeiten macht deutlich, dass das Langzeitdeformationsverhalten von Ton von verschiedenen Faktoren abhängt und dadurch extrem variabel ist. Um Versuchsergebnisse, die an Tonsteinen gewonnen wurden, vergleichen zu können, müssen diese unter gleichen Versuchsbedingungen erhalten worden sein. Eine generelle Standardisierung der Versuchsbedingungen ist jedoch nicht gegeben. Darüber hinaus sind Unterschiede des Verhaltens des Tonsteins in Labor und im Feld aufgrund einer Skalenabhängigkeit zu beachten. Zum Beispiel wird die Festigkeit des Gebirges in größerem Maßstab auch durch Schwächezonen[17] in Form von Trennflächen, wie in Abb. 2 exemplarisch gezeigt, beeinträchtigt. Diese Skalenabhängigkeit kann nicht mit den hier vorgestellten kleinskaligen Laborversuchen bestimmt werden.

Die in der Literatur angegebenen Deformationsraten für die Tonsteine aus Mont Terri (Opalinuston aus dem Alenium) oder Bure (Callovo-Oxfordium) sind nicht direkt mit den an den jüngeren Unterkreidetonen (Alb, Barrême) bestimmten vergleichbar. Dies ist zum einen in standortbedingten Unterschieden wie der Zusammensetzung, der Genese, dem unterschiedliche Alter und entsprechend unterschiedlichen Versenkungstiefe der Gesteine begründet und zum anderen in den unterschiedlichen Versuchsbedingungen, z. B. Probengrößen, Sättigungszustand und Zeiten, für welche die angegebenen Deformationsraten bestimmt wurden. Entsprechend lassen sich auch die oben angeführten Ergebnisse nicht unmittelbar auf die jurassischen Tonsteine (Fladentonstein-Serie) im Bereich des Schachtes Konrad 2, insbes. 2. Sohle (850m-Sohle) übertragen.

Für die Abschätzung des Kriechverhaltens des Gebirges ist die Kenntnis über die Bedingung im Gebirge nötig, insbesondere: minimale und maximale Hauptspannung, Sättigung, Porendruck, Temperatur. Ein langanhaltendes Deformationsverhalten mit

[17] Für den Bereich der Füllorterweiterung verweisen Lux et al. (2005) auf frühere Arbeiten der DBE, nach denen dieser Bereich tektonisch gestört ist.

stationärer Deformationsrate (Kriechverhalten) kann bei Tonsteinen nicht generell ausgeschlossen werden. Auch ein maximaler Betrag für die stationären Deformationsraten kann nicht angegeben werden, da es bei entsprechenden Spannungsverhältnissen (hohe Scherspannungen) zum tertiären Kriechen mit anschließendem Bruch kommen kann. In diesem Sinne ist wie für alle Gesteinsarten eine Kalibrierung der Modellparameter an den Feldmessungen immer durchzuführen (z. B. Lacasse & Berre, 2005, Lux et al. 2005).

Wie gezeigt wurde, erlaubt die derzeit vorhandene bzw. nicht vorhandene Datengrundlage für die Gesteine der Fladentonstein-Serie in Konrad keine belastbare Beschreibung des Langzeitdeformationsverhaltens bzw. des sekundären Kriechverhaltens. Insbesondere können Modellrechnungen für das Langzeitdeformationsverhalten nicht mit validen Stoffmodellen incl. der zugehörigen Parameterwerte unterlegt werden.

Wenn belastbare Charakterisierungen des Materialverhaltens auf Grundlage von Laborversuchen nicht verfügbar sind, kann trotzdem die Möglichkeit bestehen, die zukünftigen In-situ-Entwicklungen auf der Basis von Beobachtungen des bisherigen In-situ-Verhaltens abzuschätzen (sofern geeignete In-situ-Messdaten verfügbar sind): Statt des üblichen Ansatzes numerischer Modelle, eine Prognose auf der Grundlage einer im Detail mechanistischen Beschreibung (gekennzeichnet durch eine räumliche Verteilung verschiedener Gesteine und deren Charakterisierung durch geeignete Stoffgesetze und zugehörige Materialparameter) zu berechnen, wird dann eine eher phänomenologische und integrale Beschreibung (d. h. eine nicht mehr im Detail räumlich auflösende Beschreibung, z. B. eine Charakterisierung mittels Konvergenzdaten an einzelnen relevanten Punkten des Grubengebäudes) verwendet. In einem derartigen Ansatz käme zum Ausdruck, dass bei unzureichender Kenntnis der relevanten Materialparameter der vorhandenen Gesteine die In-situ-Messdaten eine aussagefähigere Grundlage für die Beschreibung der lokalspezifischen Situation und die Prognose der zukünftigen Entwicklung der untertägigen Hohlräume darstellen können. Voraussetzung für die Nutzung entsprechender In-situ-Datensätze für Prognosen über die Zeiträume, die für die Bemessung des Ausbaus (max. ca. 45 Jahre) notwendig sind, ist allerdings der Nachweis der Extrapolierbarkeit der Daten für Zeiträume, die in der Messung nicht enthalten sind und eine fundierte Abschätzung der damit verbundenen Prognoseunsicherheiten. Ein Bericht zur Erarbeitung einer entsprechenden wissenschaftlichen Methodik für die Entwicklung von Prognosemodellen und Unsicherheitsabschätzungen für Zeitreihen von Streckenkonvergenzdaten, angewendet auf Langzeitmessungen aus Schacht Konrad, ist in Vorbereitung (Gräsle in Vorbereitung).

8 Zusammenfassung

Im Schacht Konrad wird das Füllort des Schachtes Konrad 2 auf der 2. Sohle (850 m-Sohle) in der Fladentonstein-Serie mit Zwischenlagen aus Kalkstein mit Mergeltonsteinlagen errichtet. Diese hat eine geringe Festigkeit und es werden in situ zeitlich veränderliche Verformungen beobachtet. Ziel dieser Studie war die Recherche zu Daten zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonsteinen aus dem entsprechenden Bereich aus dem Endlager Konrad, die zur Beantwortung der Frage nach dem Langzeitdeformationsverhalten herangezogen werden könnten. Bei der Recherche wurden Originalberichte, Dissertationen, zusammenfassende Berichte und Veröffentlichungen berücksichtigt. Dabei zeigte sich, dass für das Füllort zwar Daten der Fladentonstein-Serie zum Kurzzeitdeformationsverhalten (d. h. Elastizitätsmoduli und Festigkeitswerte) jedoch keine Daten zum Langzeitdeformationsverhalten vorhanden sind.

Mittels grundsätzlicher Überlegungen zum Thema Langzeitdeformationsverhalten von Tonstein werden die prinzipiell auftretenden drei Phasen (transiente abklingende, stationäre, transiente progressive Verformungsanteile) des Langzeitdeformationsverhaltens erläutert und es wird auf die Ursachen auf makroskopischer und mikroskopischer Skala eingegangen.

Die zunächst nach Belastung auftretende „transiente Deformation“ ist erklärbar durch eine Konsolidierung (Volumenreduktion), z. B. aufgrund mechanisch-hydraulischer Kopplung sowie teilweise damit verbundenem primären Kriechen, d. h. strukturellen Veränderungen im Korngerüst. Die Zeit für die Konsolidierung verlängert sich mit abnehmender hydraulischer Durchlässigkeit sowie quadratisch mit der Probenlänge. Während des transienten Prozesses nimmt die Deformationsrate langsam ab und die Zeitabhängigkeit der Deformation kann abschnittsweise linear angenähert (quasilinear) werden, was eine scheinbare Linearität des Prozesses vortäuscht. Die dabei erhaltene nur scheinbar konstante Deformationsrate ist von der Länge des dabei betrachteten Zeitintervalls abhängig. Das transiente Verhalten kann entweder zum Stillstand kommen oder in das „sekundäre Kriechen“ durch Umlagerungen im Korngerüstes übergehen. Das stationäre Kriechen ist theoretisch volumeninvariant und zeigt eine lineare Abhängigkeit der Deformation mit der Zeit. Bei entsprechend hoher Differentialspannung (verbunden mit Scherspannung) kommt es zu zunehmendem „tertiären Kriechen“. Hier steigt die Deformationsrate an, bis es durch progressive Rissbildung in der Probe zum Versagen des Gesteins kommt.

Laborergebnisse für weichere Unterkreidetone (Alb, Barrême aus Konrad 101) sowie Tonsteine aus Bure und Mont Terri zeigt die Variabilität der Daten aufgrund der Unterschiedlichkeit der Gesteine, aber auch aufgrund von Einflüssen der Messdauer, der maximalen und minimalen Hauptspannung, des Porendruckes, der Sättigung, der Temperatur, der Mineralogie, Kornverteilung und Anisotropie.

Die Recherchen zeigen, dass keine belastbaren Datensätze vorliegen, bei denen die Messungen lange genug durchgeführt wurden, um sekundäres Kriechen entweder zu belegen oder auszuschließen. Messungen müssen lange genug (auch über mehrere Jahre hinweg) durchgeführt werden, um als Grundlage für die Bestimmung von validen Stoffmodellen mit den zugehörigen Parameterwerten zu dienen.

Literaturverzeichnis

BGE (2021): 09. Juni 2021: BGE informierte in einer digitalen Veranstaltung zum Fortschritt der untertägigen Baumaßnahmen im Endlager Konrad (Betrifft Konrad). Germany (BGE), 9.6.2021.

Biot, M. A. (1941): General Theory of Three-Dimensional Consolidation. Journal of applied physics, 12, 2: 155-164. DOI:10.1063/1.1712886.

Blake, O. O., Faulkner, D. R. & Rietbrock, A. (2013): The effect of varying damage history in crystalline rocks on the P- and S-wave velocity under hydrostatic confining pressure. Pure and applied geophysics, 170, 4: Seite 493-505. DOI:https://doi.org/10.1007/s00024-012-0550-0.

Boisson, J. Y. (2005): Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks. Radioactive waste management; Paris (OECD).

Boley, C. (2012): Handbuch Geotechnik : Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen. 1st ed. 2012. Aufl.; Wiesbaden (Vieweg+Teubner Verlag).

Chang, C. & Zoback, M. D. (2009): Viscous creep in room-dried unconsolidated Gulf of Mexico shale (I): Experimental results. Journal of petroleum science & engineering, 69, 3-4: 239-246. DOI:10.1016/j.petrol.2009.08.018.

Choo, J., Semnani, S. J. & White, J. A. (2021): An anisotropic viscoplasticity model for shale based on layered microstructure homogenization. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 45, 4: 502-520. DOI:10.1002/nag.3167.

Czaikowski, O. (2011): Laborative und rechnerische Untersuchungen zu geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Schriftenreihe der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik Universität Clausthal; Clausthal.

DBE (1986): Ingenieurgeologische Untersuchungen des Gebirges im Bereich des Füllortes auf der 850m-Sohle des Schachtes Konrad 2.pdf. Bergbauforschung GMBH – DMT im Auftrag der DBE, unveröffentlicht, Nr. 86.3644/253110: 1-28; Essen.

– (1998): Schachtanlage Konrad – Geomechanisches Normalprofil. DBE, CAD-Nr. 26315200; Peine.

– (2017): Geotechnische Betriebsüberwachung bis 30.06.2016 – 2. Sohle und Füllort Schacht Konrad und Grubennebenräume. DBE-Bericht 9KE 02YEA GC BZ 0006 00; Peine.

Doe, T. & Vietor, T. (2012): DS Experiment – Review of In Situ Stress Measurements and Their Context. Mont Terri Project, Technical Report TR 2012-06.

DRG (2021): Internetpräsenz der deutschen Rheologischen Gesellschaft (DRG) e. V., Deutsche Rheologische Gesellschaft e.V. c/o BAM Berlin 17.06.2021. https://drg-rheologie.de/.

Feeser, V. (1991): Zwischen Bodenmechanik und Physiko-Chemie: Betrachtungen zum Aufgabengebiet der Tonmechanik. Tonmineralogie und Geotechnik: Vorträge im Rahmen der Tagung der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe am 31.5. und 1.6.1990, Wien. 1-16.

Frieling, G., Eckel, J. & Seher, H. (2019): THM-Prozessentwicklung von Tonstein unter Endlagerbedingungen, ISBN 978-3-947685-06-6. GRS, GRS-521; Germany.

Geng, Z., Bonnelye, A., Chen, M., Jin, Y., Dick, P., David, C., Fang, X. & Schubnel, A. (2018): Time and Temperature Dependent Creep in Tournemire Shale. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 11: 9658-9675. DOI:https://doi.org/10.1029/2018JB016169.

Gerardi, J. (2005): F+E Endlagerung – Barrierewirksame Eigenschaften von Ton und Tonstein - Datenbank BETTON : Ergebnisbericht (Zeitraum: 01.03. - 31.12.2004). BGR, Archivstück: 1-45; Hannover.

Gräsle, W. (in Vorbereitung): Entwicklung einer extrapolationsfähigen Zeitreihenanalyse langjähriger Streckenkonvergenzmessungen aus Schacht Konrad BGR, Bericht zu AP 9K E264500000; Hannover.

Gräsle, W., Hertzsch, J.-M. & Kaufhold, A. (2019): LT-A Experiment: Strength and Deformation of Opalinus Clay: Data report from phase 20 and 21. Mont Terri Project, Technical Report TR 2016-04: 1-48.

Gräsle, W. & Plischke, I. (2009): Laboratory Testing of Opalinus Clay (LT) Experiment: Strength and Deformation of Opalinus Clay: Data report from Phase 13. Mont Terri Project, Technical Note, TN 2008-81: 1-47; Hannover.

– (2010): Laboratory Testing (LT) Experiment: Mechanical Behavior of Opalinus Clay, Final report from Phases 6 – 14. Mont Terri Project, Technical Report, TR 2009-07: 1-63; Hannover.

Gudehus, G. (2014): Zuschrift zum Beitrag „Geotechnische Bedingungen in der Schachtanlage Konrad – Auffahrung von Strecken und Kammern in druckhaftem Gebirge“ von Jochen Stahlmann et al. Geotechnik: Organ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 37, 3.

Hampel, A., Herchen, K., Lux, K.-H., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Rokahr, R., Missal, C., Gährken, A. & Stahlmann, J. (2016): Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz. Synthesebericht Verbundprojekt III zum Stoffgesetzvergleich: 1-99.

Hansen, F., Popp, T., Wieczorek, K. & Stührenberg, D. (2014): Salt reconsolidation: principles and applications; final 6/24/2014. Albuquerque, NM (Sandia Nation. Lab.).

Heemann, U. (1989): Transientes Kriechen und Kriechbruch im Steinsalz. Dissertation, Univ. Hannover, Inst. für Baumechanik und Numerische Mechanik: 108 S.

Herold, P., Simo, E., Räuschel, H., Engelhardt, H.-J., te Kook, J., Pflüger, B., Scior, C. & Studeny, A. (2020): Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein, DMT, BGE TEC 2020-26, Abschlussbericht Verbundvorhaben AGEnT. BGE TECHNOLOGY, Report.

Hesser, J. & Spies, T. (2007): The influence of humidity on microcrack processes in rock salt. In: Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt in Hannover; Editors: Wallner, Lux, Minkley & Hardy Jr.; Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-0-415-44398-2.

Hunsche, U. (1994): Empfehlung Nr. 16 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Ein- und dreiaxiale Kriechversuche an Gesteinsproben. Bautechnik: Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, 8: Seite 500 - 505.

Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: 1-146; Hannover.

Jahn, S. & Sönnke, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht. Zwischenbericht: 72; Hannover.

Jobmann, M., Uhlig, L., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M. & Schmidt, H. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS – Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY: 1-84.

Kavazanjian, E. & Mitchell, J. K. (1980): Time dependent behavior of Clay. Journal of geotechnical engineering, 106: 611-630.

Kolymbas, D. (2019): Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. Springer Vieweg (Berlin). DOI:10.1007/978-3-662-58472-9.

Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Jobmann, M., Heemann, U., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Müller, C., Zhang, C.-L., Moog, H., Schirmer, S. & Friedenberg, L. (2017): Mechanical and hydraulic behaviour of compacting crushed salt backfill at low porosities: project REPOPERM – Phase 2., Ges. für Anlagen- u. Reaktorsicherheit [u.a.], GRS-450: 1-219; Köln [u.a.].

Lacasse, S. & Berre, T. (2005): Undrained creep susceptibility of clays. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka. (Millpress Science Publishers/IOS Press.). DOI:doi:10.3233/978-1-61499-656-9-531.

Laurich, B., Urai, J. L., Vollmer, C. & Nussbaum, C. (2018): Deformation mechanisms and evolution of the microstructure of gouge in the Main Fault in Opalinus Clay in the Mont Terri rock laboratory (CH). Solid Earth, 9, 1: 1-24. DOI:10.5194/se-9-1-2018.

Lux, K.-H., Czaikowski, O., Wolters, R. & Düsterloh, U. (2005): Endlagerstandortsuche. Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. – Abschlussbericht der TU Clausthal. 1-344; Clausthal-Zellerfeld.

Lux, K.-H. & Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“. Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen TU Clausthal, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik: 1-51.

Lux, K.-H., Lomo-Appeyh, G. M. & Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. 1-129; TU Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik.

Mayr, S. I. & Burkhardt, H. (2006): Ultrasonic properties of sedimentary rocks: effect of pressure, saturation, frequency and microcracks. Geophysical journal international, 164, 1: 246-258. DOI:10.1111/j.1365-246X.2005.02826.x.

Mayr, S. I., Sviridov, V. A., Niemann, R. & Shapiro, S. A. (2015): Stress dependency of seismic velocity in anisotropic siliclastic rocks : duration of project: 01.01.2012 - 30.05.2015. DGMK. DGMK-Forschungsbericht ; 741-1: 1-95 Seiten; Hamburg.

Mayr, S. I., Sviridov, V. A. & Shapiro, S. A. (2014a): Comparison of p- and s-wave velocities in a transversal isotropic sandstone and a shale under uniaxial loading conditions. DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2014, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, 24./25. April 2014, Celle. Bd. DGMK-Tagungsbericht 2014-1: 1-10; (DGMK).

– (2014b): Comparison of p- and s-wave velocities in a transversal isotropic sandstone and a shale under uniaxial loading conditions EAGE. 76th EAGE Conference & Exhibition 2014, 16-19 June 2014, Amsterdam RAI. The Netherlands. 1-4.

– (2018): Stress dependency of seismic velocity in anisotropic sedimentary rocks. DGMK, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Forschungsbericht. DGMK-Forschungsbericht ; 741-2: 1-113; Hamburg.

– (2019): Spannungsabhängigkeit der seismischen Geschwindigkeit in anisotropen sedimentären Gesteinen. Erdöl, Erdgas, Kohle: EEK: Aufsuchung und Gewinnung, Verbreitung und Anwendung, Petrochemie, Kohleveredlung: Organ der: DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle, 135, 5: Seite 224-229. DOI:https://doi.org/10.19225/190504.

Mitchell, J. K. (1976): Fundamentals of soil behavior. New York (Wiley).

NEA (2017): Clay Catalogue 2017, NEA Clay Club Working Area. 16.10.2017. https://www.oecd-nea.org/download/clayclub/argillaceous.html.

Rybacki, E., Herrmann, J., Wirth, R. & Dresen, G. (2017): Creep of Posidonia Shale at elevated pressure and temperature. Rock mechanics and rock engineering, 50, 12: Seite 3121-3140. DOI:https://doi.org/10.1007/s00603-017-1295-y.

Schnier, H. (1986a): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Hangend- und Liegend-Bereich der Grube Konrad. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Laborbericht: 1-18; Hannover.

– (1986b): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Proben aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad 2. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 99 467 / II: 1-8; Hannover.

– (1986c): Ergebnisse von festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Oxford und Kimmeridge des Nahbereichs der Grube Konrad. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Laborbericht: 21; Hannover.

– (1987): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht KONRAD 1. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR-Bericht, Archiv-Nr. 99 467 / IV: 1-12; Hannover.

– (1990): Ergebnisse der Ultraschallmessungen in Feld 5/1 der Schachtanlage Konrad, Abschlussbericht, Mai 1990. BGR, Archivstück: zahlr. Seiten; Hannover.

– (1991): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben des Dogger aus der Strecke 410N der Grube Konrad. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: 1-15; Hannover.

– (1992): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus den Bohrungen 4/111, 4/112, und 4/114. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht, BGR Bericht Archiv- Nr. 0109430: 1-78; Hannover.

Schön, J. H. (2010): Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. 1. ed. (paperback), digital print., [Nachdr.] Aufl.; Amsterdam u.a. (Elsevier).

Schuck, B., Desbois, G. & Urai, J. L. (2020): Grain-scale deformation mechanisms and evolution of porosity in experimentally deformed Boom Clay. Journal of Structural Geology, 130. DOI:10.1016/j.jsg.2019.103894.

Schulze, O. (1986): Untersuchungen zur Festigkeit und Verformbarkeit von Tonmergel- und Tonstein-Prüfkörpern aus der Bohrung Konrad-101. Ergebnisse von Dauerstandversuchen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archivstück, BGR Bericht, Archiv- Nr. 0098650: 1-15; Hannover.

Simmer, K. (1994): Grundbau. 1, Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19., neubearb. und erw. Aufl. Aufl. DOI:10.1007/978-3-322-99388-5.

Skempton, A. W. (1954): The pore water coefficient A and B. Geotechnique, 4: 143-147.

Sönnke, J. (2016): Projekt Konrad: Lagerstättenkundlicher Teil der Betriebschronik Konrad. Bundesamt für Strahlenschutz und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht Projekt 9KE252500000: 1-292; Hannover.

Spies, T., Ostermann, W., Hesser, J. & Mohns, W. (2007): New techniques in geotechnical testing: controlled damage of granitic samples of Krasnojarsk region, Russia. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR-Bericht: 1-14; Hannover.

Stahlmann, J., Missal, C., Hahn, P. & Edel, T. (2014): Geotechnische Bedingungen in der Schachtanlage Konrad - Auffahrung von Strecken und Kammern in druckhaftem Gebirge. Geotechnik : Organ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 37, 2: Seite 129-137. DOI:https://doi.org/10.1002/gete.201400006.

Terzaghi, K. (1925): Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Wien.

Witt, K. J. (2017): Grundbau-Taschenbuch. Band 1, Geotechnische Grundlagen. 8. Auflage Aufl.; Berlin (Ernst).

Wittke, W. & Beratende-Ingenieure (1991a): Endlager Konrad Schachtverfüllung / Alte Bohrungen Bericht Teil AII Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541m Sohle). Unveröff. Bericht BfS: 1-128; Aachen.

– (1991b): Endlager Konrad, Schachtverfüllung/ Alte Bohrungen, Bericht Teil A1: Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343-m-Sohle). Unveröff. Bericht BfS: 1-189; Aachen.

– (1994): Endlager Konrad 2. Sohle Bericht über die geotechnischen Untersuchungen Unveröff. Bericht BfS: 1-190; Aachen.

Zhang, C.-L. (2013): Sealing of fractures in claystone. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, 3: 214-220. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.04.001.

Zhang, C.-L., Armand, G. & Conil, N. (2015): Investigation on the anisotropic mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian clay rock: within the framework of ANDRA/GRS cooperation programme. Ges. für Anlagen- u. Reaktorsicherheit, final report, GRS-360: 1-105; Köln [u.a.].

Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T. & Wieczorek, K. (2013): Thermo-hydro-mechanical processes in the nearfield around a HLW repository in argillaceous formations Vol I Laboratory investigations. Ges. für Anlagen- u. Reaktorsicherheit, GRS-312: 1-342; Germany.

Zhang, C.-L. & Laurich, B. (2020): Mechanical behavior of sandy facies of Opalinus Clay under different load conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12, 2: 223-241. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.09.005.

Zilch, K., Diederichs, C. J., Katzenbach, R. & Beckmann, K. J. (2013): Geotechnik. DOI:10.1007/978-3-642-41872-3.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
DMT	global tätige Gesellschaft für Ingenieursdienstleistungen und Beratung
DOI	Digital Object Identifier/ Eindeutiger genormter Identifikator
DRG	Deutschen Rheologische Gesellschaft
ISBN	Internationale Standardbuchnummer
NEA	Nuclear Energy Agency, Institut der OECD
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

Tabellenverzeichnis Seite

Tab. 1: Gesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101, an denen die in Abb. 9 gezeigten Dauerstanduntersuchungen durchgeführt wurden, Auszug aus Schulze (1986). 36

Abbildungsverzeichnis Seite

Abb. 1: Vereinfachter geologischer West-Ost-Schnitt im Bereich des Schachtes Konrad 2 (BGE 2021). 6

Abb. 2: Konrad Schacht 2: Fladentonstein-Serie Füllorterweiterung 2. Sohle (BGE/Goyer 2021). 7

Abb.3: Schematische Darstellung einer Zeitsetzungslinie, die im Ödometer in einem endlichen Zeitraum gewonnen wurde. Im verwendeten halblogarithmischen Maßstab ist die Zeit logarithmisch und die Deformation linear dargestellt. Die nach Gleichung (2) angenäherte „Kriech-"Setzung ist nicht in unendliche Zeiten zu extrapolieren, da es zu negativen Porenzahlen führen würde, näheres siehe Text. Abbildung nach z. B. Boley (2012). 14

Abb. 4: Darstellung einer nach Gleichung (2) berechneten Kriechsetzung. Die in blau dargestellten Punkte der nichtlinearen Kurve sind durch einen linearen Fit angepasst worden. Die Abweichung ist kaum zu erkennen. 15

Abb. 5: Prinzipskizze zum Langzeitdeformationsverhalten von Tonen und Tonsteinen bei konstanter Spannung, siehe z. B. Simmer (1994), Lacasse & Berre (2005), Frieling et al. (2019) und Text. 17

Abb. 6: REM-Aufnahme eines Posidonienschiefer aus Dotternhausen, Er ist wie der Fladenton bituminös und von Pyritkörnern durchzogen. Calcit und Ton-Calcit-Gemisch sind grau, Pyritkörner weiß. Die schwarzen erkennbaren Klüfte (Poren, Klüfte und Mesorisse) sind möglicherweise durch Entlastung der Probe nach Entnahme aus dem Gebirge verursacht, aber auch durch Trocknung während der Dünnschliffpräparation. Sie sind entstanden entlang von Schwächezonen zwischen den einzelnen Bettungsebenen. Abbildung nach Mayr et al. (2014b, 2014a). 27

Abb. 7: BIB-SEM (BSE Aufnahme) eines undeformierten OPA aus Mont Terri. Grau: Kalzit, Mikrofossil. Dunkelgrau Quarz, Schwarz: Hohlräume. Gesamtbreite 120 µm Höhe: 100 µm. Verändert nach Laurich et al. (2018). 28

Abb. 8: REM-Aufnahme eines schlecht konsolidierten Opalinustons aus dem Scheibengipfeltunnel bei Reutlingen. Mit Gold beschichtetes Bruchstück. Erkennbar sind vollständig massive Bereiche aber auch einzelne Tonminerale, die sich nicht vollständig eingeregelt haben, im unteren Bereich ein ca. 10 µm langer Mikroriss, darüber und im oberen Teil einzelne unregelmäßig geformte in etwa isometrische Poren mit ca. 1-2 µm Höhe und Breite, nach Mayr et al. (2015). 29

Abb. 9: Verformungs-Zeit-Diagramme ε(t) aus uniaxialen Dauerstandbelastungen in einem Säulenprüfstand für Mehrstufenversuche mit Laststufen 8, 10, 11, 8 und 13 MPa für die Proben 1, 3, 7 und 8 (Schulze 1986); Probenkennung siehe Tab. 1. 37

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 10: Verformung ε versus logarithmischer Zeitskala für einzelne Belastungsschritte aus der einaxialen Dauerstandsbelastung für Probe 6. Die axiale Spannung (Last) nimmt von unten (8 MPa, offenes Symbol) nach oben (13 MPa, gefülltes Symbol) mit den Zwischenschritten 10 MPa und 11 MPa zu, aus Schulze (1986). Eine lineare Anpassung für je zwei Teilabschnitte wie von Schulze durchgeführt, ist zwar im ε (log(t))-Diagramm optisch möglich, jedoch kein Beweis für exponentiell abnehmende Deformationsraten, da auch ein nichtlinearer Fit der Kurven durchführbar wäre. 38

Abb. 11: Verformungs-Zeit-Diagramm aus der dreiaxialen Dauerstandbelastung für einen Mehrstufenversuch mit Differenzlaststufen σ′=10, 11, 13, 15 und 17 MPa für Probe 6, aus Schulze (1986). Probenkennung siehe Tab. 1. 39

Abb. 12: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für KON-34 mit Angabe der Spannungsbedingungen sowie der Darstellung der Schallwellenlaufzeiten zur Ermittlung der stationären Kriechrate. Die Abbildung ist (Lux et al. 2005) entnommen. 40

Abb.13: Deformationsraten nach definierter Messdauer (beginnend ca. 130 Tage nach Belastungsbeginn, endend bei ca. 250 Tage nach Belastungsbeginn) für Proben aus Mont Terri und Bure (Zhang et al. 2013) verglichen mit Daten aus Zhang & Laurich (2020). Abbildung aus Zhang & Laurich (2020). 41

Abb. 14: Beispielrechnung zur Identifikation eines vorhandenen Kriechverhaltens; die zugrunde liegenden Parameter sind nicht für alle Tone gültig. In Rot dargestellt ist der Verlauf einer synthetischen Messung mit stationärem Kriechen. Die Geraden zeigen Anpassungen eines Modells ohne stationäres Kriechen an unterschiedlich lange Abschnitte dieser Kurve, die gestrichelt dargestellten Bereiche zeigen die Extrapolation der jeweiligen Anpassung. Für die blaue Gerade (Anpassungszeitraum 0.1 – 200 d) ist keine signifikante Abweichung (quantifiziert als $1 - R^2$) zwischen Modell und Messung feststellbar, für die grüne Gerade (0.1 – 1000 d) wird die Abweichung schon deutlicher und für die orange Gerade (0.1 – 5000 d) wird sie so groß, dass die Eignung des Modells ohne stationäres Kriechen für den Datensatz ausgeschlossen werden kann. 46

Abbildungsverzeichnis Seite

Abb. 15: Gemessene Deformationsraten sowie ihre Beschreibung durch Modelle mit und ohne Kriechverhalten für 5 Langzeitdeformationstests an Opalinuston aus Mont Terri (Daten aus Gräsle et al., 2019). Mit Ausnahme der Probe 14016(S) beschreibt das Modell mit Kriechverhalten (durchgezogene Linie) die Messdaten stabiler Tests signifikant besser, als das Modell ohne Kriechverhalten (gestrichelte Linie). Nur bei Probe 14016(S) stimmen beide Modelle überein. Der nicht auswertbare Test an Probe 13067(S) zeigt das Beispiel eines langsamen Kriechbruchs bei minimaler Überschreitung der Dilatanzgrenze. 48