Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit im Verformungs-und Schädigungsverhalten von Steinsalz aus flacher Lagerung Ida Epkenhans Heft Nr. 118

1

Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik Technische Universität Braunschweig Heft Nr. 118



# Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit im Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz aus flacher Lagerung

von Ida Epkenhans

Braunschweig 2024

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

ISBN - Nr: 978-3-948141-10-3

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des Grades einer Doktoringenieurin (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 07. Juni 2024 Disputation am: 02. Oktober 2024 Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann Berichterstatter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh

Eigenverlag: Institut für Geomechanik und Geotechnik Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 51 b · 38106 Braunschweig

Telefon :(0531) 391-62000Fax :(0531) 391-62040E-Mail :igg@tu-bs.deInternet :www.igg-tubs.deISBN :978-3-948141-10-3

- Druck:DruckVoll UG Anne Seckelmann<br/>Weinbergweg 40 a · 38106 BraunschweigTelefon :(0531) 390 679 64Fax :(0531) 390 718 35E-Mail :info@druckvoll-bs.de
- Internet : www.druckvoll-bs.de

Druck auf chlorfrei gebleichtem Papier

## Untersuchungen zur Richtungsabhängigkeit im Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz aus flacher Lagerung

Der

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer

#### Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte

### Dissertation

von Ida Epkenhans geboren am 31.03.1989 aus Gütersloh

Eingereicht am: Disputation am: 07. Juni 2024 02. Oktober 2024

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh

2024

# Kurzfassung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) regelt in Deutschland das Verfahren zur Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Das Gesetz betrachtet Deutschland als "weiße Landkarte". Standorte werden somit nicht im Vorhinein als geeignet oder ungeeignet eingestuft. Das StandAG nennt Gesteine wie Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein als potentielle Wirtsgesteine, wobei Steinsalz auch stratiforme Lagerstätten umfasst.

Das Spannungs-Verformungs-Verhalten von flach gelagertem Steinsalz wird oft mit dem von steil gelagertem Steinsalz gleichgesetzt, welches sich nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Forschung isotrop verhält. Die Existenz einer Schichtung kann jedoch zu einem anisotropen Verhalten führen. Die Untersuchung anisotroper Eigenschaften ist erforderlich, um die relevanten Prozesse in einem Endlager zu verstehen und möglichst realitätsnahe Prognoseberechnungen durchführen zu können.

Diese Arbeit konzentriert sich auf das Kurzzeitfestigkeitsverhalten und das Bruchverhalten von Steinsalz. Um potenzielle anisotrope Eigenschaften zu untersuchen, wurde flach gelagertes Steinsalz aus dem Bergwerk Borth analysiert. Nach einer umfassenden Gesteinscharakterisierung wurden 62 triaxiale Kurzzeitfestigkeitsversuche durchgeführt. Dabei wurden der Manteldruck und das Fallen der Schichtung innerhalb der Proben variiert. Schichtung beschreibt dabei das Vorhandensein einer Gefügeorientierung aufgrund des Sedimentations- und Überlagerungsprozesses.

Die Versuche zeigen, dass das untersuchte Steinsalz anisotrop reagiert. Die Anisotropie gleicht dabei nicht dem Verhalten eines Festgesteins mit Trennflächengefüge. Das Steinsalz zeigt höhere Bruchdehnungen bei Belastungsrichtung senkrecht zur Schichtung als horizontal zur Schichtung. Anisotrope Effekte waren bei niedrigen Manteldrücken stärker ausgeprägt. Unter höherem Druck tendiert das Korngefüge zu isotropem Verhalten. Das anisotrope Dehnungsverhalten lässt sich mit einer unterschiedlichen Zugfestigkeit in den Kontaktbereichen der Korngrenzen und im Korninneren erklären. Weitere Untersuchungen wie die Analyse der Zugfestigkeit und mikroakustische Emissionsmessungen sind erforderlich, um diese Annahmen zu bestätigen.

Die Erkenntnisse deuten darauf hin, dass Anisotropie bei flach gelagertem Salz auftreten kann und weiter untersucht werden sollte, insbesondere wenn ein entsprechender Standort für hochradioaktive Abfälle in Betracht gezogen wird.

## Abstract

The Site Selection Act (StandAG) regulates the procedure of the selection of a site for a repository for high-level radioactive waste in Germany. The Act calls for a participatory, science-based, and transparent procedure and views Germany as a "blank map". Thus, sites are not predetermined as suitable or unsuitable. The StandAG identifies rocks such as rock salt, clay rock, and crystalline rock as potential host rocks, with rock salt also encompassing stratiform deposits.

The stress-strain behavior of flat bedded rock salt is usually equated with that of steeply inclined rock salt, which, according to the current state of science and research, behaves isotropic. However, the presence of stratification can lead to anisotropic stress-deformation behavior. Investigating such anisotropic properties is crucial to understand the relevant processes in a repository and to conduct as realistic predictive calculations as possible.

The study focuses on the short-term strength behavior and fracture characteristics of rock salt. To investigate potential anisotropic properties, flat bedded rock salt from the Borth mine was analyzed. Following comprehensive rock characterization, 62 triaxial short-term strength tests were conducted. The confining pressure and the orientation of the samples' stratification were varied during these tests. Stratification describes the presence of fabric orientation due to the sedimentation and superposition processes.

The experiments reveal that the rock salt reacts anisotropically. However, this anisotropy does not resemble the behavior typically seen in rock with cleavage planes. The examined rock salt demonstrates higher strain at failure when loaded perpendicular to the stratification compared to loading parallel to the stratification. Anisotropic effects were more pronounced at lower confining pressures. At higher confining pressure, the grain fabric tends towards isotropic behavior. The anisotropic strain behavior can be explained by different tensile strengths in the contact areas of the grain boundaries and within the grains. Further investigations, such as analyzing tensile strength and micro-acoustic emission measurements, are necessary to confirm these assumptions.

The findings suggest that anisotropy can occur in flat bedded salt and should be further investigated, especially when considering a suitable site for high-level radioactive waste disposal.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung		1					
	1.1	Motiv	ration	1					
	1.2	Aufba	ıu	5					
2	Gru	rundlagen							
	2.1	Besch	reibung des mechanischen Spannungszustands	7					
	2.2	Entste	hung von Salzlagerstätten	10					
		2.2.1	Salinarer Zyklus und Diagenese	10					
		2.2.2	Verunreinigungen und Einschaltungen	12					
		2.2.3	Metamorphose von Salzgesteinen	12					
		2.2.4	Salztektonik	12					
	2.3	Eigens	schaften von Festgesteinen	13					
		2.3.1	Homogenität und Isotropie	13					
		2.3.2	Struktur und Textur	15					
	2.4	Ursacl	hen für anisotropes Verhalten bei Steinsalz	16					
		2.4.1	Anisotropie auf mikroskopischer Ebene	16					
		2.4.2	Anisotropie auf makroskopischer Ebene	20					
	2.5	Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz							
		2.5.1	Vorbemerkungen	20					
		2.5.2	Elastisch-reversibles Verhalten	21					
		2.5.3	Viskoplastisches Verhalten	22					
	2.6	Stand	von Wissenschaft und Forschung	27					
		2.6.1	Anisotropie in der Felsmechanik	27					
		2.6.2	Anisotropie in der Salzmechanik	29					
	2.7	Forsch	nungsfrage	32					
3	Mate	terial und Methodik 3							
	3.1	Probe	körper aus dem Bergwerk Borth	35					
		3.1.1	Bergwerk Borth	35					
		3.1.2	Großblöcke	38					
	3.2	Unters	suchungen zur Bestimmung der Gesteinsmerkmale	40					
		3.2.1	Vorbemerkungen	40					
		3.2.2	Makroskopische Gesteinsuntersuchung	41					

## Inhaltsverzeichnis

		3.2.3	Mikrocomputertomographie	43				
		3.2.4	Dünnschliffmikroskopie	44				
		3.2.5	Mobiles, energiedispersives Röntgenfluoreszenzgerät (mXRF)	44				
		3.2.6	NMR-Relaxometrie	44				
	3.3	Triaxi	ale Kompressionsversuche	45				
		3.3.1	Probekörper	45				
		3.3.2	Versuchsaufbau und Instrumentierung	47				
		3.3.3	Versuchsdurchführung	48				
		3.3.4	Versuchsprogramm	50				
		3.3.5	Datenanalyse	52				
4	Ergebnisse und Auswertung							
	4.1	Chara	kterisierung des untersuchten Gesteins	53				
		4.1.1	Vorbemerkungen	53				
		4.1.2	Makroskopische Gesteinsuntersuchung	53				
		4.1.3	Ergebnisse der Mikrocomputertomographie-Untersuchungen	62				
		4.1.4	Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie	63				
		4.1.5	Bestimmung des Bromidgehalts	67				
		4.1.6	Bestimmung des Fluidgehalts	68				
		4.1.7	Zusammenfassung	69				
	4.2	Triaxi	ale Kompressionsversuche	72				
		4.2.1	Vorbemerkungen	72				
		4.2.2	Belastung unter $\beta = 0^{\circ}$ und $\beta = 90^{\circ}$	73				
		4.2.3	Zwischenfazit	84				
		4.2.4	Belastung unter $\beta = 30^{\circ}$ und $\beta = 60^{\circ}$	84				
		4.2.5	Auswertung in Bezug auf eine mögliche Anisotropie	91				
		4.2.6	Zusammenfassung	101				
5	The	senfind	lung und Diskussion	103				
	5.1	Eingre	enzung des anisotropen Verhaltens in der Bruchdehnung	103				
	5.2	Erkläı	rungsansatz I: Versetzungsdichte	108				
	5.3	3 Erklärungsansatz II: Zugfestigkeit						
	5.4	Disku	ssion und Einordnung des Erklärungsansatzes "Zugfestigkeit"	121				
6	Zusammenfassung und Ausblick							
Lit	eratu	ır		137				
A	Foto	os zur (	Gesteinscharakterisierung	145				
	A.1 Block 2016							
	A.2	Block	2020	147				

Inhaltsverzeichnis

В	Übersicht der triaxialen Kompressionsversuche							
С	Versuchsergebnisse der triaxialen Kompressionsversuche							
D	Probenfotos							
	D.1 Block 2016	158						
	D.2 Block 2020	161						

## 1.1 Motivation

Jahrzehntelang wurde in Deutschland ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in einem Salzstock in der Nähe der Gemeinde Gorleben favorisiert und geplant. Dieser Standort war jedoch politisch sehr umstritten, sodass es zunächst zu einem Erkundungsstopp und schließlich im Zuge der Nuklearkatastrophe von Fukushima 2011 zu einer Neuausrichtung der damaligen Bundesregierung zur Thematik Standortsuche kam. Diese mündete im 2013 verabschiedeten Standortauswahlgesetz (StandAG). Die anschließende Diskussion um Auswahlkriterien und Öffentlichkeitsbeteiligung führte zu einer umfassenden Überarbeitung des StandAG, deren Änderungen 2017 in Kraft traten.

Das aktuelle StandAG fordert, dass in einem "partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung" (§1 Abs. 2) ermittelt wird. Zentraler Grundsatz des Standortauswahlverfahrens ist, dass Deutschland als "weiße Landkarte" betrachtet wird. Dies bedeutet, dass kein Standort von Vornherein als geeignet oder ungeeignet eingestuft wird. Gemäß §23 Abs. 1 Satz 1 StandAG kommen für einen potentiellen Endlagerstandort "die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht". §21 Abs. 2 Satz 1 StandAG bezieht dabei auch stratiforme Salzformationen ein.

Vorhabenträgerin der Standortauswahl ist die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Sie hat gemäß §13 StandAG unter Anwendung festgelegter Anforderungen und Kriterien zunächst Teilgebiete zur weiteren Untersuchung bestimmt, siehe Abbildung 1.1. Die Bereiche mit kristallinem Wirtsgestein sind in der Karte orange markiert, während Bereiche mit Tongesteinen in verschiedenen Schattierungen von Violett gekennzeichnet sind. Stratiforme Salzformationen sind hellblau dargestellt, Teilgebiete mit steil gelagerten Salzformationen sind grün markiert. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz, sodass kristallines Hartgestein sowie Tongestein nicht weiter berücksichtigt werden.



Abbildung 1.1: Teilgebiete der Standortauswahl [Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020a]

Steinsalz ist ein chemisches Sedimentgestein. Durch das Ausfällen der Salzminerale und die anschließende Überlagerung durch weitere geologische Schichten entsteht eine lateral ausgedehnte Schicht an verfestigtem Steinsalz. Dies bezeichnen die Begrifflichkeiten "Steinsalz in flacher Lagerung" bzw. "stratiforme Salzformationen". Kommt es unter den entsprechenden Randbedingungen zum Salzaufstieg, bei welchem das Steinsalz die Deckgebirgsschichten durchbricht, liegt "Steinsalz in steiler Lagerung" vor, vgl. Abschnitt 2.2.

Stratiforme Salzformationen treten im Wesentlichen in Mitteldeutschland auf, während steil gelagerte Salzdome eher in Norddeutschland vorzufinden sind. Es werden insgesamt 14 Teilgebiete mit stratiformen und 60 Teilgebiete mit steil gelagertem Steinsalz benannt, s. [Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020b].

Vorteile des Wirtsgesteins Steinsalz gegenüber den anderen Formationen sind insbesondere seine Kriechfähigkeit, seine gute Wärmeleitfähigkeit und seine geringe Permeabilität, s. [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007]. Hinsichtlich der flach gelagerten Steinsalze kann zusätzlich die große laterale Extension, ein weniger komplexer Internbau sowie das intakte Hutgestein benannt werden. Zudem liegt mit der Überlagerung durch verschiedene Ton- und Salzschichten ein natürliches Multibarrierensystem vor, s. [Popp, 2022].

Steil gelagertes Steinsalz ist in Deutschland gut erforscht, das mechanische Verhalten lässt sich über verschiedene höherwertige Stoffmodelle beschreiben und abbilden, s. [Hampel et al., 2022b; Hampel et al., 2022a]. Das mechanische Verhalten von flach gelagertem Steinsalz wird häufig mit dem von steil gelagertem Salz, welches sich isotrop verhält, gleichgesetzt, vgl. [Bollingerfehr et al., 2018; Hansen et al., 2016]. Belege zu dieser Annahme in Form von Versuchsreihen finden sich dazu jedoch nur vereinzelt, sind stark veraltet und daher oft nicht hinreichend dokumentiert, oder wurden mit anderem Schwerpunkt durchgeführt, s. Abschnitt 2.6. Ein anisotropes Verhalten lässt sich nicht ausschließen. Aufgrund des Entstehungsprozesses sowie der nachträglichen Überprägung dieser flach gelagerten Schichten könnte sogar erwartet werden, dass ein anisotropes Korngefüge mit anisotropen Verformungseigenschaften vorhanden ist.

Das Verständnis des mechanischen Verhaltens des Wirtsgesteins ist für die Beurteilung seiner Eignung für ein potenzielles Endlager essentiell. Nur mithilfe von geeigneten Modellen können das Verhalten eines Endlagers und seiner Komponenten hinreichend genau beschrieben und somit die erforderlichen Nachweise erbracht werden. Um bei der Standortauswahl die Tauglichkeit der flach gelagerten Steinsalzvorkommen zu bewerten, müssen somit fundierte Kenntnisse über das mechanische Verhalten vorliegen. Als Beispiel für die Relevanz eines potentiell anisotropen mechanischen Verhaltens soll die Hohlraumkontur einer Strecke herangezogen werden.



Abbildung 1.2: Spannungszustände in Firste (F) und Stoß (S) an der Hohlraumkontur

Im unverritztem Gebirge wirkt der teufenspezifische Überlagerungsdruck. Die Auffahrung einer Strecke führt zu einer Spannungsumlagerung, da der ausgebrochene Bereich die Spannungen nicht abtragen kann. Ein sekundärer Spannungszustand stellt sich ein. In radialer Richtung kommt es konturnah zu einer Entlastung, während die Spannungen in tangentialer Richtung steigen. Abbildung 1.2 zeigt die Hohlraumkontur einer Strecke und veranschaulicht die Spannungszustände in der Firste und im Stoß der Strecke nach der Umlagerung. Während in der Firste die vertikalen Spannungen  $\sigma_v$  annähernd null sind, trifft dies im Stoß für die horizontalen Spannungen  $\sigma_h$  zu. In Bezug auf eine potentiell vorliegende Schichtung stellt sich somit ein unterschiedlicher Spannungszustand ein.

Liegt ein anisotropes Korngefüges vor, ist davon auszugehen, dass das Gebirge ein anisotropes Spannungs-Verformungs-Verhalten zeigt. Die spezifischen Effekte sind abhängig von der Art der Anisotropie. Es ist denkbar, dass sich beispielsweise ein anisotropes Bruchverhalten zeigt. Aus der Felsmechanik ist bekannt, dass bei Festgesteinen mit Trennflächengefüge der Fallwinkel der Trennfläche die Bruchfestigkeit des Gesteins beeinflusst, s. [Wittke, 1984; Plinniger et al., 2019].

Im Zusammenhang mit Steinsalz ist auch die Möglichkeit einer richtungsabhängigen Dilatanzgrenze zu berücksichtigen. Bei Spannungszuständen oberhalb der Dilatanzgrenze treten schädigungsinduzierte Verzerrungen unter Mikrorissbildung auf. Im Bereich der Hohlraumkontur ist durch die mit der Auffahrung erzeugte Spannungsumlagerung mit einer solchen Spannungsüberschreitung zu rechnen. Der hohlraumnahe geschädigte Bereich wird als Auflockerungszone (ALZ) bezeichnet und stellt aufgrund der Mikrorisse einen Bereich erhöhter Wegsamkeit für Fluide und somit Radionuklide

dar. Vor der Einlagerung der radioaktiven Abfälle wird die ALZ durch einen Nachschnitt der Kontur entfernt. Die Kenntnis über ihre Ausdehnung, welche die Nachschnitttiefe bestimmt und die Dauer der Offenhaltung begrenzen kann, ist somit von Relevanz, s. [Stahlmann et al., 2015b; Stahlmann et al., 2019].

Da beim Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz insbesondere sein Kriechvermögen eine Rolle spielt, ist auch ein anisotropes Kriechverhalten denkbar. Dies könnte zu unterschiedlich hohen Kriechverformungen in der Kontur führen.

## 1.2 Aufbau

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz in flacher Lagerung auf anisotrope Eigenschaften zu untersuchen. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen dabei auf Untersuchungen zur Charakterisierung des Gesteins sowie auf triaxialen Kompressionsversuchen, um das Bruchverhalten zu analysieren.

Kapitel 2 beginnt mit den für das betrachtete Thema relevanten Grundlagen. Dabei bildet die Beschreibung des mechanischen Spannungszustands den Ausgangspunkt für weitere Erläuterungen. Eine Betrachtung des Entstehungsprozesses von Salzlagerstätten ist entscheidend, um mögliche anisotrope Eigenschaften von Steinsalz besser zu verstehen. Nach einer kurzen Beschreibung dieser Prozesse folgt die Darstellung der Eigenschaften von Festgesteinen in Bezug auf Anisotropie. Anschließend werden potentielle Ursachen für anisotropes Verhalten erläutert, bevor eine umfassende Beschreibung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens von Steinsalz erfolgt. Abschließend wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Forschung präsentiert, um die Forschungsfrage sowie den Rahmen der Arbeit zu formulieren.

Im darauf folgenden Kapitel 3 werden das untersuchte Material und die angewandten Untersuchungsmethoden vorgestellt. Dies umfasst zunächst die Herkunft des analysierten Materials. Im Anschluss erfolgt eine Beschreibung der angewandten Methoden zur Durchführung der Gesteinscharakterisierung. Die Gesteinscharakterisierung ist unter anderem daher notwendig, da die Eigenschaften von Steinsalz aus unterschiedlichen Lagerstätten teilweise stark variieren können. Darüber hinaus werden die triaxialen Kompressionsversuche in Bezug auf ihre Durchführung und den Umfang des Versuchsprogramms erläutert.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Gesteinscharakterisierung und der Triaxialversuche präsentiert und analysiert. Dabei werden Beobachtungen bezüglich potentiell anisotropen Verhaltens beschrieben und ausgewertet. Diese Beobachtungen führen zur Formulierung von Thesen zur Erklärung des festgestellten anisotropen Verhaltens.

Eine Beschreibung sowie die vertiefte Auseinandersetzung und Diskussion dieser Thesen findet im darauf folgenden Kapitel 5 statt.

Im abschließenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und in den größeren Kontext eingeordnet. Darüber hinaus werden Empfehlungen ausgesprochen, indem offene Fragen identifiziert und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

## 2.1 Beschreibung des mechanischen Spannungszustands

Ein Spannungstensor definiert den mechanischen Spannungszustand im dreidimensionalen Raum eindeutig. In kartesischen Koordinaten kann er Gleichung (2.1) entnommen werden. Dabei beschreiben die Einträge auf der Diagonalen die Spannungen in Normalenrichtung. Außerhalb der Diagonalen befinden sich die Schubspannungen. Durch Drehung des Koordinatensystems können die Schubspannungen zu null werden. Dies bezeichnet dann den Spannungszustand im Hauptspannungsraum, s. Gleichung (2.2), wobei nach geomechanischer Vorzeichenkonvention  $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$  gilt.  $\sigma_1$ ist dabei die größte Hauptspannung, was entsprechend des vorliegenden Spannungszustands der größten Druck- bzw. betragsmäßig kleinsten Zugspannung entspricht.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$
(2.1)

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$
(2.2)

Liegt eine allseitig gleiche, also isostatische Spannung vor, gilt Gleichung (2.3). Der Spannungstensor wird dann auch Kugeltensor genannt. Der Spannungsdeviator gibt an, inwiefern der Spannungszustand vom Kugeltensor, d.h. dem isostatischen Zustand abweicht. Er ist gemäß Gleichung (2.5) definiert. Anders formuliert, setzt sich der Spannungstensor demnach aus einem isostatischen und einem deviatorischen Anteil zusammen. Der isostatische Anteil entspricht dabei der mittleren Spannung  $\sigma_m$ , Gleichung (2.4), über die gesamte Diagonale [Gross et al., 2011].

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \tag{2.3}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \tag{2.4}$$

$$s = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix}$$
(2.5)

Invarianten sind mit einem Spannungstensor assoziierte Größen, die unabhängig vom Koordinatensystem sind. Sie bleiben somit bei Änderung des Koordinatensystems unverändert [Gross und Seelig, 2016]. Die Invarianten des Spannungsdeviators sind in Gleichung (2.6) bis (2.8) gegeben.

$$J_1 = (\sigma_x - \sigma_m) + (\sigma_y - \sigma_m) + (\sigma_z - \sigma_m)$$
(2.6)

$$J_{2} = \frac{1}{6} \cdot \left[ (\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + (\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} \right] + \sigma_{xy}^{2} + \sigma_{yz}^{2} + \sigma_{zx}^{2}$$
$$= \frac{1}{6} \cdot \left[ (\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} \right]$$
(2.7)

$$J_{3} = (\sigma_{x} - \sigma_{m}) \cdot (\sigma_{y} - \sigma_{m}) \cdot (\sigma_{z} - \sigma_{m}) + 2 \cdot \sigma_{xy} \cdot \sigma_{yz} \cdot \sigma_{zx}$$
$$- \sigma_{yz}^{2} \cdot (\sigma_{x} - \sigma_{m}) - \sigma_{xy}^{2} \cdot (\sigma_{z} - \sigma_{m}) - \sigma_{zx}^{2} \cdot (\sigma_{y} - \sigma_{m})$$
$$= (\sigma_{1} - \sigma_{m}) \cdot (\sigma_{2} - \sigma_{m}) \cdot (\sigma_{3} - \sigma_{m})$$
(2.8)

Ein häufig genutztes Maß, um die Größe des Spannungsdeviators zu charakterisieren, ist die Von-Mises-Vergleichsspannung. Sie beinhaltet die zweite Invariante des Deviators, s. Gleichung (2.9).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3 \cdot J_2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}$$
(2.9)

Auch die Oktaederschubspannung  $\tau_o$  dient zur Interpretation der zweiten Invariante des Spannungsdeviators. Die Oktaederschubspannung definiert die Schubspannung, welche auf der Oktaederebene liegt. Die Oktaederebene befindet sich im Hauptspannungsraum mit ihren Eckpunkten in den Hauptachsen, s. Abbildung 2.1. In ihr wirkt die mittlere Spannung, s. Gleichung (2.4), als Normalspannung, welche auch als Oktaedernormalspannung  $\sigma_o$  bezeichnet wird. Während die Normalspannung als isostatische Spannung nicht zu plastischen Formänderungen beitragen kann, verbleibt die Oktaederschubspannung als Teil des Spannungstensors, welcher zu plastischen Verformungen führt [Gross und Seelig, 2016]. Er kann nach Gleichung (2.10) berechnet



Abbildung 2.1: Oktaederebene und -spannungen

werden.

$$\tau_{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot J_2}$$
  
=  $\frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$  (2.10)

Synonym für die Von-Mises-Vergleichsspannung und die Oktaederschubspannung wird auch der Begriff Differenzspannung genutzt. Die Differenzspannung drückt zwar ebenfalls das Vorliegen eines Deviators aus, ist jedoch ein Begriff, der sich auf den Versuchsaufbau eines triaxialen Versuchs bezieht, bei welchem ein radialsymmetrischer Spannungszustand vorliegt. Die Differenzspannung bezeichnet im triaxialen Kompressionsversuch dann die Differenz zwischen der Axialspannung  $\sigma_1$  und dem Manteldruck  $\sigma_3$ .

$$\sigma_{Diff} = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{2.11}$$

## 2.2 Entstehung von Salzlagerstätten

## 2.2.1 Salinarer Zyklus und Diagenese

Salzgesteine gehören zu den Evaporitsedimentgesteinen. Es handelt sich demnach um Sedimente, die durch einen chemischen Prozess, die Eindampfung von salzhaltigem Wasser, entstehen. Durch die Verdunstung des Wassers steigt die Mineralkonzentration bis die verschiedenen Minerale nach ihrer Löslichkeit ausgefällt werden. Das sind zunächst die Karbonate und im Anschluss Sulfate wie Gips. Es folgt Halit, welches den größten Anteil der Minerale ausmacht. Zum Schluss verbleiben die Edelsalze, wie beispielsweise Sylvin und Carnallit [Meschede, 2015]. Dieser Eindampfungsprozess wird auch salinarer Zyklus genannt und kann Abbildung 2.2 entnommen werden.

Normales Meerwasser enthält etwa eine Konzentration von 3,5 bis 3,8 % an gelösten Salzen. Eine Meerwassersäule von 1.000 m würde bei gänzlicher Eindampfung zu einer etwa 15 m mächtigen Salzschicht führen. Salzvorkommen in Deutschland sind in einigen Regionen jedoch mehrere hundert Meter mächtig. Dass es sich hierbei um die Eindampfung eines äußerst tiefen Meeres handelt, ist jedoch nicht belegbar. Carl Ochsenius stellte zur Erklärung der mächtigen Salzvorkommen 1877 die Barrentheorie auf. Demnach ist ein Nebenmeer vom Rest des offenen Meeres durch sogenannte Barren getrennt. Über die Barren fließt weniger Wasser nach als es im abgetrennten Becken aufgrund des vorherrschenden ariden Klimas verdunstet. Durch das Nachfließen von Wasser ist jedoch weiterhin ein Angebot an Mineralen vorhanden, die durch weitere Verdunstung ausgefällt und abgelagert werden, s. [Okrusch und Matthes, 2014].

Durch Überlagerung weiterer Präzipitate bzw. klastischer Sedimente steigen der auf die ausgefällten Salzkristalle wirkende Druck sowie die Temperatur. Es erfolgt die Verfestigung des Lockergesteins zum festen Salzgestein. Dieser Prozess nennt sich Diagenese, s. [Okrusch und Matthes, 2014].

Die sich in Norddeutschland befindenden Salzlagerstätten entstanden vor ca. 250 Millionen Jahren in der Zechsteinzeit, oberes Perm. In dieser Zeit kam es zu einer Transgression, einer lang andauernden Ablagerungsfolge von marinen Sedimenten im nördlichen Mitteleuropa. Das sogenannte Zechsteinmeer erstreckte sich zu dieser Zeit in der Ost-West-Achse etwa vom heutigen Polen bis Großbritannien und in der Nord-Süd-Achse von Mitteldeutschland bis Dänemark. Die Barren erstreckten sich von Nordwestdänemark bis Rügen. Südlich dieser Barriere wurden die verschiedenen Evaporitminerale ausgefällt. Das Zechsteinmeer lag zu dieser Zeit in einer tropischen Klimazone nahe des Äquators. Als Landmasse verschob es sich durch Plattentektonik in darauf folgenden geologischen Systemen zu seiner heutigen Lage. Insgesamt wird in Deutschland von vier klassischen Zechsteinfolgen (z1 bis z4) und drei jüngeren Folgen (z5 bis z7) gesprochen. Dabei sind regional nicht jeweils alle Folgen anzutreffen,



Abbildung 2.2: Entstehung von Salzlagerstätten, aus [Meschede, 2015]

s. [Meschede, 2015]. Auch kann es im Eindampfungsprozess zum Nachfließen von Meerwasser gekommen sein, sodass der salinare Zyklus nicht vollständig durchlaufen, sondern durchbrochen wurde.

Die Chronologie der Ablagerung der Salzminerale kann bei flach gelagerten Salzhorizonten gut sichtbar sein, da die Horizonte keinen oder nur vergleichsweise wenigen Verformungen unterlagen.

## 2.2.2 Verunreinigungen und Einschaltungen

Neben der Schichtung innerhalb des Salzhorizonts durch verschiedene Salzminerale oder durch die Ausprägung von durch die Genese bedingten Merkmalen wie der Kornform kann es auch zu Schichtfolgen durch andere Sedimente kommen. Es handelt sich dabei um Verunreinigungen und Einschaltungen.

Durch Winde konnten Stäube vom Festland auf das Meer geweht werden. Ebenso war ein Transport von anderen Sedimenten über Flüsse in das Meer möglich. Die verschiedenen Bestandteile der Stäube bzw. die Sedimente lagerten sich am Meeresboden ab. Erfolgten diese Prozesse während des Eindampfungsprozesses der Salzminerale, liegen Verunreinigungen des andernfalls reinen Salzes vor. Kam der Eindampfungsprozess hingegen zu diesem Zeitpunkt zum Stillstand oder lagerten sich in kurzer Zeit viele Bestandteile am Meeresboden ab, liegen in der Schichtfolge Einschaltungen von beispielsweise Ton- oder Sandsteinschichten vor, vgl. [Meschede, 2015; Popp, 2022].

## 2.2.3 Metamorphose von Salzgesteinen

Diagenese beschreibt die Verfestigung von Lockersedimenten zu einem Sedimentgestein. Der geologische Prozess der Metamorphose ist die Umwandlung von bereits festen Gesteinen unter hohen Temperaturen und Drücken.

Die Übergänge zwischen den Prozessen Diagenese und Metamorphose sind fließend. Auch bei Salzgesteinen kann von einer Gesteinsmetamorphose gesprochen werden, wenn die Minerale nach ihrer Verfestigung durch die Einwirkung von mechanischer Beanspruchung Temperatur und/oder Lösung ausgesetzt sind und es daher zu Mineralreaktionen und Stofftransporten kommt, s. [Braitsch, 1971; Okrusch und Matthes, 2014].

Durch Metamorphose können sich die Eigenschaften des Salzgesteins ändern, s. Abschnitt 2.3.2.

## 2.2.4 Salztektonik

Die entstandenen Salzgesteine wurden in den sich anschließenden geologischen Zeitaltern überlagert. Reines Steinsalz weist eine Dichte von 2,2 g/cm<sup>3</sup> auf. Diese Dichte ist teufenunabhängig, überlagernde Schichten führen nicht zu einer Verdichtung der Ablagerung. Sedimente weisen durch zunehmenden Überlagerungsdruck und die dadurch erfolgende Kompaktion eine höhere Dichte (~2,5 g/cm<sup>3</sup>) auf. Ab einer gewissen Überlagerungshöhe entsteht somit eine Dichteinversion. Schichten mit höheren

Dichten befinden sich über Schichten mit geringerer Dichte. Das Salz ist einer deviatorischen Beanspruchung ausgesetzt. Ist diese Deviatorspannung groß genug, beginnt das Salz zu fließen, es steigt auf, vgl. Abschnitt 2.5.3. Dies geschieht bevorzugt an Störungszonen im Deckgebirge, da hier die geringste Energie notwendig ist. Über die Zeit bilden sich aus der flach lagernden Salzschicht so zunächst Salzkissen. Bei ausreichender Mächtigkeit der Salzstruktur steigt das Salz weiter auf. Es entstehen sogenannte Salzstöcke, auch Diapire genannt. Ist genügend Salz vorhanden, können sich diese Salzstöcke auch lateral über eine größere Entfernung als Salzmauern erstrecken. Der Prozess des Salzaufstiegs wird unter dem Begriff Halokinese zusammengefasst. Das Salz verformt sich als aktives Medium, s. [Okrusch und Matthes, 2014; Meschede, 2015].

Das Salzgestein kann auch passiv verformt werden. Durch solch passive Verformungen kann es beispielsweise bei flach gelagerten Steinsalzvorkommen zu Faltungen kommen. Hier können als Beispiele die Salzserien der Lagerstättenbezirke Werra-Fulda und Südharz (Thüringer Becken) genannt werden. Es handelt sich um flach gelagerte, aber in sich gefaltete Steinsalzvorkommen, s. [Langer et al., 1984].

## 2.3 Eigenschaften von Festgesteinen

## 2.3.1 Homogenität und Isotropie

Mit den Begriffen Homogenität und Isotropie lässt sich die physikalische Eigenschaft eines Materials beschreiben. Ein Körper gilt als homogen, wenn er an verschiedenen Punkten die gleiche Eigenschaft aufweist. Ist die Eigenschaft unterschiedlich, so spricht man von einem inhomogenen Körper. Die Begrifflichkeit Isotropie geht einen Schritt weiter und bezieht die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaft mit ein. Ein Körper gilt als isotrop, wenn er an verschiedenen Punkten die gleichen Eigenschaften in jede Richtung aufweist, s. [Terzaghi, 1954]. Ein Körper kann somit homogen, muss daher aber nicht isotrop sein. Abbildung 2.3 veranschaulicht diese begriffliche Trennung.

In der vorliegenden Arbeit ist speziell die Richtungsabhängigkeit von Bedeutung, so dass auf diese näher eingegangen wird. Beispielhaft soll ein rein elastisches Materialverhalten zur Erklärung herangezogen werden. Verhält sich ein Material isotrop, ist der E-Modul richtungsunabhängig. Es stellen sich unabhängig von der Belastungsrichtung bei identischen Belastungen identische Verzerrungen ein. Liegt hingegen ein anisotropes Verhalten vor, so ist die Steifigkeit des Materials richtungsabhängig. Es stellen sich bei identischer Belastung je nach Belastungsrichtung unterschiedliche Verzerrungen ein, s. Abbildung 2.4.



Abbildung 2.3: Homogenität und Isotropie

Es gilt

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l} \neq \frac{\Delta l_2}{l} = \epsilon_2. \tag{2.12}$$

Dabei beschreibt  $\epsilon$  die Dehnung und ist dimensionslos. l ist die ursprüngliche Länge,  $\Delta l_1$  und  $\Delta l_2$  sind die Längenänderungen, welche sich durch die Belastung ergeben. Sie werden in [m] angegeben. Zwei Sonderfälle der Anisotropie sind die Orthotropie und die transversale Isotropie. Ein orthotropes Material weist drei Vorzugsrichtungen auf, die senkrecht zueinander stehen. Beispielhaft seien die *x*- und *y*-Achse genannt, vgl. Abbildung 2.5. Verhält sich dieses Material bei einer Drehung um die *z*-Achse zusätzlich isotrop, handelt es sich um ein transversal isotropes Material, s. [Gross et al., 2011; Gross und Seelig, 2016]. Ob ein richtungsabhängiges und somit anisotropes Spannungs-Verformungs-Verhalten vorliegt, hängt von der Zusammensetzung und dem Aufbau des Materials ab.



Abbildung 2.4: Anisotropes elastisches Materialverhalten



Abbildung 2.5: Sonderfälle der Anisotropie

## 2.3.2 Struktur und Textur

In der Petrographie (Gesteinskunde) können zur Beschreibung eines Gefüges die Überbegriffe Struktur und Textur genannt werden.

Als Struktur werden die Formentwicklung sowie die relative Größe der Einzelkomponenten bezeichnet, s. [Redlich et al., 1929]. Zur Struktur gehören Eigenschaften wie Korngestalt, Korngröße und Korngrößenverteilung, s. [Okrusch und Matthes, 2014].

Unter dem Begriff Textur wird die "Anordnung gleichwertiger Gefügeelemente im Raum" [Okrusch und Matthes, 2014, S. 57] verstanden. Eigenschaften sind die räumliche Verteilung (homogen/heterogen) und die räumliche Orientierung (isotrop/anisotrop). Liegt eine räumliche Orientierung vor, wird dies im engeren Sinne häufig ebenfalls als vorhandene Textur bezeichnet.

Eine räumliche Orientierung wird bei Sedimentgesteinen als Schichtung bezeichnet. Sind die Ablagerungen aus Sedimenten mächtig, resultiert dies in einer sogenannten Bankung (s. Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 2.2.2). Bei metamorphen Gesteinen wird bei einer Gefügeregelung aufgrund von Deformationsvorgängen zwischen Gitter- und Formregelung unterschieden. Die Gitterregelung (engl. lattice preferred orientation (LPO) oder crystallographic preferred orientation (CPO)) ist durch eine bevorzugte Richtung der Kristallstruktur gekennzeichnet und bezeichnet in der Strukturgeologie die eigentliche Textur. Die Begrifflichkeit ist je nach fachlicher Ausrichtung unterschiedlich weit gefasst. Die Formregelung bezeichnet die Regelung nach der Korngestalt. Eine Formregelung, auch Foliation genannt, kann planar oder linear (Lineation) ausgebildet sein, s. [Okrusch und Matthes, 2014].

Diese Formregelungen können mit der Betrachtung einer Kugel, die in z-Richtung gestaucht wird, veranschaulicht werden. Dabei bildet sich ein Rotationsellipsoid in oblater oder prolater Form aus. Ein oblater Ellipsoid ist ein abgeplatteter Ellipsoid.

Die Stauchung in *z*-Richtung führt sowohl in *x*- als auch in *y*-Richtung zur gleichen Streckung. Kommt es hingegen nur in *x*- oder *y*-Richtung zu einer Streckung, handelt es sich um ein prolates (langgezogenes) Ellipsoid, s. Abbildung 2.6.



Abbildung 2.6: Oblates (links) und prolates (rechts) Ellipsoid

Die Begriffe oblat und prolat lassen sich auf das Gefüge übertragen. So wird von einem oblaten, prolaten oder gemischten Gefüge gesprochen. Das oblate Gefüge kann mit einer planaren Foliation gleichgesetzt werden, während ein prolates Gefüge einer Lineation entspricht.

## 2.4 Ursachen für anisotropes Verhalten bei Steinsalz

## 2.4.1 Anisotropie auf mikroskopischer Ebene

Bei Steinsalz handelt es sich um ein annähernd monomineralisches Gestein. Es besteht nahezu vollständig aus Halit, einem Mineral, das kubisch flächenzentriert kristallisiert. Das Kristallgitter besteht aus Natriumkationen und Chloranionen. Abbildung 2.7 zeigt den Aufbau einer Elementarzelle von Natriumchlorid. Ein einzelner Kristall besitzt aufgrund seines Aufbaus anisotrope Eigenschaften. Es sind jedoch Rotationssymmetrien in den Würfelaußenkanten, in den Flächen- sowie in den Volumendiagonalen vorhanden, s. [Rösler, 2012].

Da der NaCl-Kristall anisotrop aufgebaut ist, besitzt er sogenannte Gleitebenen, auf denen viskoplastische Verformung bevorzugt stattfindet. In der Kristallographie ist es üblich, die verschiedenen Gleitebenen und Gleitrichtungen über die Millerschen Indizes anzugeben, s. [Rösler, 2012]. Die Millerschen Indizes einer Ebene sind die Kehrwerte der Schnittpunkte der Ebene mit den drei Achsen des Koordinatensystems, reduziert auf die kleinste ganze Zahl. Eine Ebene wird in Klammern () geschrieben. Liegt die Ebene beispielsweise in der Fläche, die von *x*- und *y*-Achse aufgespannt wird, so ist ihre Bezeichnung in Millerschen Indizes (010), vergleiche Abbildung 2.8.



Abbildung 2.7: Elementarzelle des kubisch-flächenzentrierten NaCl-Kristalls

Die Richtung wird in eckige Klammern [] geschrieben. Die Millerschen Indizes sind dabei die Komponenten des Richtungsvektors, reduziert auf die kleinste ganzzahlige Menge. Gleitet die oben beschriebene Ebene auf deren Diagonalen, so ist die Bezeichnung in Millerschen Indizes [101]. Sind Symmetrien vorhanden, lässt sich die Ebenenschar mithilfe von geschweiften Klammern {} und die Richtung mit <> schreiben. Beispielsweise deckt die Schreibweise {100} alle Würfelflächen, (100), (010) und (001), ab.

Steinsalz gleitet im Wesentlichen in den Gleitsystemen  $\{1\,0\,0\} < 11\,0>$  und  $\{1\,1\,0\} < 11\,0>$  ab, vgl. [Skrotzki und Haasen, 1981; Skrotzki und Welch, 1983; O. Schulze und Rust, 1985]. Die bevorzugten Gleitsysteme sind somit alle Würfelflächen sowie die durch die Flächendiagonalen des Würfels aufgespannten Flächen. Abbildung 2.9 stellt zwei dieser Ebenen dar.

In der Natur kommt es innerhalb des Kristallisationsprozesses sowie durch Beanspruchung zu Fehlern im andernfalls perfekten Kristallgitter. Sie können zusätzlich zu einem potentiellen anisotropen Verhalten beitragen. Es wird zwischen nulldimensionalen sowie 1D- und 2D-Gitterfehlern unterschieden, s. [Kleber et al., 1968; G. Schulze, 1974]. Einige Quellen führen zusätzlich 3D-Gitterfehler an, s. [Günther, 2009; Bonnet, 2017].



Abbildung 2.8: Ebene und Richtung in Millerschen Indizes

Als nulldimensionale Gitterfehler werden Leerstellen im Kristallgitter bezeichnet. Es fehlt ein Kation (Na<sup>+</sup>) oder Anion (Cl<sup>-</sup>). Auch der Einbau von Fremdionen wird als nulldimensionaler Gitterfehler beschrieben.

1D-Gitterfehler, bzw. eindimensionale Liniendefekte werden auch Versetzungen genannt, wobei in Stufen- und Schraubenversetzungen unterschieden wird. Bei einer Stufenversetzung existiert im Kristall ein Versatz in den Kristallebenen, der anschaulich mit einer Deformation aus einer Schubbeanspruchung verglichen, während bei der Schraubenversetzung eine Drehbewegung im Gitter bzw. eine Torsionsbeanspruchung herangezogen werden kann. Abbildung 2.10 zeigt eine Stufen- und eine Schraubenversetzung innerhalb des Kristallgitters.

Die Gesamtheit der Versetzungen in einem Kristall bzw. in einem beobachteten Volumen kann über die Versetzungsdichte  $\rho$  quantifiziert werden. Sie beschreibt das Verhältnis aus der Gesamtlänge der kumulierten Versetzungen zum (Kristall-)Volumen.

Klein- und Großwinkelkorngrenzen werden als zweidimensionale Flächendefekte (2D-







Abbildung 2.10: Linienförmige Gitterfehler; links: Stufenversetzung, rechts: Schraubenversetzung, aus [Elliger, 2005]

Gitterfehler) bezeichnet. Eine Kleinwinkel- bzw. Subkorngrenze liegt vor, wenn sich die Körner mit einen Drehwinkel, der kleiner als 15° ist, berühren. Dies geschieht im Wesentlichen durch die Aneinanderreihung von Stufen- und Schraubenversetzungen. Je größer der Abstand zwischen den Versetzungen dabei ist, desto kleiner wird der Drehwinkel. Ist der Drehwinkel größer als 15°, so handelt es sich um eine Großwinkelkorngrenze. Diese Grenzen entstehen beim Kristallisationsprozess, bei welchem die einzeln gebildeten Kristallsysteme, die Kristallite oder auch Körner, zu einem Gefüge zusammenwachsen. Durch die unterschiedliche Orientierung der Körner bilden sich beim Aufeinandertreffen die sogenannten Korngrenzen aus, was meist mit einem Drehwinkel über 15° geschieht. Die einzelnen Körner weisen demnach unterschiedliche Orientierungen auf und können auch hinsichtlich ihrer Größe variieren, was zusätzlich zu anisotropen Effekten führen kann, s. [Elliger, 2005; Günther, 2009; Rösler, 2012].

Volumendefekte, bzw. 3D-Gitterfehler sind schließlich räumliche Defekte wie Poren oder Einschlüsse, s. [Günther, 2009; Bonnet, 2017]. Hier liegen also mit Gas oder Lösung gefüllte Hohlräume oder auch andere Fremdmaterialien vor, welche das Materialverhalten des Steinsalzes beeinflussen.

Auf mikroskopischer Ebene liegt somit zum einen aufgrund der Kristallstruktur selbst und wegen möglicher Gitterfehler eine Anisotropie vor. Des Weiteren ist aufgrund des Korngefüges eine Anisotropie zu erwarten. Auf makroskopischer Ebene kann sich ein solch anisotropes Korngefüge isotrop verhalten, wenn sich die Körner regellos zu einem Gefüge ergeben und sich die jeweiligen Orientierungen und Fehlstellen in ihrer Gesamtheit ausgleichen, s. [Rösler, 2012].

## 2.4.2 Anisotropie auf makroskopischer Ebene

Makroskopische bzw. globale Anisotropie liegt vor, wenn sich die Kornorientierungen nicht ausgleichen. [Rösler, 2012] listet für polykristalline Materialien mehrere Gründe auf, wobei hinsichtlich des natürlich vorkommenden Steinsalzes folgende Punkte von Relevanz sind.

Eine Kornorientierung gleicht sich über das Untersuchungsgebiet nicht aus, wenn die Korngröße im Vergleich zur Gesamtgröße des untersuchten Bereichs sehr groß ist. Sind also nur wenige Körner vorhanden, kann keine ausreichende Mittelung der Eigenschaften stattfinden. Dies ist in Hinsicht auf Laborversuche von Relevanz, da die Abmessungen des Prüfkörpers den zu untersuchenden Bereich limitieren.

Des Weiteren kann globale Anisotropie vorliegen, wenn die Körner eine klare Vorzugsrichtung aufweisen. Diese ist im Wesentlichen auf nachträgliche Verformung zurückzuführen, s. [Rösler, 2012]. In Bezug auf Salzgestein kann hier auf die Erläuterungen zur Textur bzw. Gefügeregelung in Abschnitt 2.3.2 verwiesen werden. Bei flach gelagerten Steinsalzen kann somit eine Vorzugsrichtung der Körner parallel zur lateralen Ausdehnung des abgelagerten Horizonts auftreten, s. [O. Schulze und Rust, 1985].

Eine weitere Einflussgröße für globale Anisotropie sind Verunreinigungen und Einschaltungen, die auf den Entstehungsprozess der Steinsalzlagerstätte zurückzuführen sind. Das anisotrope Verhalten ist dann zum einen auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften des Materialverbunds zurückzuführen. Zum anderen liegen Grenzflächen zwischen den einzelnen Materialien vor, welche das Verhalten des Materialverbundes zusätzlich beeinflussen können.

## 2.5 Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz

## 2.5.1 Vorbemerkungen

Steinsalz zeigt ein komplexes nicht-lineares Verformungsverhalten, das neben dem Einfluss der Spannung von Faktoren wie Zeit, Temperatur sowie Feuchtegehalt abhängt und auf verschiedene mikrostrukturelle Prozesse zurückzuführen ist, vgl. [Langer et al., 1984; Elliger, 2005].

Grundsätzlich lässt sich das Verformungsverhalten in verschiedene Anteile unterteilen. Die Gesamtverzerrung ergibt sich aus einem Anteil aus elastisch-reversiblen und einem weiteren Anteil aus inelastisch irreversiblen Verformungen. Zweites kann zusätzlich in einen plastischen und einen viskosen, d.h. zeitabhängigen Anteil, unterteilt werden. Der zeitabhängige Prozess wird als Kriechen bezeichnet. Da sich der viskose

und der rein plastische Anteil versuchstechnisch nicht eindeutig trennen lassen, werden diese Anteile als viskoplastische Verzerrungen gemeinsam betrachtet, s. [Günther, 2009].

#### 2.5.2 Elastisch-reversibles Verhalten

Rein ideal-elastische Verzerrungen sind reversibel. Die gesamten Verzerrungen, die durch eine Änderung des Spannungszustands hervorgerufen werden, bilden sich zurück, sofern der Spannungszustand wieder den Ausgangszustand erreicht. Zwischen anliegender Spannung und auftretender Verzerrung liegt eine Proportionalität vor. Der Proportionalitätsfaktor wird als E-Modul bezeichnet und ist als Kenngröße der Steifigkeit eines Material zu verstehen, vgl. Gleichung (2.13). Abbildung 2.11 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

$$\sigma \sim \epsilon$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$
(2.13)



Abbildung 2.11: E-Modul

Die Kompression des Materials bewirkt eine Stauchung und eine Querdehnung. Den Quotienten aus Querdehnung und Stauchung bezeichnet die Querdehnzahl  $\nu$ , s. Gleichung (2.14). Mithilfe des E-Moduls und der Querdehnzahl lässt sich elastisches Materialverhalten mit dem Stoffmodell nach Hooke beschreiben.

$$\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \nu \tag{2.14}$$

Steinsalz wird in der Regel als isotrop angesehen, der dynamische E-Modul liegt bei Steinsalz aus der Schachtanlage Asse II zwischen 33 und 35 GPa, die Querdehnzahl bei 0,23 bis 0,28, s. [Brasser et al., 2008]. Diese Werte werden laut [Brasser et al., 2008] für

norddeutsches Steinsalz als repräsentativ angesehen. Elastische Verzerrungen treten bei jeder Spannungs- und Temperaturänderung auf, spielen hinsichtlich der Gesamtverzerrung aber eher eine untergeordnete Rolle, s. [Gährken, 2018; Missal, 2019].

### 2.5.3 Viskoplastisches Verhalten

#### Phänomenologische Einordnung

Kriechen bezeichnet das zeitabhängige Verformungsverhalten eines Materials bei konstant gehaltener Spannung. Der Antriebsmechanismus für den Kriechprozess bei Steinsalz ist eine vorliegende Deviatorspannung, s. Abschnitt 2.1. Durch den Kriechprozess wird die Deviatorspannung abgebaut, da das Salzgestein einen isostatischen Spannungszustand anstrebt. Phänomenologisch lassen sich die Kriechverzerrungen drei unterschiedlichen Kriechphasen zuordnen. Abbildung 2.12 stellt diese drei Phasen, wie sie in einem Kriechversuch auftreten können, dar.



Abbildung 2.12: Kriechphasen in einem Kriechversuch

In einem klassischen Kriechversuch wird der Probekörper einer konstanten Deviatorspannung ausgesetzt, wobei diese abschnittsweise erhöht oder reduziert werden kann. Bei jeder Erstbelastung durch eine deviatorische Beanspruchung tritt das sogenannte primäre oder auch transiente Kriechen auf. Die primäre Kriechphase ist durch große Verformungsraten, welche mit zunehmender Verformung abnehmen, gekennzeichnet. Es findet eine Verfestigung statt. Das primäre Kriechen geht schließlich in das sogenannte sekundäre oder auch stationäre Kriechen über. Die Verzerrungsrate ist

in dieser Phase konstant. Dieser Kriechprozess findet, sofern der Spannungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze liegt, ebenso wie das primäre Kriechen volumentreu statt. Wird eine gewisse Grenzspannung überschritten, tritt tertiäres Kriechen auf. Diese Grenzspannung, die abhängig vom Einspannungszustand ist, wird auch Dilatanzgrenze genannt. In dieser Phase kommt es zur Schädigung des Steinsalzes. Es bilden sich Mikrorisse und schließlich kommt es zum Kriechbruch. Dieser Prozess ist aufgrund der Mikrorissbildung mit einem Zuwachs des Volumens verbunden, vgl. [Matei und Cristescu, 2000; O. Schulze, 2007]. Ist Schädigung aufgetreten, können die mit ihr verbundenen schädigungsinduzierten Volumenänderungen bei einem Spannungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze wieder zurückgebildet werden, s. [O. Schulze, 2007]. Dieser Prozess wird Schädigungsrückbildung oder Verheilung genannt und ist noch immer Gegenstand der Forschung, vgl. [Hampel et al., 2022a; Epkenhans et al., 2022].

Zur Beschreibung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens von Steinsalz existieren verschiedene höherwertige Stoffmodelle. Sie sind in der Lage, die unterschiedlichen Verformungsanteile wiederzugeben. Zur Untersuchung der einzelnen Verformungsanteile und zur Bestimmung der zugehörigen Kennwerte werden verschiedene Laborversuche durchgeführt, in denen jeweils die einzelnen Anteile möglichst isoliert betrachtet werden, s. [Hampel et al., 2007; Hampel et al., 2022a].

In Langzeit-Kriechversuchen werden im Wesentlichen die viskosen Verformungsanteile, primäres und Erholungskriechen sowie sekundäres Kriechen, untersucht, da dieser Versuchstypus frei von Dilatanzeffekten durchgeführt werden kann, s. [Hampel et al., 2007]. Erholungskriechen beschreibt die viskose Reaktion des Salzes bei einer Reduktion des Spannungszustands. Überschüssige primäre Verzerrung wird abgebaut, s. [Gährken, 2018]. Durch eine Deviatorspannung oberhalb der Dilatanzgrenze lässt sich zusätzlich das tertiäre Kriechverhalten beobachten. Im Kurzzeitfestigkeitsversuch kann die für das tertiäre Kriechen relevante Dilatanzgrenze bestimmt sowie das Bruch- und Nachbruchverhalten von Steinsalz untersucht werden. Verformungen, die im Kurzzeitfestigkeitsversuch auftreten, sind im Wesentlichen plastischer Natur. Viskose Verformungen, die aus dem Kriechen resultieren, spielen eine untergeordnete Rolle, da der Spannungszustand nicht konstant gehalten wird. Eindeutig voneinander trennen lassen sich die Anteile jedoch nicht, s. [Günther, 2009], sodass folgend von (visko-)plastischen Verformungen gesprochen wird.

Abbildung 2.13 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines verzerrungsgeregelten triaxialen Kurzzeitfestigkeitsversuchs. Zu Beginn des Versuchs zeigt sich überwiegend elastisches Verhalten, in der Abbildung wird dies durch den grau eingefärbten Bereich gekennzeichnet. Es folgt die Verfestigung mit (visko-)plastischen Verformungen. Dieser Bereich ist durch eine abnehmende Rate der Spannungszunahme gekennzeichnet. Das Salz verhält sich duktil, der Bruch kündigt sich an. Die maximal



Abbildung 2.13: Kurzzeitfestigkeitsversuch an Steinsalz, nach [Günther, 2009]

aufnehmbare Spannung kennzeichnet den Bruchzustand mit der zugehörigen Bruchspannung  $\sigma_B$  und Bruchdehnung  $\epsilon_B$ . Beide Werte sind vom Einspannungszustand abhängig. Im Bruchzustand heben sich Ver- und Entfestigung auf, im Anschluss folgt die reine Entfestigung des Steinsalzes. Die Spannungen nehmen weiter ab, bis sie ein quasikonstantes Niveau, die Restfestigkeit, erreichen.

In der Mechanik werden beim Festigkeitsverhalten hinsichtlich des Wechsels im Materialverhalten zwei unterschiedliche Grenzen betrachtet. Die Fließgrenze beschreibt den Übergang zwischen elastischem zu duktilem Materialverhalten. Die Bruchgrenze hingegen kennzeichnet das Versagen. Verhält sich ein Material rein spröde, weist also kein duktiles Verhalten auf, so kann die Fließgrenze auch die Versagensgrenze bzw. die Bruchgrenze beschreiben, s. [Gross und Seelig, 2016]. Da Steinsalz in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit ein äußerst duktiles Verhalten aufweist, vgl. [Günther, 2009], ist die Fließgrenze nicht mit der Bruchgrenze kongruent.

Wie allgemein üblich kann eine Zerlegung der Verformungen im Kurzzeitfestigkeitsversuch angenommen werden. Abbildung 2.14 zeigt die Zerlegung der Verformungsanteile mit den zugehörigen Grenzspannungen, die den Beginn des jeweiligen Verformungsbereichs anzeigen.

Als Fließgrenze kann im Kurzzeitfestigkeitsversuch der Übergang von volumentreuen und nicht-volumentreuen (visko-)plastischen Verformungen verstanden werden. Er wird in der Salzmechanik als Dilatanzgrenze bezeichnet. Wird selbige überschritten, tritt bei konstant gehaltener Deviatorspannung, wie bereits erläutert, tertiäres Kriechen unter Mikrorissbildung und Volumenzunahme auf. Die Spannungs-Dehnungs-


Abbildung 2.14: Fließgrenze und Bruchgrenze im Kurzzeitfestigkeitsversuch

Beziehung im sich somit anschließenden (visko-)plastischen Bereich kann mithilfe einer Fließregel ausgedrückt werden, vgl. [Gross und Seelig, 2016; Vittinghoff, 2002]. Die Bruchgrenze ist dann die Überschreitung eines maximal aufnehmbaren Spannungsregimes. Auch sie ist wie die Dilatanzgrenze vom Einspannungszustand abhängig.

### Mikrostrukturelle Einordnung

Mikrostrukturell lassen sich die erläuterten Kriechprozesse mit den Mechanismen des Drucklösungskriechens, s. [Urai und Spiers, 2007] und Versetzungskriechens, s. [Elliger, 2005; Günther, 2009] erklären. Dabei ist das Drucklösungskriechen ein intergranularer Prozess, der zwischen den Korngrenzen, u.a. abhängig vom interkristallinen Feuchtegehalt, stattfindet. In Bereichen, in denen es lokal zu hohen Spannungen kommt, lösen sich an den Korngrenzen die Kristallstrukturen auf, während sich in Bereichen mit geringeren Spannungen neue Kristallstrukturen bilden. Dieser Prozess ist verknüpft mit Kornrotationen und interkristallinen Scherbewegungen. Drucklösungskriechen ist im Wesentlichen bei Spannungen unter 10 MPa für die Verformungen bestimmend, s. [Hampel et al., 2022a].

Versetzungskriechen ist hingegen ein intragranularer Prozess und dominiert die viskoplastischen Verformungen bei höheren Spannungen. Er findet in Abhängigkeit der vorhandenen Versetzungen sowie der bevorzugten Gleitsysteme statt, s. Abschnitt 2.4.1. Ebenfalls Einfluss nehmen die Faktoren Spannungsregime, Temperatur oder auch die mittlere Korngröße. Beim Versetzungskriechen wandert die Versetzung durch den Salzkristall, sodass sich dieser verformt. Die Versetzung wandert bis sie vernichtet wird (Annihilation) oder auf ein Hindernis wie z.B. eine Korngrenze stößt. Stauen sich an den Hindernissen die Versetzungen an, sind höhere Spannungen nötig, um die Hindernisse zu überwinden, was dem Prozess der Verfestigung entspricht, s. [Elliger, 2005; Günther, 2009].

Die im Material vorliegende Versetzungsdichte beeinflusst somit die Verfestigung. In der metallverarbeitenden Industrie wird sich dieser Mechanismus über das sogenannte "grain boundary strengthening" oder zu Deutsch "Kornfeinung" zunutze gemacht und die Festigkeit des Materials über eine geringere mittlere Korngröße erhöht. Eine Verringerung der mittleren Korngröße führt zur Erhöhung der Versetzungsdichte und

zu einer Erhöhung der notwendigen Beanspruchung, um das Hindernis zu durchbrechen, s. [Mouritz, 2012]. Im Kurzzeitfestigkeitsversuch führt dies zu einer höheren Materialverfestigung und somit höheren Bruchgrenze. Versetzungen beeinflussen somit auch maßgeblich das Verhalten des Steinsalzes im Kurzzeitfestigkeitsversuch, auch wenn der Kriechprozess selbst eine untergeordnete Rolle spielt.

[Knauth, 2018] nimmt zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Steinsalz in Anlehnung an [Bourcier et al., 2012] eine Einordnung in die folgenden übergeordneten Mechanismen vor:

- Crystal Slip Plasticity (CSP)
- Grain Boundary Sliding (GBS)
- Grain Boundary Microcracking (GBM)

Hier werden neben den oben genannten (viskosen) Kriechanteilen auch die plastischen Anteile berücksichtigt. Die drei Mechanismen finden in Wechselwirkung statt, d.h. sie treten gemeinsam auf und beeinflussen sich gegenseitig. CSP beschreibt die intrakristallinen Verformungsprozesse und beinhaltet somit auch das Versetzungskriechen sowie die Verfestigungsmechanismen durch Versetzungsneubildung und -akkumulation. Es dominiert die insgesamt erzielten Verformungen. Spannungskonzentrationen, wie sie bei Versetzungsakkumulationen an den Korngrenzen entstehen, bedingen jedoch zusätzlich Scherbewegungen auf den Korngrenzen (GBS), die wiederum zu Rissöffnungen (GBM) führen, s. [Knauth, 2018].

Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass die Korngrenzen im Gefüge als Schwächeflächen verstanden werden können. Rissentstehung und -entwicklung findet bei geringer Einspannung und dann bevorzugt auf den Korngrenzen (GBM) und nicht im Korninneren statt. Die Korngrenzen öffnen sich dabei überwiegend in Richtung der maximalen Hauptspannung bzw. senkrecht zur minimalen Hauptspannung.

[Bourcier et al., 2012] untersuchten synthetische Salzproben im einaxialen Druckversuch und konnten mithilfe digitaler Bildkorrelation zeigen, dass im Wesentlichen die Kristallplastizität für die Gesamtverformung verantwortlich ist. Jedoch zeigte sich dabei ein Einfluss der Orientierung der bevorzugten Gleitebenen der einzelnen Kristalle. Bei Kristallen, die eine ungünstige Orientierung aufwiesen, konnte die Kristallplastizität erst bei höheren Spannungen aktiviert werden. Es kam zu Scherbewegungen und Mikrorissbildung auf den umliegenden Korngrenzen. Rissinitiierung findet demnach bevorzugt auf den Korngrenzen statt. Das zeigen auch die Untersuchungen von [Manthei, 2005], in denen bei triaxialen Kompressionsversuchen akustische Emissionsmessungen vorgenommen wurden. Die Auswertungen zeigen in Kombination mit anderen Arbeiten, dass das dilatante Verhalten im Wesentlichen auf interkristalline Öffnung der Korngrenzen durch Zugrisse zurückzuführen ist.

# 2.6 Stand von Wissenschaft und Forschung

### 2.6.1 Anisotropie in der Felsmechanik

Aus der Felsmechanik ist bekannt, dass Festgesteine mit anisotropem Korngefüge eine anisotrope Festigkeit aufweisen. Ursächlich dafür ist, dass durch das anisotrope Korngefüge Ebenen mit "bevorzugter Spaltbarkeit bzw. abgeminderter Festigkeit" [Wittke, 1984, S.66] vorliegen.

Unter Annahme des Mohr-Coulombschen Bruchkriteriums wird der Bruchzustand erreicht, wenn die im Gefüge auftretende Schubspannung die mobilisierbare Scherfestigkeit übersteigt. Diese ergibt sich aus Reibung und Kohäsion, wobei erstes über die in der Scherfuge herrschende Normalspannung  $\sigma_n$  bewirkt wird. Die Bruchgerade ergibt sich somit in Abhängigkeit der Materialeigenschaften Reibungswinkel  $\varphi$  und Kohäsion *c*, *s*. Gleichung (2.15). Bei einem Durchtrennungsgrad von  $\chi = 1$  wird im Wesentlichen über Reibung abgetragen, die Kohäsion ist vernachlässigbar gering, *s*. Gleichung (2.16). Abbildung 2.15 stellt diesen Zusammenhang grafisch dar.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\varphi) \tag{2.15}$$

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\varphi) \tag{2.16}$$

Aufgrund der Ebenen mit "bevorzugter Spaltbarkeit bzw. abgeminderter Festigkeit" unterscheidet [Wittke, 1984] nun zwischen einer Festigkeit des Gesteins (G) und einer Festigkeit der Schieferungsebene (S), die jeweils über die Festigkeitsparameter Reibung und Kohäsion definiert sind. Dabei gilt:

$$\varphi_S < \varphi_G$$
 und  $c_S < c_G$ .

Für den einaxialen Druckversuch weist [Wittke, 1984] rechnerisch nach, dass die Ausrichtung der Schieferungsebene gegenüber der einwirkenden Belastung einen Einfluss



Abbildung 2.15: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium mit und ohne Berücksichtigung einer Kohäsion *c* 

auf die Festigkeit in Abhängigkeit des Reibungswinkels der Schieferungsebene  $\varphi_S$  hat.

Die in der Schieferungsebene wirkende Schubspannung ergibt sich nach Gleichung (2.17). Dabei ist  $\sigma_1$  der einaxiale Druck und  $\beta$  der Fallwinkel der Schieferungsebene. Der Fallwinkel ist als Neigung der Schieferungsebene gegenüber der Horizontalen definiert, vgl. [Grotzinger und Jordan, 2017].

$$\tau_{res} = \sigma_1 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \tag{2.17}$$

Die aufnehmbare Schubspannung *tau*, s. Gleichung (2.16), ist abhängig von der Normalspannung  $\sigma_n$ . Diese ergibt sich zu:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \cos(\beta). \tag{2.18}$$

Übersteigt die in der Ebene vorhandene Schubspannung  $\tau_{res}$  die aufnehmbare Schubspannung  $\tau$  kommt es zum Bruch. Durch Einsetzen von Gleichung (2.18) in Gleichung (2.16) ergibt sich:

$$\sigma_1 \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \ge \sigma_1 \cdot \cos(\beta) \cdot \tan(\varphi_S) + c_S. \tag{2.19}$$

Durch Auflösen nach  $\sigma_1$  lässt sich als einaxiale Druckfestigkeit nach Gleichung (2.20) ermitteln.

$$\sigma_1 \ge \frac{c_S}{\sin(\beta) \cdot \cos(\beta) - \cos^2(\beta) \cdot \tan(\varphi_S)}$$
(2.20)

Die geringste Festigkeit ist unter dem Winkel  $\beta = 45^{\circ} + \varphi_S/2$  zu erwarten. Bei Winkeln, die kleiner bzw. gleich dem Reibungswinkel sind,  $\beta \leq \varphi_S$  und  $\beta = 90^{\circ}$ , übersteigt die Schubspannung die Schubfestigkeit nicht, sodass kein Schubbruch auf der Schieferungsebene eintritt. Abbildung 2.16 zeigt die einaxiale Druckfestigkeit eines geschieferten Gesteins in Abhängigkeit des Fallwinkels  $\beta$  mit einem Reibungswinkel der Schieferungsebene von  $\varphi_S = 30^{\circ}$ .

[Plinniger et al., 2019] konnten diesen rechnerischen Nachweis durch laborative Untersuchungen belegen. Sie untersuchten sowohl durch Sedimentation geschichtetes als auch durch Metamorphose geschiefertes Gestein in einaxialen Druckversuchen unter Variation des Gefügewinkels. Für Winkel zwischen 30° und 50° zwischen Belastungsachse und Gefügeebene (entspricht nach Definition des Fallwinkels 40° bis 60°) wurden um bis zu 95 % geringere Druckfestigkeiten gegenüber einem Winkel von 0° erreicht.



Abbildung 2.16: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Fallwinkel  $\beta$ , nach [Wittke, 1984]

### 2.6.2 Anisotropie in der Salzmechanik

Im Rahmen der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle lag der Fokus von Laborversuchen sowie der Materialmodellierung in der Salzmechanik bisher im Wesentlichen auf Salz aus steiler Lagerung. Die vorliegende Schichtung ist dabei auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen.

[Dubey und Gairola, 2000; Dubey und Gairola, 2008] und [Dubey, 2018] betrachten Steinsalz, das mit Schichten anderer Materialien wie Ton, Quarz und Mergel, durchzogen ist. Es liegen folglich Einschaltungen vor, welche das Verhalten des Gesamtmaterialkomplexes beeinflussen. Ziel der Untersuchungen ist die Analyse des Spannungs-Verformungs-Verhaltens unter Variation des Fallwinkels (0°, 30° bis 38°, 90°).

In [Dubey und Gairola, 2000] wird die Ermüdungsfestigkeit nach zyklischer Belastung über einaxiale Druckversuche ermittelt. Sie ist für einen Fallwinkel von 90° am höchsten und wie nach [Wittke, 1984] zu erwarten, bei 38° am geringsten.

Auch in [Dubey und Gairola, 2008] erfolgt eine zyklische Belastung. Im Anschluss werden die Proben unterschiedlich hohen deviatorischen Beanspruchungen ausgesetzt, sodass Kriechen einsetzt. Die Autoren beobachten, dass anisotropes Verhalten nur bei geringen deviatorischen Beanspruchungen sichtbar ist. Die Kriechdehnung ist dann bei Proben mit einem Fallwinkel von 90° geringer als bei 0° und 30°.

[Dubey, 2018] betrachtet schließlich das Bruchverhalten in kraftgeregelten einaxialen Kompressionsversuchen bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten (3,5 ·  $10^{-4}$  MPa/min  $\leq \dot{\sigma} \leq 9$  MPa/min). Er beobachtet, dass anisotrope Effekte bei der Bruchdehnung und -festigkeit mit Zunahme der Belastungsgeschwindigkeit abnehmen. Bei geringen Belastungsgeschwindigkeiten zeigt sich für ein Fallen von 38° die geringste Bruchspannung, unter 0° und 86° werden ähnlich hohe Festigkeiten erzielt. Die Bruchdehnung ist hingegen bei einem Fallen von 86° am geringsten und bei 0° am höchsten. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Salz aus flacher Lagerung ist nicht gegeben. Zum einen handelt es sich bei dem untersuchten Salz um steil gelagertes Steinsalz, sodass eine andere geologische Vorgeschichte des Salzes vorliegt. Es unterlag bereits einem halokinetischen Prozess. Des Weiteren wurden hier Salzhorizonte mit Einschaltungen und kein reines Steinsalz untersucht. Die Ergebnisse sind somit als Ergebnisse des speziell vorliegenden Materialkomplexes zu sehen.

[Hatzor und Heyman, 1997] untersuchten Salz des Mount Sedom, einem Salzberg in Israel. Die Schichtung, welche sich aufgrund der Sedimentablagerung eingestellt hat, liegt senkrecht zur Erdoberfläche vor. Die Autoren untersuchen das Dilatanzverhalten mittels triaxialer Kompressionsversuche für ein Fallen von 0° und 90°. Für geringe Manteldrücke wird eine geringere Dilatanzgrenze für die Proben mit einem Fallwinkel von 90° ermittelt. Da es sich hier jedoch nicht um Salz aus einem Tiefenlager handelt, die Spannungsverhältnisse somit nicht vergleichbar sind, ist auch hier eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf flach gelagertes Steinsalz aus einem Tiefenlager anzuzweifeln.

[Wallner, 1981; O. Schulze und Rust, 1985] sowie [Linckens et al., 2019] untersuchen eingeregeltes Haupt- bzw. Leinesalz, das aus der Schachtanlage Asse II gewonnen wurde. In [Wallner, 1981; O. Schulze und Rust, 1985] werden kraftgeregelte einaxiale und triaxiale Kompressionsversuche mit unterschiedlichem Fallwinkel der Haupteinregelungsebene der Kristalle durchgeführt. Der Winkel wird zwischen 0° und 90° in 15°-Schritten variiert. Die Ergebnisse zeigen ein anisotropes Verhalten in Abhängigkeit des Fallens. Die Festigkeit nimmt mit Zunahme des Fallwinkels ab. Auch die Bruchdehnung reduziert sich mit Zunahme des Fallwinkels. Hier ist zudem eine prozentual größere Abnahme als bei der Festigkeit zu beobachten. Das anisotrope Verhalten

scheint zusätzlich von der Einspannung abzuhängen. Je höher der Manteldruck, desto geringer fällt die Anisotropie aus.

[Linckens et al., 2019] untersuchen quaderförmige Proben im verzerrungsgeregelten Kompressionsversuch, wobei die Versuchstechnik einen ebenen Verzerrungszustand erlaubt. Die versuchstechnisch bedingte geringe Belastungsgeschwindigkeit von  $10^{-7}$  s<sup>-1</sup> soll mit einer hohen Temperatur von 345° C ausgeglichen werden. Es werden Proben ohne Vorzugsrichtung der Körner und Proben mit Vorzugsrichtung bei einem Fallwinkel von 0°, 45° und 90° untersucht. Die Autoren beobachten eine Abhängigkeit im Spannungs-Verformungs-Verhalten hinsichtlich der Kornorientierung. Bei den Proben mit einem Fallwinkel von 0° und 45° setzt die Verfestigungsphase bei geringeren Spannungen als bei der Probe ohne Einregelung und der Probe mit einem Fallwinkel von 90° ein. Letztere beginnt bei den höchsten Spannungen zu verfestigen.

Sowohl in [Wallner, 1981; O. Schulze und Rust, 1985] sowie in [Linckens et al., 2019] stammt das untersuchte Salz aus einem Salzdom. Obwohl eine Einregelung und somit Vorzugsrichtung der Körner vorliegt, unterlag das Salz bereits einem halokinetischen Prozess, was eine Vergleichbarkeit mit flach gelagertem Steinsalz erschwert. Zudem weist Steinsalz aus flacher Lagerung in der Regel einen höheren Feuchtegehalt auf.

Auch der Vergleich mit Studien an synthetisch hergestelltem polykristallinem Salz, wie [Moslehy et al., 2022] ist nicht unmittelbar möglich. Das Salz unterlag keinem natürlichem Entstehungsprozess. Die Autoren stellen polykristallines Salz mit unterschiedlichen Korngrößen und Porositäten her. Im einaxialen Druckversuch stellen die Autoren fest, dass sich die Proben mit den geringsten Korngrößen und der höchsten Porosität eher spröde verhalten und vergleichsweise hohe Festigkeiten erreichen. Die Festigkeiten der Proben mit mittleren und großen Korngrößen sowie geringen Porositäten liegen nah beieinander. Dabei verhalten sich die Proben mit großen Körnern duktiler und weisen somit höhere Bruchdehnungen auf. [Moslehy et al., 2022] untersuchen des Weiteren auch natürliches Salz. Dieses liegt in Form von Einkristallen vor und stammt aus einer Fazies aus flach gelagertem Steinsalz. Die natürlichen Einkristalle, die untersucht werden, werden unter verschiedenen Temperaturen und Winkeln (0°, 19° und 30°) zur {1 0 0}-Ebene, also zu einer Außenfläche des Kristalls, im einaxialen Druckversuch getestet. Die Autoren beobachten eine Erhöhung der Festigkeit mit Zunahme des Winkels.

Neben den erwähnten Einkristallen sind auch Untersuchungen an polykristallinen Proben aus untertägig flach gelagertem Steinsalz vorhanden. [Bauer et al., 2019] legen den Schwerpunkt ihrer Studie auf das einaxiale Bruchverhalten von steil und flach gelagertem Steinsalz bei hohen Verformungsraten ( $\dot{e} = 50 \, s^{-1}$ ). Sie variieren den Fallwinkel mit 0° und 90°. Die Autoren identifizieren eine Anisotropie in der Festigkeit in Abhängigkeit des Fallens bei beiden Salztypen. Die Festigkeit der Proben mit einem Fallen von 90° (Belastungsrichtung parallel zur Richtung der Schichtung) ist um 15 bis

 $23\,\%$ höher. Zudem weist das Salz aus steiler Lagerung insgesamt höhere Festigkeiten auf.

In [Minkley et al., 2018] werden triaxiale Kompressionsversuche an Salz aus flacher Lagerung durchgeführt. Der Fokus liegt auf den vorhandenen Einschaltungen und Verunreinigungen der Salzvarietäten. Deren Einfluss auf das Bruchverhalten unter verschiedenen Fallwinkeln (0°, 60° und 90°) wurde für Salz mit deutlichen Tonlöserhorizonten bzw. Schichtflächen mittels triaxialer Kompressionsversuche untersucht. Die Proben mit einer Schichtung von 60° zeigen deutlich geringere Festigkeiten. Die Festigkeiten von den 0°- und 90°-Proben liegen in einem ähnlichen Spannungsbereich.

[Sobolik et al., 2020; Sobolik, 2022] untersuchten im Rahmen des Forschungsprojekts WEIMOS das Scherverhalten von Tonhorizonten in flach gelagertem Salz aus der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Dazu wurden zum einen Proben mit natürlichen Toneinschaltungen aus der Grube gewonnen. Zum anderen wurden solche Tonschichten im Salz künstlich erzeugt. Beide Probenarten wurden im direkten Scherversuch untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die natürlich entstandenen Tonschichten ein ähnliches Scherverhalten wie das reine Steinsalz aufweisen. Die künstlichen Proben zeigen zwar eine ähnliche Kohäsion, jedoch durch einen deutlich geringeren Reibungskoeffizienten eine insgesamt geringere Festigkeit. Die Autoren führen diese Beobachtung auf eine bessere Verzahnung der Grenzflächen bei den natürlichen Proben zurück, weisen diesbezüglich jedoch auch auf weiteren Forschungsbedarf hin.

# 2.7 Forschungsfrage

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Untersuchungen an flach gelagertem Steinsalz deutlich unterrepräsentiert sind. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den aufgeführten Studien an Salz aus steiler Lagerung ist nicht gegeben, da es eine andere geologische Vorgeschichte als flach gelagertes Steinsalz aufweist.

Untersuchungen zu anisotropem Verhalten an Salz aus flacher Lagerung wurden im Wesentlichen in Verbindung mit Einschaltungen durch andere Gesteine durchgeführt.

Aufgrund von chemischer Sedimentation sowie nachträglicher Verformung durch Überlagerungsdruck kann Steinsalz aus flacher Lagerung eine räumliche Orientierung in Form eines planaren Parallel- und/oder Lineargefüges aufweisen. Einschaltungen und Verunreinigungen ergeben ebenfalls ein heterogenes Gefüge, das hier jedoch nicht thematisiert wird.

Diese räumliche Orientierung des Steinsalzes zeigt sich über die Kornform bzw. -grenzen sowie deren Ausrichtung und lässt ein anisotropes Spannungs- und Verformungsverhalten erwarten. Dabei entsprechen die Korngrenzen den Kontaktflächen zwischen den Körnern. Diese Kontaktbereiche stellen nachweislich eine Schwächezone im Gefüge dar. Es stellt sich somit die Frage, ob die Kontaktbereiche der Korngrenzen in ihrem Verhalten im Korngefüge vergleichbar mit dem der Trennflächen im Fels sind. Dies würde bedeuten, dass die Festigkeit der Kontaktbereiche der Korngrenzen (KG) kleiner ist als die des Korns (K):

 $\varphi_{KG} < \varphi_K$  und  $c_{KG} < c_K$ .

Um diese These zu untersuchen, wird in der vorliegenden Arbeit Steinsalz aus flacher Lagerung ohne Einschaltungen oder starke Verunreinigungen in seiner Struktur und Textur charakterisiert. Anschließend werden triaxiale Kurzzeitfestigkeitsversuche mit unterschiedlichen Fallwinkeln zur Schichtung unter verschiedenen Manteldrücken durchgeführt.

## 3.1 Probekörper aus dem Bergwerk Borth

### 3.1.1 Bergwerk Borth

Das Bergwerk Borth befindet sich nordwestlich des Ruhrgebiets im Westen von Nordrhein-Westfalen, s. Abbildung 3.1. Geologisch betrachtet ist es der Niederrheinischen Salzlagerstätte zuzuordnen.



Abbildung 3.1: Lage des Salzbergwerks Borth in Deutschland, aus [FOSSGIS e.V., 2020]

Die Niederrheinische Salzlagerstätte liegt am südwestlichen Rand des ehemaligen Zechsteinbeckens und erstreckt sich vom Emsland bis in das Niederrheingebiet. Ins-

gesamt liegt in der Niederrheinischen Salzlagerstätte mit etwa 250 m eine in Deutschland vergleichsweise geringe Mächtigkeit vor. Die Mächtigkeit variiert ebenso wie die Teufenlage aufgrund der geologischen Vorgeschichte stark, s. [Reinhold und Hammer, 2016]. In besonders tiefen Bereichen des Zechsteinbeckens wurden in der ersten Zechsteinfolge, der Werrafolge z1, Mächtigkeiten von 400 m, innerhalb der zweiten Zechsteinfolge, der Staßfurtfolge z2, auch 1.500 m erreicht, s. [Meschede, 2015].

Die Lagerstätte des Steinsalzbergwerks Borth weist nur in der Werrafolge z1 die leicht löslichen Salze, Steinsalz und Kalisalz, auf. Die Werrafolge z1 wird vom Geologischen Dienst NRW in das Untere und Obere Werra-Salz unterschieden, s. [Geologischer Dienst NRW, 2016]. Das Steinsalz liegt im Bereich des Bergwerks Borth flach gelagert vor. Abbildung 3.2 zeigt ein geologisches Übersichtsprofil des Niederrheinischen Beckens. Blau gekennzeichnet ist die Lage des Bergwerks Borth.



Abbildung 3.2: Geologisches Übersichtsprofil des Niederrheinischen Beckens, aus [Dressel et al., 2023] nach [Teichmüller, 1958]

Das Bergwerk Borth befindet sich im südlichen Teil der niederrheinischen Salzlagerstätte. Die Mächtigkeit des Salzhorizonts beträgt dort etwa 200 m. [Bräunig und Kirchhof, 2009] klassieren die Werrafolge im Gegensatz zum Geologischen Dienst NRW neben dem Oberen und Unteren auch in das Mittlere Werra-Steinsalz. So entfallen von den 200 m laut [Bräunig und Kirchhof, 2009] jeweils 70 m auf das Obere und Untere Werra-Steinsalz und etwa 60 m auf das Mittlere Werra-Steinsalz. Oberhalb des Salzhorizonts befindet sich eine bis zu 70 m mächtige Schichtenfolge, die im Wesent-

lichen aus Tonsteinen des Zechsteins besteht. Das Deckgebirge weist insgesamt eine Mächtigkeit von ca. 800 m auf, s. [Bräunig und Kirchhof, 2009].

Der Abbauhorizont befindet sich im Unteren Werra-Steinsalz in einer Teufe zwischen 750 und 950 m. Dort wird qualitativ hochwertiges Steinsalz mit einer Mächtigkeit von bis zu 20 m gewonnen, s. [Becker et al., 2014]. Der Abbauhorizont befindet sich etwa 15 m über der Salzbasis, die durch den etwa fünf Meter mächtigen Unteren Werra-Anhydrit gebildet wird. Abgebaut wird mittels Bohr- und Sprengvortrieb oder einer Vollschnittmaschine, s. [Bräunig und Kirchhof, 2009]. Von diesem flach gelagerten Steinsalz stellte die K+S Minerals and Agriculture GmbH (K+S), vormals European Salt Company GmbH & CO. KG (esco), dem IGG zwei Großblöcke zu Versuchszwecken zur Verfügung.

Abbildung 3.3 zeigt links die Lage des Bergwerks Borth innerhalb des Niederrheinischen Beckens und rechts im geologischen Profil. Im geologischen Profil ist der Salzhorizont hellblau dargestellt. Das darunter liegende Karbon ist grau eingefärbt, während in Orange Ablagerungen aus der Zeit des Buntsandsteins und in Dunkelgrün des Tertiärs gekennzeichnet sind.



Abbildung 3.3: Salzmächtigkeit der Werraformation im Niederrheinischen Becken (links), Geologisches Profil des Niederrheinischen Beckens mit Lage des Bergwerks Borth (rechts), aus [Becker et al., 2014]

Als Schichtung wird für dieses stratiform gelagerte Salzgestein folgend die durch die Diagenese bedingte laterale Ausdehnung des Salzhorizonts bezeichnet. Da kein signifikanter halokinetischer Prozess stattfand, liegt das Salz weiträumig betrachtet häufig in seiner ursprünglichen Form vor. Auch in Borth findet sich boudiniertes und gefaltetes Salzgefüge. Dies war jedoch nicht Gegenstand der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

### 3.1.2 Großblöcke

Der erste Großblock wurde 2016 (Block 2016) gewonnen und durch das IGG in Borth abgeholt. Es liegt keine fotografische Dokumentation des Blocks vor. Der Block besaß nach Aussagen von Mitarbeitern des IGG in etwa eine Größe von ca. 50 cm x 90 cm x 70 cm. Die Schichtung des Salzes ist an den Proben, die aus Block 2016 gewonnen wurden, anhand der orangenen Färbung gut erkennbar. Eine erste makroskopische Charakterisierung der Korngröße *d* findet nach [Bornemann et al., 2001] in die Beschreibung fein-, mittel- bzw. grobkristallin statt.

$d < 5 \mathrm{mm}$	feinkristallin
$5 \leq d \leq 20 \mathrm{mm}$	mittelkristallin
$d > 20 \mathrm{mm}$	grobkristallin

Das Salz ist im Wesentlichen als feinkristallin, an einigen Stellen als mittelkristallin einzustufen. Diese Art des Salzes wird intern bei K+S als "Buntes Salz" geführt. Der Reinheitsgrad ist aus petrografischer Sicht hoch, hinsichtlich des Absatzmarkts jedoch von geringer Qualität. Es steht nicht im Fokus des Abbaus und befindet sich vorrangig oberhalb des eigentlichen Abbauhorizonts, vergleiche Abbildung 3.4.



Abbildung 3.4: Schematisches stratigraphisches Profil des Unteren und Mittleren Werra-Steinsalzes im Bereich des Bergwerks Borth, aus [Dressel et al., 2023]

Der zweite Großblock wurde im Oktober 2020 (Block 2020) gewonnen. Block 2020 weist vor Gewinnung der Probekörper Abmessungen von ca. 50 cm x 50 cm x 40 cm auf, siehe Abbildung 3.5 (links). 2021 wurde der Block zunächst in drei Teile geschnitten, um ihn für die weitere Probenherstellung in eine bessere Handhabbarkeit

zu bringen. Abbildung 3.5 (rechts) zeigt die so entstandene glatte Schnittfläche des Blocks 2020. Hier lässt sich die Schichtung im Salz sowie die Heterogenität der Korngröße gut erkennen. Es lassen sich Bereiche unterschiedlicher Kristallinität ausmachen, die durch farbliche Rechtecke gekennzeichnet sind. Die gräulichen Bereiche sind als vorrangig feinkristallin einzustufen (magenta). Im Übergang zu den großen farblosen, langgezogenen Körnern sind mittelkristalline Bereiche zu identifizieren (grün). Einige Körner im grobkristallinen Bereich (blau) sind bis zu 5 cm groß. Die großen Körner neigen zu einer länglichen Form in Richtung der Schichtung, welche an dieser sowie anhand von leichten Färbungen erkennbar ist.



Abbildung 3.5: Abmessungen des Blocks 2020, links: gesamter Block, rechts: glatte Schnittfläche in *yz*-Ebene mit Kennzeichnung von Bereichen unterschiedlicher Kristallinität

Laut K+S handelt es sich bei diesem Salz um das von ihnen als "Primasalz" klassierte Steinsalz. Es weist eine hohe Reinheit von mindestens 98,5 Gew.-% auf und ist Gewinnungssalz der höchsten Güte. Es befindet sich im sohlennahen Bereich der Strosse des Abbauquerschnitts. Block 2020 wurde am Rand eines Baufelds in einer Teufe von etwa 823 m gewonnen, vergleiche Abbildung 3.6. Aufgrund des Randbereichs ist davon auszugehen, dass das Salz vergleichsweise geringe Belastungen durch Spannungsumlagerungen, die aus dem Auffahren der Hohlräume resultieren, erfahren hat. Beide Blöcke wurden nach [Schleinig und Dressel, 2023] durch schonende Verfahren gewonnen.



Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Grubengebäudes (rechts) mit Ausschnitt und Lokation der Probenahme von Block 2020 (links), aus [Dressel et al., 2023]

## 3.2 Untersuchungen zur Bestimmung der Gesteinsmerkmale

### 3.2.1 Vorbemerkungen

Zur Bestimmung der Gesteinsmerkmale wurden externe Expertisen seitens der Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie auf den Fachbereich Baustoffe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) eingeholt.

An der BGR wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Merkmale des Korngefüges vorgenommen. Das IGG stellte der BGR dazu mehrere Proben beider Gesteinsblöcke zur Verfügung. Vom Block 2016 waren dies vier verbliebene zylindrische Proben, die nicht triaxial belastet wurden. Zudem wurde ein Reststück in Form einer Scheibe mit Abmessungen von ca. 26 cm x 17 cm x 3 cm (BxHxT) sowie ein quaderförmiges Reststück mit Abmessungen von ca. 15 cm x 12 cm x 13 cm (BxHxT) zur Untersuchung der Schnittflächen bereit gestellt. Vom Block 2020 wurden insgesamt fünf größere Würfel mit Kantenlängen zwischen 5 und 8 cm sowie sechs kleinere Würfel mit einer Kantenlänge von etwa 4 cm übergeben. Drei der größeren Würfel stammen aus dem grobbis mittelkristallinen, die übrigen zwei großen sowie alle sechs kleinen Würfel aus dem feinkristallinen Bereich.

Aufgabe der BGR war es zum einen innerhalb einer petrographischen Untersuchung das Gesteinsgefüge zu untersuchen. Des Weiteren war eine Aussage zur Verteilung

von Fremdphasen sowie zu Fluideinschlüssen in den Körnern bzw. an den Korngrenzen gewünscht.

Die Einordnung der Gefügemerkmale erfolgte über Bildauswertung von Fotos der angeschliffenen Proben. Zur Bestimmung von möglichen Fremdphasen sowie Fluideinschlüssen kam das Mikroskopieren von Dünnschliffen zum Einsatz. Die BGR ermittelte des Weiteren den Bromidgehalt des Gesamtgesteins mittels mobiler Röntgenfluoreszenz Analyse (mXRF) sowie den Fluidgehalt über nuklearmagnetische Resonanz-Relaxometrie (NMR-Relaxometrie).

Das IBMB stellte einen Mikrocomputertomograph für entsprechende Aufnahmen zur Verfügung. Vorrangig dienten sie der Beurteilung des Zustands der untersuchten Prüfkörper vor und nach dem Versuch. Die Ergebnisse können jedoch auch die Bewertung der Gesteinscharakterisierung unterstützen.

### 3.2.2 Makroskopische Gesteinsuntersuchung

Zur Bestimmung der Struktur nutzt die BGR manuelle und automatisierte Methoden zur Auswertung von Bildern des Korngefüges. Die Bilder werden mittels Fotografien an Schnittflächen, die teilweise noch feiner abgeschliffen werden, erstellt. Zur Fotografie wurde eine Kamera Nikon D7000 (16,2 MP Auflösung) mit einem Objektiv Nikon AF-S Micro Nikkor 105mm f/2.8G ED mit 105 mm Festbrennweite genutzt. Um optische Verzerrungen zu minimieren, wurden die Kamera und die Probe möglichst waagerecht ausgerichtet. Der Abstand zwischen Probe und Objektiv betrug probenabhängig ca. 50 bis 100 cm, wobei die Probe möglichst formatfüllend fotografiert wurde. Im Anschluss können in den Fotos die Korngrenzen manuell eingezeichnet und diese Bilder mit dem Programmsystem Fiji in binäre Bilddateien umgewandelt werden. Das Programm identifiziert im Anschluss automatisiert die angeschnittenen Körner. Es lassen sich die Achsenlängen der Körner,  $a_1$  und  $a_2$ , sowie der Winkel  $\varphi$  zwischen der langen und einer definierten Bezugsachse bestimmen. Lassen sich die Korngrenzen nicht eindeutig erkennen, bietet sich ein rein manuelles Verfahren an, bei welchem lediglich die Abmessungen der beiden Achsen eines Korns sowie der Winkel  $\varphi$  bestimmt werden. Innerhalb von Fiji erfolgt zusätzlich die Umrechnung von Pixel in Millimeter, wenn die entsprechende Skalierung angegeben wird. Das Verfahren ist in [Thiemeyer et al., 2016] und [Henneberg et al., 2022] beschrieben. Abbildung 3.7 stellt die Parameter zur Beschreibung der Geometrie und der Raumstellung eines Korns grafisch dar.

Die ermittelten Werte können in einer CSV-Datei abgespeichert und folglich mit anderen Programmen genutzt werden. Die erhobenen Daten wurden dem IGG von der BGR als CSV- und als *Microsoft Excel*-Datei ebenso wie die dazu genutzten Bilddateien (s. Anhang A) zur Verfügung gestellt.



Abbildung 3.7: Parameter zur Beschreibung der Geometrie und Raumstellung eines angeschnittenen Korns, nach [Thiemeyer et al., 2016]

Mithilfe der Daten können nun statistische Auswertungen zur Bestimmung des Gefüges erfolgen. Es bietet sich zunächst an, die mittlere Korngröße sowie das mittlere Verhältnis aus beiden Achsen *AR* (aspect ratio) zu ermitteln. Mithilfe des Verhältnisses lässt sich prüfen, ob eine Längung der Körner vorliegt. Ist dies der Fall, kann des Weiteren über die Betrachtung der gemessenen Winkel  $\varphi$  eine bevorzugte Orientierung der langen Achse innerhalb der untersuchten Ebene überprüft werden.

Um eine Aussage der räumlichen Orientierung des Gefüges treffen zu können, ist die Auswertung in allen drei Raumrichtungen erforderlich. Dazu bietet sich neben der obigen Auswertung das Programm *Ellipsoid* an. Es benötigt für jedes analysierte Korn die Messwerte der langen und kurzen Achse, den Winkel  $\varphi$  sowie die Angabe der Raumstellung der untersuchten Ebene mithilfe des Streich- und Fallwinkels,  $\alpha$  und  $\theta$ . Über diese Angaben bestimmt das Programm ein mittleres Ellipsoid sowie einen Faktor der Ellipsenform (shape factor) *T* und einen Grad der Anisotropie (degree of anisotropy) *P* nach [Jelinek, 1981]. *T* gibt Auskunft über die Gefügeregelung.

T = -1	rein prolates Gefüge
-1 < T < 0	überwiegend prolates Gefüge
T = 0	neutrales Gefüge
0 < T < 1	überwiegend oblates Gefüge
T = 1	rein oblates Gefüge

Werte von -1 und 1 sind als Rotationsellipsoide zu verstehen, 0 als Kugel. In den beiden anderen Fällen liegen somit triaxiale Ellipsoide mit zwei kurzen und einer langen bzw. zwei langen und einer kurzen Achse vor.

*P* gibt Auskunft über die Stärke der Elliptizität. Beispielsweise bedeutet P = 1,1 einen Grad an Anisotropie von 10 %, s. [Thiemeyer et al., 2016].

Insgesamt wurden an Block 2016 zwei Proben untersucht. Für die Scheibe konnte nur eine Ebene analysiert werden. An Block 2020 wurden insgesamt vier Proben untersucht. Davon stammen drei Proben aus dem mittel- bis grobkristallinen und eine Probe aus dem feinkristallinen Bereich. Tabelle 3.1 listet die untersuchten Ebenen beider Blöcke auf.

Block	Bereich	Bereich Bezeichnung			
2016	fein- bis mittelkristallin	Bo-2016 Scheibe Bo-2016 Quader	xz xy, xz, yz		
2020	mittel- bis grobkristallin	Bo-2020 x_8 Bo-2020 x_17.5 Bo-2020 x_27	xy, xz, yz xy, xz, yz xy, xz, yz		
2020	feinkristallin	Bo-2020 fein	xy, xz, yz		

Tabelle 3.1: Untersuchungsprogramm zur Bestimmung der makroskopischen Gesteinsmerkmale

### 3.2.3 Mikrocomputertomographie

An einigen Proben des Blocks 2016 wurden vor und nach den Versuchen mittels Mikrocomputertomograph µCT-Bilder aufgenommen. Die Aufnahmen dienen neben der Gesteinscharakterisierung auch der Beurteilung der Konsolidierungsphase und des Bruchverhaltens. Genutzt wurde ein Mikrocomputertomograph "v|tome|x s" der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH. Dieser befindet sich am IBMB der Technischen Universität Braunschweig.

Die Untersuchungsmethode ist zerstörungsfrei und ermöglicht die Prüfung der Rissfreiheit vor der Untersuchung sowie eine Einschätzung der Rissentwicklung nach dem Versuch. Des Weiteren ist die Erkennung von qualitativen Dichteunterschieden möglich.

Die maximale Voxel-Auflösung des Computers beträgt 2µm. In den Aufnahmen wurde eine Auflösung von 64µm/Voxel erzielt. Für eine exakte Identifizierung der Korngrenzen ist diese Auflösung nicht ausreichend, s. [Mintzlaff et al., 2019]. Durch erkennbare Dichteunterschiede lassen sich jedoch Rückschlüsse auf vorhandene Nebenphasen im Gestein ziehen.

### 3.2.4 Dünnschliffmikroskopie

Die Erstellung von Dünnschliffen sowie die Durchführung der Dünnschliffmikroskopie ist ein Standardverfahren, das beispielsweise in [Raith et al., 2011] erläutert wird.

Polarisationsmikroskope haben im Vergleich zu reinen Durchlichtmikroskopen den Vorteil, dass sich optisch aktive Kristalle eindeutig identifizieren und von inaktiven unterscheiden lassen können. Halit ist ein optisch isotropes Mineral. Sein Aussehen ändert sich unter dem Polarisationsmikroskop nicht, während beispielsweise Anhydrit als optisch aktives Mineral unter gekreuzten Polarisatoren dunkel oder in bunten Interferenzfarben erscheinen kann. Für die Bestimmung besonders kleiner Minerale wird eine höhere Vergrößerung benötigt. Die Ansprache von Tonmineralen kann beispielsweise an Dünnschliffen unter Nutzung eines Rasterelektronenmikroskops erfolgen.

Die BGR stellte mehrere Dünnschliffe aus den übergebenen Proben beider Blöcke her und nutzte zur Beschreibung dieser ein Polarisationsmikroskop des Typs "Leitz DMRM" (Auf- und Durchlicht sowie Fluoreszenzauflicht), ausgestattet mit einer Mikroskopkamera "Leica DFC 7000C" zur Fotodokumentation.

### 3.2.5 Mobiles, energiedispersives Röntgenfluoreszenzgerät (mXRF)

Das mobile, energiedispersive Röntgenfluoreszenzgerät (englisch: *mobile X-Ray Fluore-scence (mXRF)*) kann dazu genutzt werden, die geochemische Zusammensetzung der Gesteine und insbesondere den Bromidgehalt der untersuchten Probe zu bestimmen. Dieser gibt, gemeinsam mit der mineralogischen Zusammensetzung, Auskunft über das Eindunstungsstadium. Im Verlauf der Eindunstung von Meerwasser wird Bromid diadoch an der Stelle des Cl-Ions in die Kristallstruktur des Steinsalzes eingebaut. Der Bromidgehalt steigt sowohl in der verbleibenden Restlösung, als auch im auskristallisierten Halit. Er ist somit in späten Eindunstungsstadien höher als in frühen, s. [Braitsch, 1971].

Das Verfahren selbst kann [Mertineit et al., 2022] entnommen werden. Die BGR untersuchte insgesamt je fünf Proben des Blocks 2016 und des Blocks 2020. Zum Einsatz kam das Gerät "Niton XL3t hybrid" der Firma ThermoFisher Scientific.

### 3.2.6 NMR-Relaxometrie

Die Kernspinresonanz (englisch: *nuclear magnetic resonance (NMR)*)-Relaxometrie ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Quantifizierung von Wasserstoff und zur Charakterisierung von Porenraum. Dabei wird die untersuchte Probe einem Magnetfeld ausgesetzt, welches die in der Probe enthaltenen Atome in einen angeregten Zustand versetzt. Unter Ausnutzung der Eigenfrequenz, die jedes Atom besitzt, kann der Fokus auf bestimmte Atome wie beispielsweise das Wasserstoffatom gelenkt werden. Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens sowie die Grenzen der Anwendbarkeit sind [Mertineit et al., 2022] zu entnehmen.

Die Untersuchungen wurden mit der Anlage "Rock Core Analyzer" der Firma Magritek durchgeführt. Diese nutzt eine Anregungsfrequenz von 2 MHz. Jede Messung benötigt etwa zehn Minuten, was in einer Messgenauigkeit von 0,005 bis 0,01 Gew.-% mündet. Zur Kalibrierung wird ein definiertes Frischwasservolumen genutzt.

# 3.3 Triaxiale Kompressionsversuche

### 3.3.1 Probekörper

Die zylindrischen Probekörper weisen einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 100 mm auf. Die Körper wurden so gebohrt, dass die Schichtung der Proben in einem Winkel von 0°, 30°, 60° oder 90° zu ihrer Grundfläche einfällt. Abbildung 3.8 verdeutlicht die Definition des Fallwinkels  $\beta$ .





Die Bezeichnung der Proben beinhaltet unter anderem die Orientierung der Schichtung. Sie setzt sich aus einem Kürzel "Bo" für das Bergwerk Borth, dem Fallwinkel der

Kürzel	<b>Fallwinkel</b> β [°]
1	0
2	90
3	30
4	60

Tabelle 3.2: Bezeichnung der Proben in Abhängigkeit des Fallwinkels  $\beta$ 

Schichtung und einer laufenden Nummer zusammen. Das Kürzel für das Fallen der Schichtung ist Tabelle 3.2 zu entnehmen. Für den Block 2016 wurden Nummern unter 100, für den Block 2020 Nummern ab 100 für eine Schichtung mit einem Fallwinkel von 0° und 90° bzw. 200 für ein Fallen von 30° und 60° vergeben.

Die gewonnenen Proben werden bis zu ihrer Verwendung in luftdicht verschweißten Plastikbeuteln verwahrt. Abbildung 3.9 zeigt jeweils zwei Proben aus Block 2016 (links) und Block 2020 (rechts), wobei die jeweils linke Probe einen Fallwinkel von  $\beta = 0^{\circ}$  und die rechte Probe  $\beta = 90^{\circ}$  aufweist.



Abbildung 3.9: Gewonnene Proben aus dem Block 2016 (links) und 2020 (rechts)

Vor Versuchsdurchführung werden die Höhe sowie der Durchmesser der Probe an jeweils drei Stellen mithilfe einer Schiebelehre ermittelt. Der Probekörper wird gewogen und über das aus den Abmessungen ermittelte Volumen die Dichte bestimmt. Zur Berechnung wird das arithmetische Mittel aus den gemessenen Werten gebildet.

### 3.3.2 Versuchsaufbau und Instrumentierung

Die triaxialen Kompressionsversuche wurden an der hydraulischen Felspresse Typ D3000/100 der Firma Walter+Bai AG durchgeführt. Die Felspresse erzeugt eine axiale Last von maximal 3 MN und einen maximalen Manteldruck von 80 MPa. Die Zelle der Presse kann eine Probe mit einem Durchmesser von höchstens 50 mm aufnehmen. Die maximal erzeugbare Axialspannung beträgt bei diesem Durchmesser rund 1,5 GPa.

Der Hersteller liefert ein Datenerfassungs- und Regelungssystem vom Typ PCS8000, mit welchem sich Messdaten an einen Computer übermitteln und über die Software DION7 erfassen lassen. Während des Versuchs werden über verschiedene physikalische Kanäle die folgenden Größen gemessen:

- *t*: Versuchszeit in [s]
- Δ*l* Stauchung der Probe als Mittelwert aus drei Wegaufnehmern in [mm]
- s: Vorschub des Stempels in [mm]
- *F*<sub>1</sub>: Kraft des Stempels in [kN]
- *σ*<sub>2,3</sub>: Druckspannung im Ölvolumen in [bar]
- $\Delta V_{oil}$ : Menge des geförderten Ölvolumens in [ccm]
- *T*: Umgebungstemperatur in [°C]

Aus diesen Größen lassen sich mithilfe der bekannten geometrischen Eigenschaften die axiale Dehnung der Probe  $\epsilon_1$ , die axiale Spannung  $\sigma_1$  sowie der anliegende Manteldruck an der Probe in [MPa] ableiten.

$$\epsilon_{1,t} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{3.1}$$

$$\sigma_{1,t} = \frac{F_1}{A_0} = \frac{F_1}{\pi \cdot \frac{d_0^2}{4}}$$
(3.2)

Die nach Gleichung (3.2) und Gleichung (3.1) ermittelten Größen entsprechen der "technischen" Axialspannung und Axialdehnung. Bei Axialverformungen über 2% wird statt der technischen die "natürliche", "wahre" oder auch "logarithmische" Dehnung nach Gleichung (3.3) ermittelt, vgl. [Menzel und Schreiner, 1977; Düsterloh, 2009].

$$\epsilon_{1,n} = \left| \ln \left( \frac{l}{l_0} \right) \right| \tag{3.3}$$

Entsprechend ist auch die Querschnittsfläche zur Berechnung der Axialspannung anzupassen. Sie ergibt sich nach Gleichung (3.4), s. [Düsterloh, 2009].

$$\sigma_{1,n} = \frac{F_1}{A} = \frac{F_1}{\left(\frac{A_0}{1 - \epsilon_{1,n}}\right)} \tag{3.4}$$

Zur Berechnung der Differenzspannung, s. Gleichung (2.11), wurde für  $\sigma_1$  entsprechend die natürliche Axialspannung  $\sigma_{1,n}$  eingesetzt.

Über die Menge des geförderten Ölvolumens in die Zelle bzw. aus der Zelle lassen sich des Weiteren Rückschlüsse auf die Volumendehnung der Probe  $\epsilon_{vol}$  ziehen.

$$\epsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta V_{oil} - \Delta V_{Stempel}}{A_0 \cdot l_0} = \frac{\Delta V_{oil} - A_{Stempel} \cdot s}{A_0 \cdot l_0}$$
(3.5)

Die Menge des geförderten Ölvolumens in der Zelle ist druck- und temperaturabhängig, vgl. [Düsterloh, 2009; Herchen et al., 2018]. Diese Einflüsse wurden über einen angepassten Versuchsablauf mit einer längeren Haltephase zwischen Konsolidierung und Kompression sowie eine Kalibrierung eliminiert. Eine quantitativ vollständig belastbare Volumendehnung der Proben konnte nur für einen geringen Teil des Versuchsprogramms bestimmt werden, da die Überarbeitung und Kalibrierung erst nach Abschluss einer Vielzahl der hier vorgestellten Versuche stattfand.

#### 3.3.3 Versuchsdurchführung

#### Konsolidierung

Der Kompressionsphase geht eine spannungsgeregelte Konsolidierungsphase voran. In dieser Phase werden die Proben über 15 Stunden einer nahezu isostatischen Druckspannung von 40 MPa ausgesetzt. Dieser Spannungszustand entspricht in etwa dem Doppelten des Teufendrucks, welchen das Steinsalz in der Lagerstätte erfahren hat. Mit der Entnahme des Salzblocks aus der Lagerstätte sowie durch die Probengewinnung im Labor ändert sich der Spannungszustand im Salz. Es erfährt eine Entspannung, bei der sich Mikrorisse bilden können. Durch die Konsolidierung sollen diese potentiell entstandenen Risse geschlossen werden, sodass in der eigentlichen Versuchsphase von einem intaktem Probekörper, ähnlich dem unverritztem Zustand im Gebirge, ausgegangen werden kann.

Die Spannungen werden mit einer Geschwindigkeit von 0,01 MPa/s auf die Probe aufgebracht. Dabei liegt der axiale Druck 0,5 MPa über dem Manteldruck, um zu verhindern, dass sich das Öl bzw. der Gummimantel zwischen Stempel und Probe schiebt. Nach Abschluss der 15 Stunden werden Manteldruck und Axialspannung ebenfalls

mit einer Geschwindigkeit von 0,01 MPa/s auf den gewünschten Wert für die Kompressionsphase reduziert.

#### Kompression

Die Kompressionsversuche werden weggesteuert bei konstant gehaltenem Manteldruck gefahren. Die Vorschubgeschwindigkeit des Stempels beträgt 0,001 mm/s, sodass sich eine Dehnungsrate von  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup> einstellt. Dies entspricht einer üblichen Verzerrungsrate für weggeregelte Kompressionsversuche an Steinsalz, vgl. [Düsterloh, 2009; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2021]. Der Versuch endet, sobald eine axiale Verformung der Probe von 20 mm erreicht ist. Das entspricht einer Dehnung von 20 %.



Abbildung 3.10: Versuchsablauf Bo-1-133

Abbildung 3.10 zeigt exemplarisch den gesamten Versuchsablauf für den Versuch Bo-01-133, dessen Kompressionsphase bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 0.5$  MPa gefahren wurde. Dargestellt sind Axialspannung, Manteldruck sowie Differenzspannung über die Zeit. In den ersten rund 17 Versuchsstunden finden der Spannungsaufbau, die Konsolidierungsphase und der Spannungsabbau statt. Etwa eine Stunde beträgt jeweils der Zeitraum, in welchem die Spannungen auf 40 MPa erhöht und nach Abschluss der 15-stündigen Konsolidierungsphase auf den Zielmanteldruck von 0,5 MPa reduziert werden. Gut zu erkennen ist, dass über die gesamte Konsolidierungsphase die technisch bedingte, aber geringe Differenzspannung von 0,5 MPa auf den Probekörper einwirkt. Im Anschluss folgt die Kompressionsphase, die etwa fünf Stunden bis zum Erreichen der maximalen axialen Dehnung von 20 % in Anspruch nimmt.

### 3.3.4 Versuchsprogramm

Insgesamt wurden 62 Kompressionsversuche an Salz aus flacher Lagerung am IGG durchgeführt. Variiert wurden dabei der Fallwinkel sowie der Manteldruck. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die gefahrenen Versuche bei einem Fallen von  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$ . Die Anzahl der Versuche teilt sich genau hälftig auf die Fallwinkel. Eine ausführliche Auflistung aller Versuche findet sich im Anhang B.

Tabelle 3.3: Anzahl der Versuche mit  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$ 

				,				
Manteldruck [MPa]	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	5.0	10.0	20.0
Block 2016	-	8	8	4	2	2	2	2
Block 2020	2	6	6	6	2	-	-	2

Da von Block 2020 weniger Material zur Verfügung stand, konnte eine geringere Anzahl an Proben gewonnen werden und es wurden somit insgesamt weniger Versuche durchgeführt. Der Fokus wurde auf Manteldrücke zwischen 0,5 und 1,5 MPa gelegt. Die Probekörper der Versuche, die mit einem Manteldruck von bis zu 2 MPa gefahren wurden, erreichten innerhalb des Versuchsablaufs den Bruchzustand. Bei höheren Manteldrücken trat kein Bruchversagen auf, die Versuche endeten innerhalb der Verfestigungsphase. Bei Block 2020 wurde daher auf die Versuche bei Manteldrücken von 5 MPa und 10 MPa verzichtet. Ergänzend sollte bei Block 2020 das Spannungs-Verformungs-Verhalten bei einem sehr geringen Manteldruck untersucht werden, sodass je ein Versuch bei 0,1 MPa durchgeführt wurde.

Im Anschluss an diese zunächst nur senkrecht und horizontal zur Schichtung belasteten Probekörper wurden weitere Versuche mit anderen Fallwinkeln durchgeführt.

Zur Begründung der genutzten Fallwinkel, wird an dieser Stelle vorweggenommen, dass für die Festigkeit des Korns ein Reibungswinkel von etwa  $\varphi = 55^{\circ}$  ermittelt wurde, s. Kapitel 4. Unter der Annahme, dass die Korngrenze einen Bereich mit einer

geringeren Festigkeit darstellt, weist diese somit mutmaßlich einen geringeren Reibungswinkel sowie eine geringere Kohäsion als das Korninnere auf, vgl. Abschnitt 2.7.



Abbildung 3.11: Quotient  $\mu$  aus einaxialer Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Fallwinkels  $\beta$  und maximaler einaxialer Druckfestigkeit im Versagensfall für verschiedene Reibungswinkel  $\varphi$ 

Abbildung 3.11 zeigt den Quotienten aus einaxialer Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Fallwinkels  $\beta$  und maximaler einaxialer Druckfestigkeit im Versagensfall für verschiedene Reibungswinkel  $\varphi$ . Dieser Zusammenhang ist auch auf triaxiale Versuche übertragbar. Die Reduktion der Festigkeit findet unabhängig von der Höhe des Manteldrucks bei den gleichen Fallwinkeln statt. Das Verhältnis  $\sigma_B(\beta)/\sigma_B(0^\circ)$  ändert sich geringfügig.

Ist der Reibungswinkel der Korngrenze  $\varphi_{KG}$  also um 10°, 20° oder sogar 30° kleiner als der Reibungswinkel des Korns  $\varphi_K$ , so müsste sich bei einem Fallwinkel von  $\beta = 60^{\circ}$ in jedem Fall eine deutliche Reduktion der Festigkeit im Druckversuch zeigen, vgl. Abbildung 3.11. Bei einem Fallwinkel von  $\beta = 30^{\circ}$  zeigt sich hingegen in allen Fällen keine geringere Bruchfestigkeit. Die weiteren Versuche werden daher mit einem Fallen von  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$  durchgeführt. Dabei wird erwartet, dass bei Bestätigung der in Abschnitt 2.7 genannten These eine geringere Bruchfestigkeit bei  $\beta = 60^{\circ}$  erreicht wird.

Versuche mit  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$  erfolgten nur an Probekörpern des Blocks 2020. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über diese Versuche. Die Anzahl der Versuche teilt sich genau hälftig auf die Fallwinkel.

belle 3.	4: Anzahl der Versuche	e mit	B = 3	$0^{\circ}$ un	dβ=
	Manteldruck [MPa]	0.5	1.5	2.0	
	Block 2020	4	4	2	

200  $\beta = 60^{\circ}$ Tał

### 3.3.5 Datenanalyse

Die Auswertung der triaxialen Kompressionsversuche läuft automatisiert über ein Skript in der Programmiersprache Python. Das Skript wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt. Genutzt wurde dazu die Open Source-Distribution Anaconda, welche die Entwicklungsumgebung Spyder enthält.

Die Daten der Felspresse werden im ACSII-Format gespeichert und müssen in eine Textdatei umgewandelt werden. Diese wird anschließend über die Entwicklungsumgebung Spyder eingeladen. Hier folgt die weitere Auswertung der Ergebnisse durch die Berechnung aller gewünschten Größen in den jeweiligen Phasen, Konsolidierung und Kompression. Sämtliche Daten werden über den Datentyp "dictionary" abgespeichert und sind somit wieder aufrufbar. Einige Daten werden zusätzlich in CSV-Dateien ausgegeben, um sie anderen Programmen mit grafischer Interaktionsfläche wie beispielsweise Microsoft Excel nutzbar zu machen.

Des Weiteren erfolgt die Ausgabe von grafischen Darstellungen der Messergebnisse über Diagramme. Die Erstellung sowie das Abspeichern der Plots im gewünschten Zielordner ist ebenfalls im Skript implementiert.

Auch die Microsoft Excel-Dateien der BGR wurden in das Python-Skript implementiert, die Daten dort weiter bearbeitet und grafisch aufbereitet.

# 4 Ergebnisse und Auswertung

### 4.1 Charakterisierung des untersuchten Gesteins

#### 4.1.1 Vorbemerkungen

Zur Auswertung werden unter anderem das arithmetische Mittel, s. Gleichung (4.1) sowie der Median, s. Gleichung (4.2) angewendet. Mittelwerte sind im Text und in Abbildungen mit durchgehender Linie über den Schriftzeichen gekennzeichnet.

$$\overline{x}_{arithm} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$
(4.1)

$$\overline{x}_{median} = \begin{cases} x_{m+1} & \text{mit } n = 2m+1 \text{ als ungerade Zahl} \\ \frac{1}{2} (x_m + x_{m+1}) & \text{mit } n = 2m \text{ als gerade Zahl} \end{cases}$$
(4.2)

#### 4.1.2 Makroskopische Gesteinsuntersuchung

Folgend werden die Ergebnisse für beide Blöcke dargestellt. Dazu erfolgt zunächst die statistische Auswertung der Messwerte der untersuchten Ebenen. Dies betrifft die Korngröße *d*, das Achsenverhältnis *AR* sowie die Orientierung der langen Achse. Anschließend wird die räumliche Orientierung des Gefüges analysiert. Die Fotos der Schnittflächen sind im Anhang A zu finden.

Bei der Korngrößenverteilung handelt es sich um eine asymmetrische Verteilung. Die Größe der Körner ist nach unten begrenzt. Sie sind erst ab einer bestimmten Mindestgröße detektierbar, können aber vereinzelt sehr groß werden. Diese Randbedingung kann das arithmetische Mittel beeinflussen, sodass zusätzlich der Median bestimmt wird. Dieser ist weniger anfällig für stark abweichende Messwerte.

Tabelle 4.1 enthält die Ergebnisse der Scheibe des Blocks 2016. Die Korngrenzen etwas größerer Körner wurden besser erkannt, als das Bild in Schwarzweiß konvertiert wurde. Bei kleineren Körnern war hingegen das Farbfoto günstiger. Beide Ergebnisse

Probe	Ebene	d <sub>min</sub> [mm]	d <sub>max</sub> [mm]	$\overline{d}_{arithm}$ [mm]	$\overline{d}_{median}$ [mm]	$\overline{AR}_{arithm}$ [-]	AR <sub>median</sub> [-]	N [-]
Bo-2016 bunt	xz	0,3	8,4	2,0±1,1	1,7	1,9±0,8	1,7	445
Bo-2016 SW	xz	0,5	11,3	2,5±1,3	2,2	2,0±0,8	1,9	370

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößen und Achsenverhältnisse des Blocks 2016

sollen getrennt betrachtet werden, da nicht auszuschließen ist, dass Körner sowohl im farbigen als auch im Schwarzweiß-Bild ausgewertet wurden.

Bei der ausgewerteten Fläche handelt es sich um eine Ebene, die senkrecht zur lateralen Ausdehnung des Gesteins steht. Sie wird hier als *xz*-Ebene definiert. Die Tabelle enthält jeweils den kleinsten und größten gemessenen Durchmesser ( $d_{min}$  und  $d_{max}$ ) sowie die Mittelwerte. Das in den Tabellen angegebene Achsenverhältnis *AR* beschreibt das Verhältnis von langer zu kurzer Achse. Die Orientierung der langen Achse hat dabei keinen Einfluss. Sie kann im sogenannten Rosendiagramm ausgegeben werden. Dieses gibt die Häufigkeit der gemessenen Winkel  $\varphi$  als Drehung der langen Achse des Korns zu einer definierten Bezugsachse an, vgl. Abbildung 3.7. *N* gibt die Anzahl der ausgewerteten Körner an.

Abbildung 4.1 zeigt die entsprechenden Boxplots für die gemessenen Korngrößen und die daraus ermittelten Achsenverhältnisse. Der Boxplot enthält neben arithmetischem Mittel und Median jeweils den Bereich des zweiten und dritten Quantils (Box) sowie den Messbereich, in dem 95% der beobachteten Werte liegen (Antennen). Die Zahl oberhalb des Boxplots entspricht der Anzahl der ausgewerteten Körner.

Es zeigt sich, dass der Median der Korngröße und des Achsenverhältnisses etwas geringer ausfällt als das arithmetische Mittel, was die Annahme der Beeinflussung durch stark abweichende Werte nach oben bestätigt. Die Differenz zwischen Median und Mittelwert ist jedoch relativ gering, sodass insgesamt von einer recht homogenen Korngrößenverteilung ausgegangen werden kann. Dies belegt den optischen Eindruck der Scheibe sowie der Proben des Blocks 2016. Es zeigt sich ein Median der Korngröße von 1,7 bis 2,2 mm. Hier liegt somit feinkristallines Steinsalz vor. Das Achsenverhältnis von 1,7 bis 1,9 zeigt an, dass die Körner in eine Richtung gestaucht sind.

Abbildung 4.3 zeigt das Rosendiagramm zur Auswertung des farbigen Fotos. Die 0°-180°-Linie gibt die Bezugsachse an und entspricht in der xy-Ebene der x-Achse, in der yz-Ebene der y-Achse und hier bei der xz-Ebene der x-Achse. Die ermittelten

### 4 Ergebnisse und Auswertung



Abbildung 4.1: Boxplots der gemessenen Korngrößen und der ermittelten Achsenverhältnisse an der Scheibe des Blocks 2016



Abbildung 4.2: Boxplots der gemessenen Korngrößen und der ermittelten Achsenverhältnisse am Quader des Blocks 2016



Abbildung 4.3: Rosendiagramm der Scheibe in xz-Ebene des Blocks 2016

Winkel zwischen Bezugsachse und langer Achse des Korns  $\varphi$  werden in Segmente á 10° eingruppiert. Über die Anzahl der Messwerte in den einzelnen Segmenten wird deren Häufigkeit ermittelt, welche über die Länge der Strahlen wiedergegeben wird.

Das Rosendiagramm ergibt eine Stauchung der Körner in Richtung der *z*-Achse. Da die anderen Ebenen nicht ausgewertet wurden, lässt sich die räumliche Orientierung des Gefüges nicht bestimmen.

-	Ebene	d <sub>min</sub> [mm]	d <sub>max</sub> [mm]	$\overline{d}_{arithm}$ [mm]	$\overline{d}_{median}$ [mm]	$\overline{AR}_{arithm}$ [-]	AR <sub>median</sub> [-]	N [-]
	xy	1,0	6,6	2,7±1,0	2,5	1,5±0,4	1,4	202
	xz	0,6	7,6	2,7±1,1	2,5	$1,6{\pm}0,5$	1,5	243
	yz	1,0	8,7	2,8±1,0	2,7	$1,5{\pm}0,4$	1,4	215

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößen und Achsenverhältnisse an einem Quader des Blocks 2016

Tabelle 4.2 gibt die Ergebnisse der Schnittflächen des Quaders wieder. Der Median der Korngröße ist mit 2,5 bis 2,7 mm in allen Ebenen als sehr isometrisch einzuschätzen. Die mittlere Korngröße ist somit etwas größer als bei der Scheibe. Das Achsenverhältnis beträgt 1,4 bis 1,5. Es zeigt sich, dass in allen drei Richtungen eine Längung der Körner vorhanden ist, die im Vergleich zur Scheibe geringer ausfällt. Abbildung 4.2 enthält die zugehörigen Boxplots. Diese veranschaulichen das bereits erläuterte Ergebnis sowie den Einfluss der großen Körner auf das arithmetische Mittel.

Abbildung 4.4 zeigt die Rosendiagramme der drei Ebenen des Quaders. Hier kann nun ein Unterschied zwischen den Ebenen identifiziert werden. In *xz*- und *yz*-Ebene ist eine Vorzugsrichtung der langen Achse in Richtung der lateralen Ausdehnung, also in *x*- bzw. *y*-Richtung, zu erkennen. In der *xy*-Ebene streuen die Ausrichtungen



Abbildung 4.4: Rosendiagramme des Quaders des Blocks 2016

der Körner stark. Hier liegt demnach keine Vorzugsrichtung vor. Dies lässt auf ein oblates Korngefüge schließen. Da jedoch in der *xy*-Ebene ebenfalls eine Längung der Körner ermittelt wurde, handelt es sich möglicherweise um kein rein oblates, sondern ein gemischt oblates/prolates Gefüge. Die Auswertung mit *Ellipsoid* bestätigt diese Einschätzung. Die Ergebnisse sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Anzahl der Körner	Faktor der Ellipsenform	Grad der Anisotropie	Index der Inkompatibilität
N [-]	T [-]	P' [-]	$\sqrt{(\widetilde{F})}$ [%]
164	-0,07	1,27	18,7
164	0,43	1,25	18,8
163	-0,22	1,19	19,3
164	0,22	1,19	20,9
	Anzahl der Körner N [-] 164 164 163 164	Anzahl de Körner         Faktor der Ellipsenform           N [-]         T [-]           164         -0,07           164         0,433           163         -0,22           164         0,22	Anzahl der Körner         Faktor der Ellipsenform         Grad der Anisotropie           N [-]         T [-]         P' [-]           164         -0,07         1,27           164         0,43         1,25           163         -0,22         1,19           164         0,22         1,19

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Auswertung mit dem Programm *Ellipsoid* am Quader des Blocks 2016

Da das Programm in der Anzahl der Messwerte limitiert ist, wurden die Ergebnisse in vier Teile gesplittet. Der Faktor der Ellipsenform T liegt zweimal zwischen -1 und 0 und zweimal zwischen 0 und 1. Es handelt sich demnach um ein gemischt prolat/oblates Gefüge mit der Tendenz zu einem oblaten Gefüge. Der Grad der Anisotropie beträgt zwischen 19 und 27%.

An Block 2020 wurde die Korngrößenbestimmung jeweils für den mittel- bis grobkristallinen sowie für den feinkristallinen Bereich vorgenommen.

### 4 Ergebnisse und Auswertung



Abbildung 4.5: Boxplots der gemessenen Korngrößen im mittel- bis grobkristallinen Bereich aus Block 2020



Abbildung 4.6: Boxplots der ermittelten Achsenverhältnisse im mittel- bis grobkristallinen Bereich aus Block 2020

Probe	Ebene	d <sub>min</sub> [mm]	d <sub>max</sub> [mm]	$\overline{d}_{arithm}$ [mm]	$\overline{d}_{median}$ [mm]	$\overline{AR}_{arithm}$ [-]	AR <sub>median</sub> [-]	N [-]
Ro 2020	xy	2,8	33,8	9,5±6,4	7,0	1,4±0,4	1,3	34
D0-2020	xz	1,1	25,4	6,5±4,3	5,4	2,0±0,8	1,9	55
X_0	yz	0,9	25,4	5,2±4,0	4,1	$1,\!6{\pm}0,\!5$	1,5	53
Bo 2020	xy	1,8	45,4	9,6±8,6	7,5	1,5±0,3	1,4	23
D0-2020	xz	0,8	28,5	5,6±5,2	3,8	$1,7{\pm}0,5$	1,6	57
x_17.5	yz	1,0	34,4	4,5±3,9	3,7	1,9±0,6	1,9	54
Bo 2020	xy	1,6	20,1	7,8±4,3	6,8	1,5±0,7	1,4	39
DO-2020	xz	0,9	20,0	4,1±3,1	3,4	$1,8{\pm}0,7$	1,7	68
x_2/	yz	1,2	27,0	5,4±4,5	4,0	1,9±0,6	1,7	57

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößen und Achsenverhältnisse im mittel- bis grobkristallinen Bereich des Blocks 2020

Tabelle 4.4 enthält zunächst die Ergebnisse für den mittel- bis grobkristallinen Bereich. Ihr kann entnommen werden, dass in der xy-Ebene die mittlere Korngröße am größten ist (Median: 6,8 bis 7,5 mm). Das Achsenverhältnis ist in dieser Ebene hingegen am kleinsten (1,3 bis 1,4). Der Vergleich zwischen der mittleren und der maximal gemessenen Korngröße zeigt, wie heterogen die Verteilung ist. Für die beiden Homogenbereiche zeigen Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 jeweils die entsprechenden Boxplots. Hier lässt sich die Heterogenität der Korngrößen des Blocks anhand der Abweichung des Medians vom Mittelwert anschaulich erfassen. Der Median fällt teilweise deutlich geringer als das arithmetische Mittel aus. Die Korngröße variiert zudem in xy-Richtung sehr stark. Der Bereich des zweiten und dritten Quantils ist bei allen Proben in dieser Ebene am größten. Das Achsenverhältnis ist in dieser Ebene hingegen gleichförmiger. Die mittleren Korngrößen in der xz- sowie in der yz-Ebene liegen im Vergleich zur xy-Ebene näher beieinander (3,4 bis 5,4 mm). Das Achsenverhältnis beträgt 1,5 bis 1,9.

Die Rosendiagramme (Abbildung 4.7 bis Abbildung 4.9) zeigen die Orientierungen der Körner. Hier zeigt sich in der *xz*- und der *yz*-Ebene jeweils eine Vorzugsrichtung in *x*- bzw. in *y*-Richtung. In der *xy*-Ebene streut die Orientierung, es lässt sich keine eindeutige Vorzugsrichtung erkennen. Die Ergebnisse deuten auf eine räumliche Orientierung des Gefüges in Form einer Foliation (oblates Gefüge) hin. Das bestätigen die Ergebnisse aus der Auswertung mit dem Programm *Ellipsoid* (s. Tabelle 4.5). *T* liegt für alle drei Proben zwischen 0 und 1. Der Faktor der Anisotropie liegt zwischen 34 und 54 % und ist somit höher als am Quader des Blocks 2016.



Abbildung 4.7: Rosendiagramme des Würfels Bo-2020 x\_8



Abbildung 4.8: Rosendiagramme des Würfels Bo-2020 x\_17.5



Abbildung 4.9: Rosendiagramme des Würfels Bo-2020 x\_27
Probe	Anzahl der Körner	Faktor der Ellipsenform	Grad der Anisotropie	Index der Inkompatibilität
	N [-]	T [-]	P' [-]	$\sqrt{(\widetilde{F})}$ [%]
x_8	142	0,36	1,34	20,7
x_17.5	134	0,24	1,40	19,8
x_27	164	0,85	1,54	17,4
fein	127	0,15	1,70	24,2

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Auswertung mit dem Programm *Ellipsoid* an Proben des Blocks 2020

Tabelle 4.6 fasst die Ergebnisse des feinkristallinen Bereichs zusammen. Es können vergleichbare Beobachtungen gemacht werden. Die mittlere Korngröße ist in der *xy*-Ebene am größten und das Achsenverhältnis dort am geringsten. Das Achsenverhältnis ist dabei in allen Ebenen etwas größer als im mittel- bis grobkristallinen Bereich.

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Bestimmung der Korngrößen und Achsenverhältnisse im feinkristallinen Bereich des Blocks 2020

Probe	Ebene	d <sub>min</sub> [mm]	d <sub>max</sub> [mm]	$\overline{d}_{arithm}$ [mm]	$\overline{d}_{median}$ [mm]	AR <sub>arithm</sub> [-]	AR <sub>median</sub> [-]	N [-]
B- 2020	xy	0,9	8,2	4,6±2,0	4,4	1,6±0,6	1,4	16
D0-2020	xz	0,8	10,0	3,5±1,7	3,4	2,0±0,7	1,9	59
lem	yz	0,6	23,6	3,4±2,9	2,6	$2,1{\pm}0,7$	2,0	52

Median und arithmetisches Mittel der Korngröße stimmen hier ähnlich wie bei Block 2016 insgesamt besser überein. Abbildung 4.10 zeigt die Boxplots für Korngröße und Achsenverhältnis für den feinkörnigen Bereich des Blocks 2020.

Die Rosendiagramme zeigen auch hier eine schichtparallele Orientierung der langen Achse. In der *xy*-Ebene liegt keine bevorzugte Richtung der langen Achse vor, s. Abbildung 4.11. *T* liegt hier bei 0,15, sodass es sich ebenfalls um ein überwiegend oblates Gefüge handelt. Der Grad der Anisotropie ist mit 70 % höher als im mittel- bis grobkristallinen Bereich (s. Tabelle 4.5).

Insgesamt kann somit für Block 2016 auf ein gemischt oblates/prolates Gefüge geschlossen werden. Bei Block 2020 zeigt sich ein überwiegend oblates Gefüge. Der Grad der Anisotropie ist bei Block 2020 höher.



Abbildung 4.10: Boxplots der gemessenen Korngrößen und der ermittelten Achsenverhältnisse des feinkristallinen Bereichs aus Block 2020



Abbildung 4.11: Rosendiagramme des Würfels Bo-2020 fein

# 4.1.3 Ergebnisse der Mikrocomputertomographie-Untersuchungen

Abbildung 4.12 zeigt µCT-Aufnahmen der Querschnitte von zwei Proben vor der Versuchsdurchführung. Bei den Versuchen handelte es sich um Extensionsversuche, die im Rahmen einer Masterarbeit am IGG an mehreren Proben des Blocks 2016 durchgeführt wurden, s. [Schrank, 2019]. Extensionsversuche sind nicht Bestandteil der vor-

liegenden Arbeit. Die Aufnahmen dienen hier nur als zusätzliche Information zur Gesteinscharakterisierung des Blocks 2016.

Sehr dunkle, annähernd schwarze Bereiche kennzeichnen ein Material mit geringer optischer Dichte, wie Luft, Porenraum oder Risse. Je heller der Grauwert wird, desto höher ist die optische Dichte des Materials. Mittlere Grauwerte sind somit als Halit zu interpretieren, helle Grauwerte können mit dichteren Mineralen, wie z.B. Ton, erklärt werden, vgl. [Mintzlaff et al., 2019].



Abbildung 4.12: µCT-Aufnahmen der Querschnitte von zwei Proben (links: Bo-2-37, rechts: Bo-1-41) aus Block 2016 vor dem Versuch (Triaxiale Extension)

Ein Merkmal der Probe Bo-2-37 (Abbildung 4.12, links) sind die hellen Grauwerte, die eine Art senkrechtes Band durch die Probe ergeben. Dabei handelt es sich um leichte Beimengungen mit einem dichteren Mineral. In Bezug auf die Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Polyhalit ( $\rho \approx 2,76 \text{ g/cm}^3$ ) handelt. Das Band war auch makroskopisch in der Probe erkennbar. Insgesamt konnten solche sichtbaren Beimengungen oder Nebenbestandteile nur in diesem Prüfkörper festgestellt werden. Es soll zusätzlich erwähnt werden, dass die Probe innerhalb der Extensionsphase nicht durch ein stark abweichendes Verhalten im Vergleich zu den gleich gerichteten und äquivalent belasteten Proben auffiel.

Auch die Probe Bo-1-41 (Abbildung 4.12, rechts) zeigt diese hellen Grauwerte. Hier zeigen sich die Beimengungen, vermutlich Polyhalit, dispers verteilt. Ein Einfluss dispers verteilter Beimengungen auf das Spannungs-Verformungs-Verhalten und eine damit verbundene Anisotropie ist nicht zu erwarten.

### 4.1.4 Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie

Die BGR stellte von zwei ausgewählten Dünnschliffen Fotoaufnahmen von mikroskopierten Bereichen, deren Beschreibung sowie weitere Informationen, die aus der

Dünnschliffmikroskopie resultieren, zur Verfügung. Die Aufnahmen können als repräsentativ für die jeweiligen Blöcke angesehen werden.

Aufgrund des Fluidgehalts im untersuchten Gestein kam es vermehrt zu Ablösungen bei der Erstellung der Dünnschliffe. Beim Polieren der Probe bis auf die gewünschte Dicke wird punktuell mehr Material abgetragen als gewünscht. Diese Fehlstellen des Mehrabtrags werden beim Aufbringen des zweiten Objektträgers mit dem Klebemittel gefüllt und sind unter dem Mikroskop als dunkle Stellen sichtbar. Sie mindern die Qualität der Dünnschliffe und erschweren ihre Auswertung. Des Weiteren kann es in diesen Bereichen zu Ablösungen kommen, bei denen der Bereich zwischen dem Gestein und dem Objektträger bzw. Deckglas nicht mit dem Kunstharz verfüllt ist. Diese Ablösungen können ebenfalls als dunkle Flecken oder Streifen sichtbar sein. Sie sind in allen hergestellten und somit auch in den hier präsentierten Dünnschliffen vorhanden.

Für die Untersuchung des Steinsalzes aus Block 2016 wurde aus einer nicht belasteten Zylinderprobe Material für einen Dünnschliff gewonnen. Abbildung 4.13 gibt eine Übersicht des mikroskopierten Dünnschliffs.

Als Nebenphase kann Polyhalit bestimmt werden. Polyhalit befindet sich dispers verteilt in den Halitkristallen, vgl. Abbildung 4.13 (a) und (b), sowie an den Korngrenzen. Die Kristalle sind nadelig-hypidiomorph *(hypidiomorph: Kristall weist nur begrenzt seine Eigengestalt auf)* ausgebildet und haben eine Größe von maximal 1 mm, s. Abbildung 4.13 (c).

Des Weiteren konnten im Dünnschliff Spuren von Hämatit identifiziert werden (Größe $<10\,\mu m$ , s. Abbildung 4.13 (d)). Dieser ist oftmals mit Polyhalit assoziiert.

Abbildung 4.13 (e) zeigt eine Korngrenze mit Fluideinschlüssen. Diese sind wie hier im Bild an den Korngrenzen überwiegend sphärisch ausgebildet. Intrakristalline Fluideinschlüsse sind im Wesentlichen kubischer Form und ihre Füllung ist teilweise mehrphasig (Lösung und Gas). Intrakristalline Fluideinschlussbahnen zeigen eine unterschiedliche Orientierung.

Stark mit Polyhalit und Fluideinschlüssen verunreinigte Halite können in unmittelbarer Nachbarschaft zu reinen Haliten vorkommen, s. Abbildung 4.13 (f).

Insgesamt erweist es sich als schwierig, im Dünnschliff Korngrenzen zu identifizieren. Sofern sie zu erkennen sind, weisen sie meist einen geraden und nur lokal leicht gebogenen Verlauf auf. Eine Kornformorientierung, wie sie makroskopisch ausgebildet ist, kann in dem untersuchten Dünnschliff nicht eindeutig nachvollzogen werden.

Abbildung 4.14 zeigt die Aufnahmen eines mikroskopierten Dünnschliffs aus Block 2020. Der Dünnschliff wurde aus einer der kleineren Würfelproben, die aus dem feinkristallinen Bereich stammen, hergestellt. Unter Einsatz der Polarisatoren



Abbildung 4.13: Übersicht Block 2016, *xz*-Ebene. (a) Halit mit zahlreichen Fluideinschlüssen und Polyhalit. b) Gleicher Ausschnitt wie in (a) + Polarisatoren. (c) Polyhalitkristall in Halitmatrix. (d) Hämatit (Bildzentrum) in Halit. (e) Sphärische Fluideinschlüsse an Halitkorngrenze sowie intrakristalline Fluidbahn mit welligem Verlauf. (f) Übergang zwischen einem verunreinigten (rechts) sowie reinen Halitkristall (links).



Abbildung 4.14: Übersicht Block 2020, xz-Ebene. (a) Halitkristall mit zahlreichen Fluideinschlüssen und dispers verteiltem Anhydrit. Benachbarte Halite mit weniger Einschlüssen. (b) Gleicher Ausschnitt wie in (a) + Polarisatoren. (c) Korngrenzen in Halit mit überwiegend geradem Verlauf, dekoriert mit Fluideinschlüssen und vereinzelt kleinen Anhydritkristallen. (d) Detail aus (c). Sphärisch-kanalartige Fluideinschlüsse in Halit, durchzogen von sekundärer Fluideinschlussbahn. (f) Würfelförmige, z.T. mehrphasige intrakristalline Fluideinschlüsse.

lässt sich als Nebenkomponente Anhydrit identifizieren, s. Abbildung 4.14 (a) und (b). Er ist sowohl an den Korngrenzen als auch dispers verteilt in den Haliten selbst vorhanden. Seine Größe beträgt maximal 0,8 mm bei einer nadelig-hypidiomorphen Form. Insgesamt war Anhydrit besonders im feinkristallinen Bereich zu beobachten. Die sehr großen Halitkörner zeigen hingegen eine hohe Reinheit ohne Einschluss von Fremdphasen. Abgesehen von großen, reinen Haliten ist feinkörniger Anhydrit dispers verteilt. Lokal sind Verwachsungen bzw. Anhydritaggregate zu beobachten.

Die Korngrenzen sind meist gerade ausgebildet und zeigen nur lokal eine gebogene bis leicht wellige Form, wie in Abbildung 4.14 (c) zu erkennen.

Abbildung 4.14 (d) zeigt ein Detail aus (c), in welchem Fluideinschlüsse erkennbar sind. Sie sind hier als Fluidfilme bzw. als kanalartige Strukturen ausgebildet. An Korngrenzen treten sie andernfalls überwiegend sphärisch auf. Die braune Eigenfarbe könnte auf Kohlenwasserstoffe hindeuten, was jedoch mit einer geeigneten Methode (z.B. Fluoreszenzmikroskopie) bestätigt werden müsste.

Fluideinschlüsse treten auch intrakristallin auf. Abbildung 4.14 (e) zeigt diese in Chevronform, welche auf ein primäres Gefüge, also auf die ursprüngliche Form nach der Auskristallisation, hindeuten. Diese Einschlüsse werden durch eine sekundäre, d.h. nachträglich entstandene, Fluideinschlussbahn durchzogen (Bildzentrum). Fluideinschlussbahnen treten insgesamt unterschiedlich orientiert auf. Intrakristalline Fluideinschlüsse sind häufig in kubischer Form ausgeprägt und weisen eine mehrphasige Füllung aus Lösung und Gas auf, s. Abbildung 4.14 (f). Generell sind die intrakristallinen Fluideinschlüsse in Block 2020 größer als in Block 2016.

### 4.1.5 Bestimmung des Bromidgehalts

Der Bromidgehalt wurde mittels mXRF an je fünf Proben des Blocks 2016 und des Blocks 2020 zur Untersuchung des Eindunstungsstadiums ermittelt. Dabei zeigt sich ein sehr eindeutiges Bild, was zur stratigraphischen Einordnung der beiden Blöcke passt. Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse.

In Orange sind die Werte des Blocks 2016, in Pink die des Blocks 2020 dargestellt. Der relative Fehler wird jeweils über die Antennen dargestellt. Im Mittel beträgt der Bromidgehalt bei Block 2016 etwa 207  $\mu$ g/g und 98  $\mu$ g/g bei Block 2020. Diese Gehalte bestätigen die Informationen seitens K+S sowie die bisherigen visuellen und mineralogischen Beobachtungen, dass die Gesteine in unterschiedlichen Eindunstungsstadien entstanden sind. Hohe Bromidgehalte passen gut zu einer Polyhalitführung, niedrigere Werte gehen häufig mit Anhydrit einher, vgl. [Braitsch, 1971]. In Bezug auf ein anisotropes mechanisches Verhalten wurde der Bromidgehalt nicht weiter betrachtet.



Abbildung 4.15: Ergebnisse der mXRF-Analyse

# 4.1.6 Bestimmung des Fluidgehalts

Die Messungen an den zylinderförmigen Proben konnten ohne weitere Präparation erfolgen. An den würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von ca. 10 cm mussten hingegen die Kanten abgesägt werden, damit die Proben von dem Probenhalter aufgenommen werden konnten. Von den kleineren Würfeln mit einer Kantenlänge von ca. 5 cm hingegen wurden zwei Würfel gestapelt und gleichzeitig gemessen, um das Probenvolumen der Messapparatur bestmöglich auszunutzen und damit eine höhere Messgenauigkeit zu erreichen.

Die Untersuchungen mittels NMR-Relaxometrie ergaben Fluidgehalte in vergleichbaren Größenordnungen für beide Blöcke. Abbildung 4.16 enthält die bestimmten Fluidgehalte. Der relative Fehler wird auch hier über die Antennen dargestellt.

Die Fluidgehalte liegen insgesamt zwischen 0,04 und 0,12 Gew.-%. Das arithmetische Mittel beträgt bei Block 2016 0,09 Gew.-% und 0,08 Gew.-% bei Block 2020. Dies ist im Vergleich zu anderen Messungen in flach gelagerten Salzen gering. In Teutschenthal wurden beispielsweise 1 bis 2 Gew.-% ermittelt, s. [Küster, 2011]. [Mertineit et al.,



Abbildung 4.16: Ergebnisse der NMR-Relaxometrie

2023] weisen darauf hin, dass Unterschiede auch auf verschiedene Methoden zur Bestimmung des Wassergehalts und die vorangegangene Probenpräparation zurückzuführen sind. Des Weiteren ist ein Vergleich unterschiedlicher stratigrafischer Einheiten zu hinterfragen.

Aufgrund des geringen Fluidgehalts in beiden Blöcken ist nicht von einem signifikanten Einfluss der Fluide auf das mechanische Verhalten im Kompressionsversuch auszugehen. Eine Relevanz für ein anisotropes Verhalten wurde somit nicht weiter betrachtet.

# 4.1.7 Zusammenfassung

Die analysierten Gesteinsmerkmale fasst Tabelle 4.7 für beide Blöcke zusammen.

Neben dem augenscheinlichen Unterschied der Farbgebung können weitere Differenzen, aber auch Gemeinsamkeiten festgestellt werden. Zunächst werden die Merkmale der Struktur (Korngrößenverteilung, Korngröße, Achsenverhältnis und Ausrichtung

der Körner in der untersuchten Ebene) aufgelistet. Sofern die Ebenen an mehreren Proben untersucht wurden, wird eine Bandbreite der ermittelten Werte wiedergegeben. Der Korndurchmesser  $\overline{d}_{median}$  des Blocks 2020 in *xy*-Ebene ist somit beispielsweise die Bandbreite der in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.6 enthaltenen Mediane in der *xy*-Ebene.

Insgesamt zeigt sich Block 2016 homogener in seiner Korngrößenverteilung. Des Weiteren weist er geringere Korngrößen als Block 2020 auf. Block 2016 ist rein feinkristallin, während bei Block 2020 alle Bereiche (fein,- mittel- und grobkristallin) vorliegen. Das Achsenverhältnis ist in *xy*- und *xz*-Ebene ähnlich, in *yz*-Ebene zeigt Block 2020 eine stärkere Elongation auf. Die Elongation ist bei beiden Blöcken in Richtung der lateralen Ausdehnung (in Richtung der *xy*-Ebene) orientiert.

Räumlich betrachtet zeigt sich bei Block 2016 ein gemischt prolates/oblates Gefüge, während bei Block 2020 ein überwiegend oblates Gefüge ermittelt wurde, das zudem eine straffere Foliation als Block 2016 aufweist. Für beide Blöcke kann somit eine räumliche Orientierung in Richtung der Schichtung respektive der lateralen Ausdehnung des Gesteins festgestellt werden.

Als Hauptnebenphase ist in Block 2016 Polyhalit enthalten, während in Block 2020 Anhydrit vorzufinden ist. Beide Minerale sind auf den Korngrenzen und innerhalb der Halitkristalle zu finden.

Beide Blöcke weisen Fluideinschlüsse in Würfel- und Blasenform auf. Sie treten an Korngrenzen und im Korninneren auf. Fluideinschlussbahnen sind in Haliten beider Blöcke vorhanden, weisen jedoch keine gerichtete Orientierung auf.

Der Fluidgehalt beträgt zwischen 0,04 und 0,12 % und ist damit gering. Es ist nicht von einem Einfluss auf das Kurzeitfestigkeitsverhalten auszugehen.

Insgesamt erfolgte die Untersuchung der Blöcke mit einer unterschiedlichen Anzahl an Proben. So ist an Block 2016 nur eine Probe in allen drei Raumebenen untersucht worden, während es bei Block 2020 insgesamt vier waren. Die *xz*-Ebene des Blocks 2016 wurde an zwei Proben untersucht, wobei die Ergebnisse Unterschiede in der Ausprägung der Elongation zeigen.

Die Ergebnisse des Blocks 2020 geben ein gutes Bild der untersuchten Bereiche wieder. Die feinkristallinen Bereiche zeigen eine straffere Foliation als die mittel- bis grobkristllinen Bereiche. Rein optisch zeigen sich im grobkristallinen Bereich auch eindeutig richtungslose Bereiche. Dies ist auf die Diagenese zurückzuführen. Die Verformung der Halitkristalle scheint sich auf den feinkristallinen Bereichen zu konzentrieren. Größere Kristalle entziehen sich der Verformung bzw. werden im Kontakt zu feinkristallinen Bereichen eher passiv deformiert, vgl. [Küster, 2011; Barabasch et al., 2023].

	Block 2016	Block 2020			
stratigraphische	Unteres	Unteres			
Bezeichnung	Werra-Salz	Werra-Salz			
Farbgebung	orange/rot	grau/weiß			
Korngrößen-	gleichkörnig	ungleichkörnig			
verteilung	(homogen)	(heterogen)			
Korngröße, Achsenve	rhältnis, Ausrichtung der Körn	er in <i>xy</i> -Ebene			
$-\overline{d}_{median}$ [mm]	2,5	4,4 - 7,5			
- <i>d<sub>max</sub></i> [mm]	6,6	8,2 - 45,4			
- AR <sub>median</sub> [-]	1,4	1,3 - 1,4			
- Elongation	nicht gerichtet	nicht gerichtet			
Korngröße, Achsenve	rhältnis, Ausrichtung der Körn	er in <i>xz</i> -Ebene			
- $\overline{d}_{median}$ [mm]	1,7 - 2,5	3,4 - 5,4			
- <i>d<sub>max</sub></i> [mm]	6,6 - 11,3	10,0 - 28,5			
- AR <sub>median</sub> [-]	1,5 - 1,9	1,6 - 1,9			
- Elongation	in x-Richtung	in <i>x</i> -Richtung			
Korngröße, Achsenve	Korngröße, Achsenverhältnis, Ausrichtung der Körner in <i>yz</i> -Ebene				
- $\overline{d}_{median}$ [mm]	2,7	3,4 - 5,4			
- <i>d<sub>max</sub></i> [mm]	8,7	23,6 - 34,3			
- AR <sub>median</sub> [-]	1,4	1,6 - 2,0			
- Elongation	in y-Richtung	in <i>y</i> -Richtung			
räumliche Orientieru	ng des Gefüges				
- T [-]	-0,22 - 0,43	0,15 - 0,85			
- P' [-]	1,19 - 1,27	1,34 - 1,70			
- Interpretation	Lineation und Foliation:	straffe Foliation:			
	gemischt prolates/oblates	überwiegend oblates Gefüge			
	Gefüge mit Orientierung	mit Orientierung    zur			
	zur <i>xy</i> -Ebene	<i>xy</i> -Ebene			
Hauptnebenphase	Polyhalit	Anhydrit			
- Lokalisation	an Korngrenzen u. als Ein-	an Korngrenzen u. als Ein-			
	schlüsse in Halit, vereinzelt	schlüsse in Halit			
	durchgehende Lagen				
- Auftreten	dispers verteilt bis durch-	dispers verteilt			
	gehende Lagen				

Tabelle 4.7: Zusammenfassung der Gesteinsmerkmale des Blocks 2016 und des Blocks 2020

	Block 2016	Block 2020
Fluideinschlüsse		
- Form	kubisch u. blasenförmig	kubisch u. blasenförmig
- Lokalisation	inter- und intrakristallin, z.T.	inter- und intrakristallin, z.T.
	als Einschlussbahnen,	als Einschlussbahnen,
	unterschiedlich orientiert	unterschiedlich orientiert
<b>Bomidgehalt</b> [µg/g]	207	98
Fluidgehalt [Gew%]	0,06 bis 0,12	0,04 bis 0,10

# 4.2 Triaxiale Kompressionsversuche

### 4.2.1 Vorbemerkungen

Zur Auswertung wird im weiteren Verlauf lediglich das arithmetische Mittel, vgl. Gleichung (4.1) verwendet. Es wird im Folgenden als Durchschnitt bezeichnet. Die Kennzeichnung erfolgt mit durchgehender Linie über den Schriftzeichen  $\overline{x}$  ohne zusätzliche Benennung "arithm".

Der Begriff Schichtung bezieht sich folgend sowohl auf die laterale Ausdehnung des Gesteins als auch auf die räumliche Orientierung des Gefüges (Foliation/Lineation), da diese beim untersuchten Gestein kongruent sind.

Zum besseren Verständnis und zur Anschaulichkeit soll an dieser Stelle die genutzte Farbgebung innerhalb der Auswertung gezeigt werden. Abbildung 4.17 fasst das Farbkonzept anschaulich zusammen. Rechts und links außen finden sich die Farben für die an Block 2016 durchgeführten Versuche. Für einen Fallwinkel von  $\beta = 0^{\circ}$  wurde ein helles Blau, für  $\beta = 90^{\circ}$  ein helles Grün gewählt. Für Block 2020 finden sich die Farben entsprechend der Fallwinkel in der Mitte der Abbildung. Auch hier wurde für  $\beta = 0^{\circ}$ Blau, allerdings in einem kräftigen Farbton gewählt. Äquivalent ist die Farbgebung für  $\beta = 90^{\circ}$  im Vergleich zu Block 2016. Für ein Fallen von  $\beta = 30^{\circ}$  sind die Kurven in Rot, für  $\beta = 60^{\circ}$  in Orange dargestellt. Im Folgenden werden für die Fallwinkel 0° und 90° auch die Bezeichnungen "horizontale" und "vertikale" Schichtung genutzt.

Die vor Durchführung der Versuche an den Probekörpern bestimmte Dichte lag bei beiden Blöcken bei etwa  $2,15 \text{ g/cm}^3$ .

Neben der üblichen Betrachtung der verzerrungsgeregelten Kompressionsphase wird hier zunächst zusätzlich die spannungsgeregelte Konsolidierung ausgewertet.



Abbildung 4.17: Farbgebung innerhalb der Auswertung der Versuche in Abhängigkeit des Fallwinkels  $\beta$ 

### **4.2.2** Belastung unter $\beta = 0^{\circ}$ und $\beta = 90^{\circ}$

#### Konsolidierung

Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19 stellen die spannungsgeregelte Konsolidierung in Form der axialen Verformung sowie der Verzerrungsrate jeweils über die Zeit für Block 2016 dar. Die blauen Kurven zeigen im Schnitt eine höhere axiale Verformung und somit eine größere Verzerrungsrate als die grünen Kurven. Zum Ende der Phase erreichen demnach die 0°-Proben eine höhere durchschnittliche Verformung von etwa 0,042 mm, während die 90°-Proben 0,032 mm erreichen. Die Streuung der Ergebnisse ist bei den blauen Kurven größer. Ein Rückgang der Rate über die Zeit lässt sich bei beiden Fallwinkeln gut erkennen. Im Mittel beträgt die Rate zum Ende der Konsolidierung  $2,5 \cdot 10^{-9} s^{-1}$  für beide Probenarten.

Die Konsolidierungsphasen der Versuche an Block 2020 sind Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 zu entnehmen. Das Verhalten ist hier eindeutig abhängig vom Fallwinkel. Alle 0°-Proben zeigen eine höhere axiale Verformung über die Zeit als die 90°-Proben. Die 90°-Proben erreichen eine axiale Verformung von im Mittel 0,030 mm, während die 0°-Proben bei 0,062 mm liegen und somit mehr als doppelt so hoch sind. Dieses Bild spiegelt sich entsprechend auch in der Verzerrungsrate wider. Die 0°-Proben weisen eine höhere Rate auf. Nach der 15-stündigen Phase beträgt sie für beide Probenarten im Mittel 2,9  $\cdot 10^{-9} s^{-1}$  und ist damit etwas höher als bei den Versuchen an Block 2016.



Abbildung 4.18: Axiale Verformung über die Zeit unter  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$  (Block 2016)



Abbildung 4.19: Axiale Verzerrungsrate über die Zeit unter  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$  (Block 2016)



Abbildung 4.20: Axiale Verformung über die Zeit unter  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$  (Block 2020)



Abbildung 4.21: Axiale Verzerrungsrate über die Zeit unter  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$  (Block 2020)



(a) Querschnitt, Bo-1-41

(b) Längsschnitt, Bo-2-37



Zur Beurteilung der Konsolidierung sollen zusätzlich µCT-Aufnahmen herangezogen werden. Die Aufnahmen in Abbildung 4.22 zeigen zwei Prüfkörper vor und nach dem an ihnen durchgeführten triaxialen Extensionsversuch. Extensionsversuche sind wie bereits erwähnt nicht Bestandteil der Arbeit. Hier soll lediglich ein Rückschluss auf die in beiden Versuchsarten identisch umgesetzte Konsolidierung erfolgen.

Die dunkleren Grauwerte jeweils in der Mitte der Proben lassen auf eine Kompaktion schließen. Zusätzlich lässt sich erkennen, dass in der Probe Bo-2-37 vor dem Versuch ein Mikroriss durch den Querschnitt der Probe verläuft. Dieser hat sich nach dem Versuch geschlossen. Ebenso hat sich der Porenraum, erkennbar an den kleinen schwarzen Punkten in den Aufnahmen der Probe Bo-1-41, verringert. Die Extensionsversuche wurden mit einer Konsolidierungsphase über 15 Stunden mit 40 MPa wie in den hier betrachteten Kompressionsversuchen durchgeführt. Im Anschluss wurde die quasi-isostatische Spannung auf 60 MPa erhöht. Die sich anschließende Extensionsphase verlief kraftgesteuert, indem die axiale Spannung mit 0,01 MPa/s reduziert, während der Manteldruck von 60 MPa gehalten wurde.

Das Rissschließen sowie die Kompaktion der Proben kann auf die Konsolidierung sowie die Übergangsphase zwischen Konsolidierung und Start der Extensionsphase (Erhöhung von Axial- und Manteldruck auf 60 MPa) zurückgeführt werden. Für eine alleinige Beurteilung des quantitativen Einfluss der Konsolidierungsphase müssten zusätzlich  $\mu$ CT-Untersuchungen an den Proben vor und nach dieser Phase durchgeführt werden. Qualitativ kann vermutet werden, dass die mit knapp 35 Minuten vergleichsweise kurze Übergangsphase einen geringeren Einfluss hat. Es ist somit davon auszugehen, dass es in der Konsolidierungsphase, wie sie bei den Kompressionsversuchen durchgeführt wird, zu einem Schließen von Mikrorissen kommt.

#### Kompression

Die Ergebnisse der Kompressionsversuche an den Proben des Blocks 2016 zeigen Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24. In erstgenannter sind links die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die unterschiedlichen Manteldrücke dargestellt. Der geringste Manteldruck von 0,5 MPa befindet sich im obersten Diagramm. Im untersten Diagramm werden die Ergebnisse gezeigt, die bei einem Manteldruck von 2 MPa gefahren wurden. Blau gefärbte Kurven stehen für Proben mit einem Fallen von 0°, grüne Kurven für Proben mit einem Fallen von 90°, vgl. Abbildung 4.17. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve ist durch einen schnellen Anstieg der Spannungen gekennzeichnet, es folgt die Verfestigung der Probe, bis es zum Bruch und zur anschließenden Entfestigung des Steinsalzes kommt, vgl. Abschnitt 2.5.3.

Der Bruchpunkt ist durch die höchste erreichte Differenzspannung  $\sigma_B$  und die dazugehörige axiale Dehnung  $\epsilon_B$  definiert. In den Diagrammen auf der rechten Seite der Abbildung 4.23 finden sich für eine bessere Übersicht die einzelnen Bruchpunkte als farbige Punkte wieder. Die Kreuze stellen jeweils die Mittelwerte für die horizontale und vertikale Schichtung dar. Da bei Manteldrücken ab 5 MPa bis zur maximal gefahrenen Verformung von 20 mm bzw. einer maximalen technischen Dehnung von 20 % kein (eindeutiger) Bruch erreicht wurde, sind diese Kurven in einem eigenen Diagramm abgebildet, s. Abbildung 4.24.

Bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 0,5$  MPa wurden je vier Versuche je Fallwinkel gefahren. Es zeigt sich, dass die Verfestigung der Proben bei unterschiedlichen Differenzspannungen einsetzt. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der 0°-Proben streuen um Verläufe der 90°-Proben, die ein sehr einheitliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten in der Verfestigung zeigen. Bis auf eine Ausnahme erreichen alle Proben bei einem sehr ähnlichen Spannungsniveau den Bruchpunkt. Hinsichtlich der Bruchdehnung zeigt sich jedoch ein deutlicher Unterschied. Die 90°-Proben weisen eine deutlich geringere Bruchdehnung auf. Das bestätigen die Mittelwerte im Diagramm der Bruchpunkte.



Abbildung 4.23: Spannungs-Dehnungs-Kurven (links) und Bruchpunkte (rechts) für  $\sigma_3 \leq 2,0$  MPa unter  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  (Block 2016)

Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Versuche bei einem Manteldruck von 1 MPa zeigen ein ähnliches Bild. Auch hier wurden je Fallwinkel vier Versuche gefahren. Hinsichtlich der Verfestigung zeigen die Verläufe der 0°-Proben im Wesentlichen ein geringeres Spannungsniveau als die 90°-Proben. Die erreichten Bruchspannungen sind bis auf zwei Ausnahmen, je eine horizontal und eine vertikal geschichtete Probe, hingegen sehr ähnlich. Die Beobachtung der unterschiedlich hohen Bruchdehnung bestätigt sich bei diesem Manteldruck. Auch hier weisen die Proben mit einem Fallen von 90° eine geringere Bruchdehnung auf.

Bei einem Manteldruck von 1,5 MPa wurden je zwei Versuche je Fallwinkel gefahren. Hier fällt auf, dass eine Probe mit einem Fallen von 0° eine höhere Buchspannung und auch Bruchdehnung erzielt. Dies spiegelt sich auch in der mittleren Bruchspannung wider, die entgegen der Erwartung höher als die mittlere Bruchspannung bei dem höheren Manteldruck von 2 MPa ist. Auch bei Ausschluss des stark abweichendes Bruchpunkts lässt sich für diese Versuchsreihe bestätigen, dass die 0°-Proben eine höhere Bruchdehnung aufweisen.

Die Versuchsreihe mit einem Manteldruck von 2 MPa beinhaltet je einen Versuch bei 0° und 90°. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe beider Proben sind annähernd kongruent, es zeigt sich eine nahezu identische Verfestigungsphase. Die Bruchspannungen und -dehnungen sind nahezu identisch.

Bei den Versuchsreihen mit Manteldrücken von 5, 10 und 20 MPa wurde kein (eindeutiger) Bruch innerhalb der Kompressionsphase erreicht, siehe Abbildung 4.24. Hier lässt sich daher im Wesentlichen die Verfestigungsphase vergleichen. Bei allen drei Versuchsreihen wurde je ein Versuch je Fallwinkel gefahren. Bei Manteldrücken von 5 und 10 MPa zeigt sich ein höheres Spannungsniveau bei der Verlaufkurve der 90°-Probe. Die Verfestigung scheint somit bei den horizontalen Proben bei einer geringeren Differenzspannung zu starten. Die Verfestigungsrate ist bei den 90°-Proben etwas geringer. Die Differenz zwischen den Verläufen verringert sich über den Versuchsablauf. Bei einem Manteldruck von 5 MPa scheint zudem die 90°-Probe den Bruch nahezu erreicht zu haben. Die Spannungen verharren auf einem Plateau, eine Abnahme ist zu erahnen. Ein Blick in die Messwertreihe zeigt jedoch noch keine eindeutige Abnahme.

Bei einem Manteldruck von 20 MPa zeigt sich ein annähernd kongruentes Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Auch hier zeigt der Verlauf der 90°-Probe ein höheres Spannungsniveau als der Verlauf der 0°-Probe, die Differenz ist dabei jedoch gering und ändert sich innerhalb der Verfestigung bis zum Erreichen der maximalen Axialdehnung kaum.

Tabelle 4.8 fasst die Mittelwerte der Bruchspannungen und -dehnungen je Manteldruck für den Block 2016 übersichtlich zusammen. Die Ergebnisse der einzelnen Ver-



Abbildung 4.24: Spannungs-Dehnungs-Kurven für  $\sigma_3 \ge 5$  MPa unter  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$  (Block 2016)

0'	>	90	o
Bruchspannung	Bruchdehnung	Bruchspannung	Bruchdehnung
[MPa]	[-]	[MPa]	[-]
36,60	0,074	35,57	0,057
38,81	0,095	38,57	0,073
43,11	0,135	41,55	0,103
41,17	0,114	41,50	0,113
	07 Bruchspannung [MPa] 36,60 38,81 43,11 41,17	0°           Bruchspannung [MPa]         Bruchdehnung [-]           36,60         0,074           38,81         0,095           43,11         0,135           41,17         0,114	0°         90           Bruchspannung [MPa]         Bruchdehnung [-]         Bruchspannung [MPa]           36,60         0,074         35,57           38,81         0,095         38,57           43,11         0,135         41,55           41,17         0,114         41,50

Tabelle 4.8: Mittelwerte der Bruchspannungen und Bruchdehnungen je Manteldruck für Block 2016

suche finden sich im Anhang C.

Abbildung 4.25 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit Erreichen des Bruchzustands an Block 2020. Erneut sind auf der linken Seite die Spannungs-Dehnungs-Kurven und auf der rechten Seite die Bruchpunkte für die einzelnen Manteldrücke dargestellt.

Bei einem Manteldruck von 0,1 MPa wurde bei 0° und 90° je ein Versuch gefahren. Die Verfestigung der 0°-Probe setzt bei etwas geringeren Differenzspannungen ein. Innerhalb der Verfestigungsphase ist dann die Verzerrungsrate leicht unterschiedlich. Die blaue Kurve zeigt einen steileren Anstieg als die grüne Kurve. Insgesamt erreicht die Probe mit einem Fallen von 0° eine höhere Bruchspannung und auch eine höhere Bruchdehnung.

Die Versuchsreihe bei einem Manteldruck von 0,5 MPa Manteldruck umfasst drei Versuche je Fallwinkel. Hierbei zeigt sich im Mittel, dass die 0°-Proben erneut bei geringeren Differenzspannungen den Bereich der elastischen Verformung verlassen und in die Verfestigung übergehen. Die Verzerrungsrate innerhalb der Verfestigungsphase ist rein optisch vergleichbar. Die Proben mit einem Fallen von 90° erreichen im Mittel höhere Bruchspannungen. Die Mittelwerte der Bruchdehnungen liegen nah beieinander, wobei die 0°-Proben eine geringfügig höhere Bruchdehnung erreichen.

Auch bei einem Manteldruck von 1 MPa wurden je drei Versuche bei 0° und 90° durchgeführt. Hier scheinen die Kurven bei einer ähnlichen Differenzspannung in die Verfestigung überzugehen. Die Verzerrungsrate ist jedoch unterschiedlich. Die 90°-Proben weisen einen etwas steileren Anstieg auf. Hinsichtlich des Bruchverhaltens lässt sich feststellen, dass die mittleren Bruchspannungen nahezu identisch sind. Die 0°-Proben weisen jedoch eine höhere Bruchdehnung als die 90°-Proben auf.

Die Versuchsreihe bei einem Manteldruck von 1,5 MPa umfasst ebenfalls je drei Versuche bei 0° und 90°. Hier zeigt sich, dass die 0°-Proben bei geringeren Spannungen



Abbildung 4.25: Spannungs-Dehnungs-Kurven (links) und Bruchpunkte (rechts) für  $\sigma_3 \leq 2,0$  MPa unter  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  (Block 2020)



Abbildung 4.26: Spannungs-Dehnungs-Kurve für  $\sigma_3 = 20$  MPa unter  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 90^\circ$  (Block 2020)

in die Verfestigung übergehen. Die Verzerrungsraten innerhalb der Verfestigungsphase scheinen bis auf eine Ausnahme bei den 90°-Proben vergleichbar. Im Mittel ist die mittlere Bruchspannung der 90°-Proben etwas höher als die der 0°-Proben. Die mittlere Bruchdehnung ist erneut bei den 0°-Proben deutlich höher.

Bei einem Manteldruck von 2 MPa wurde je ein Versuch bei 0° und 90° gefahren. Die Kurven zeigen zu Beginn der Verfestigungsphase einen leichten Unterschied, gleichen sich dann aber wieder an und sind bis zum Bruchpunkt nahezu identisch, sodass auch die Bruchpunkte nah aneinander liegen. Bruchspannung und -dehnung der 0°-Probe sind etwas höher.

Tabelle 4.9 fasst die Mittelwerte der Bruchspannungen und Bruchdehnungen der an Block 2020 durchgeführten Versuche zusammen.

Die Proben der 20 MPa-Versuchsreihe wurden bis zur maximalen technischen Dehnung von 20 % nicht zu Bruch gefahren, siehe Abbildung 4.26. Es wurde jeweils ein Versuch bei 0° und 90° durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe sind über

Mantel-	0'	0	90	o
<b>druck</b> [MPa]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [-]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [-]
0,1	32,64	0,068	30,14	0,050
0,5	30,67	0,070	34,52	0,069
1,0	33,93	0,095	34,17	0,078
1,5	34,63	0,114	37,50	0,093
2,0	40,87	0,117	40,38	0,112

Tabelle 4.9: Mittelwerte der Bruchspannungen und Bruchdehnungen je Manteldruck für Block 2020

den gesamten Versuch annähernd kongruent, wobei der Verlauf der 0°-Probe Kurve geringfügig höhere Spannungen in der Verfestigungsphase aufweist.

## 4.2.3 Zwischenfazit

Die Versuche an Proben mit einem Fallwinkel von 0° und 90° zeigen bisher sowohl in der Konsolidierungs- als auch in der Kompressionsphase Unterschiede in den axialen Dehnungen. Die 0°-Proben weisen zum Ende der Konsolidierung eine höhere Verformung auf. In der Kompression zeigen sich bei Manteldrücken zwischen 0,1 und 1,5 MPa bei den 0°-Proben im Mittel höhere Bruchdehnungen. Bei einem Manteldruck von 2 MPa zeigt sich bei den Bruchdehnungen keine Abhängigkeit vom Fallwinkel.

Bei den Bruchspannungen lässt sich unabhängig vom Manteldruck kein Einfluss des Fallwinkels beobachten.

# **4.2.4** Belastung unter $\beta = 30^{\circ}$ und $\beta = 60^{\circ}$

#### Konsolidierung

Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28 stellen die Konsolidierung in Form der axialen Verformung sowie der Verzerrungsrate jeweils über die Zeit dar. Die roten Kurven präsentieren die Ergebnisse der Proben, die bei  $\beta = 30^{\circ}$  belastet wurden, während die orangenen Kurven die Ergebnisse für einen Fallwinkel von 60° zeigen, vgl. Abbildung 4.17.

Die roten Kurven zeigen eine größere Streuung als die orangenen Kurven. Im Mittel ergibt sich für die 30°-Proben insgesamt eine höhere axiale Verformung und somit



Abbildung 4.27: Axiale Verformung über die Zeit unter  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$  (Block 2020)



Abbildung 4.28: Axiale Verzerrungsrate über die Zeit unter  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$  (Block 2020)



Abbildung 4.29: Axiale Verformung über die Zeit unter  $\beta = [0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}]$ (Block 2020)



Abbildung 4.30: Axiale Verzerrungsrate über die Zeit unter  $\beta = [0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}]$ (Block 2020)

eine größere Verzerrungsrate als für die 60°-Proben. Zum Ende der Konsolidierung erreichen die 30°-Proben eine durchschnittliche Verformung von etwa 0,043 mm, während die 60°-Proben 0,029 mm erreichen. Ein Rückgang der Rate über die Zeit lässt sich bei beiden Fallwinkeln gut erkennen. Im Mittel beträgt die Rate zum Ende der Konsolidierung  $2,3 \cdot 10^{-9} s^{-1}$  für beide Probenarten.

Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30 zeigen die Ergebnisse in Kombination mit den Ergebnissen der 0°- und 90°-Proben. Die 30°- und 60°-Proben reihen sich zwischen den Bandbreiten der 0°- und 90°-Proben ein. Die Proben mit einer horizontalen Schichtung zeigen insgesamt die höchste Verformung sowie die höchste Verformungsrate. Mit Zunahme des Fallwinkels  $\beta$  sinken Verformung und Verzerrungsrate innerhalb der Konsolidierungsphase. Die Proben mit 60° und 90° erreichen insgesamt die geringsten Werte, wobei Verformung und Verzerrungsrate bei 60° noch etwas geringer ausfallen als bei 90°, s. Tabelle 4.10.

1		
Fallwinkel $\beta$	Verformung $\overline{\Delta l}$	Verzerrungsrate $\overline{\dot{\epsilon}_{1,n}}$
[]	[mm]	10 [-/s]
0	0,062	4,03
30	0,043	2,76
60	0,029	1,78
90	0,030	1,84

Tabelle 4.10: Mittlere Verformung und Verzerrungsrate am Ende der Konsolidierung je Fallwinkel $\beta$ 

#### Kompression

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie die Bruchpunkte dieser Versuche zeigt Abbildung 4.31. Tabelle 4.11 enthält die im Mittel erreichten Bruchspannungen und -dehnungen der Versuchsreihe.

Bei den Manteldrücken von 0,5 MPa und 1,5 MPa verlaufen die Kurven in der Verfestigungsphase annähernd kongruent. Bei einem Manteldruck von 0,5 MPa zeigt sich bei den 60°-Proben ein etwas steilerer Anstieg der Kurven, respektive eine leicht höhere Verfestigungsrate. Die Bruchspannungen sind etwa gleich groß, hinsichtlich der Bruchdehnung fällt eine 30°-Probe etwas auf. Sie zeigt eine im Vergleich deutlich höhere Bruchdehnung als die drei übrigen Proben. Bei einem Manteldruck von 1,5 MPa lässt sich die Beobachtung, dass die 60°-Proben eine etwas höhere Verfestigungsrate aufweisen, bestätigen. Auch hier zeigt sich eine sehr einheitliche Bruchspannung



Abbildung 4.31: Spannungs-Dehnungs-Kurven (links) und Bruchpunkte (rechts) für verschiedene Manteldrücke unter  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$  (Block 2020)

von rund 44 MPa, s. Tabelle 4.11. Die 30°-Proben zeigen insgesamt eine etwas höhere Bruchdehnung.

Die Versuchsergebnisse bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 2$  MPa zeigen zu Beginn sehr kongruente Kurvenverläufe. Mit Fortschreiten der Verfestigungsphase zeigt die 60°-Probe eine höhere Verfestigung, die in einer höheren Bruchspannung und in einer deutlich höheren Bruchdehnung mündet. Dennoch sind die nominalen Werte beider Proben geringer als die Ergebnisse der Proben, die bei einem Manteldruck von 1,5 MPa belastet wurden. Das ist so nicht zu erwarten. Ein Grund für dieses Verhalten könnten mögliche makroskopische Fehlstellen wie Ausbrüche an den Stirnseiten der Proben sein, die innerhalb der Konsolidierungsphase nicht geschlossen werden konnten.

Mantel-	30°		60°	
<b>druck</b> [MPa]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [-]	Bruchspannung [MPa]	Bruchdehnung [-]
0,5	33,16	0,063	33,49	0,058
1,5	39,39	0,105	39,74	0,096
2,0	35,17	0,085	38,33	0,098

Tabelle 4.11: Mittelwerte der Bruchspannungen und Bruchdehnungen je Manteldruck für Block 2020 bei  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$ 

Zur Einordnung in den Gesamtkontext des untersuchten Blocks 2020 fasst Abbildung 4.32 die Ergebnisse der 0°- und 90-°, sowie die der 30°- und 60°-Proben zusammen. Die Versuche bei 30° und 60° zeigen eine geringere Streubreite als die 0°und 90°-Versuche.

Bei einem Manteldruck von 0,5 MPa liegen die Bruchpunkte nah beieinander. Die Bruchspannungen sind vergleichbar, hinsichtlich der Bruchdehnung werden bei den 30°- und 60°-Proben vergleichsweise etwas geringere Werte erreicht.

Bei einem Manteldruck von 1,5 MPa zeigen sich bei den 30°- und 90°-Proben etwas höhere Bruchspannungen. Die Bruchdehnungen reihen sich ein, sodass die 90°-Proben im Mittel die geringste Bruchdehnung erreichen. Es folgen 60° und 30°. Bei 0° werden die höchsten Bruchdehnungen erzielt.

Bei einem Manteldruck von 2 MPa weichen die Kurven der 30°- und 60°-Probe deutlich von denen der 0°- und 90°-Proben ab. Sie erreichen insgesamt ein geringeres Spannungsniveau. So erfolgt die Verfestigung bei geringeren Differenzspannungen. Des Weiteren versagen die 30°- und die 60°-Probe bei geringeren Spannungen und auch Dehnungen. Auch hier wird, wie schon bei der alleinigen Betrachtung der 30°- und 60°-Proben, auf potentielle Fehlstellen im Gefüge der Probe verwiesen.



Abbildung 4.32: Spannungs-Dehnungs-Kurven (links) und Bruchpunkte (rechts) für verschiedene Manteldrücke unter  $\beta = [0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}]$  (Block 2020)

#### 4.2.5 Auswertung in Bezug auf eine mögliche Anisotropie

#### Bruchspannung

Sowohl die Bankung aufgrund der Diagenese als auch die räumliche Orientierung des Gefüges durch die Elongation der Körner kann als Schichtung verstanden werden. Sie lässt ein anisotropes Verhalten innerhalb der Kurzzeitfestigkeitsversuche erwarten. In Bezug auf [Wittke, 1984] und [Plinniger et al., 2019] ist mit einer anisotropen Bruchfestigkeit hinsichtlich der Bruchspannung zu rechnen. Während bei Belastungen mit Fallwinkeln von 0° und 90° sowohl rechnerisch als auch in einaxialen Druckversuchen kein Unterschied in der Bruchspannung ermittelt wurde, zeigt sich bei Winkeln von  $\beta = 45^\circ + \varphi_s/2$  eine deutliche Reduzierung der Bruchfestigkeit.

Für beide Serien, Block 2016 und Block 2020, lassen sich nun die Festigkeitsparameter  $\varphi$  und *c* ermitteln. Unter der Annahme, dass wie in der Felsmechanik bei 0° und 90° kein Bruch auf der Schieferungsebene, s. [Wittke, 1984], bzw. in der Salzmechanik im Bereich der Korngrenze stattfindet, bricht das Gestein bei diesen Fallwinkeln im Korn. Somit können für 0° und 90° die Festigkeiten des Korns,  $\varphi_K$  und  $c_K$ , ermittelt werden. Dazu werden die Bruchkreise im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm dargestellt. Der Spannungspunkt entspricht dem Punkt des Mohr'schen Kreises bei  $\sigma = \sigma_m$ . Über die verschiedenen Spannungspunkte lässt sich dann mittels linearer Regression eine Ausgleichsgerade bestimmen, welche die Bruchgerade darstellt. Sie ist definiert über die Parameter  $\alpha$ und *b*, die sich über Gleichung (4.3) und Gleichung (4.4) in die Parameter  $\varphi$  und *c* der Schergerade überführen lassen. Abbildung 4.33 stellt diesen Zusammenhang grafisch dar.

$$\sin(\varphi) = \tan(\alpha) \tag{4.3}$$

$$c = \frac{b}{\cos(\varphi)} \tag{4.4}$$

Die so ermittelten Wertepaare für Block 2016 und Block 2020 lassen sich Tabelle 4.12 entnehmen. In Abbildung 4.34 und Abbildung 4.35 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Der Reibungswinkel des Korns  $\varphi_K$  beträgt somit etwa 55°. Sofern die Festigkeit im Kontaktbereich der Korngrenzen tatsächlich geringer ist, müsste entsprechend der Reibungswinkel  $\varphi_{KG}$  geringer sein. In Abschnitt 3.3.4 wurde bereits erläutert, dass bei einem Reibungswinkel  $\varphi_{KG}$  von 50°, 40° oder 30° eine deutliche Reduktion der Bruchfestigkeit bei einem Fallwinkel von  $\beta = 60°$  zu erwarten wäre. Eine solche Reduktion kann in den Spannungs-Dehnungs-Kurven jedoch nicht beobachtet werden, vgl. Abbildung 4.32. In Abbildung 4.36 sind die zusätzlichen Bruchpunkte für 30° und



Abbildung 4.33: Zusammenhang zwischen Bruch- und Schergerade mit jeweils zugehörigen Parametern

 $60^{\circ}$  im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm aufgenommen sowie die daraus insgesamt ermittelte Bruchund Schergerade dargestellt. Die Punkte führen nur zu einer geringfügigen Änderung der Festigkeitsparameter.

Weitere Auswertungen zur Überprüfung eines anisotropen Bruchverhaltens in Bezug auf die Bruchspannungen bestätigen diese Beobachtung.

Dazu erfolgt eine Überführung in Oktaederspannungen, vergleiche Abschnitt 2.1. Anhand der Bruchpunkte werden Bruchgrenzen ermittelt. Es werden für jeden Block und jeden Fallwinkel individuelle Bruchgrenzen bestimmt. Für eine erste Prüfung ist die Annahme eines linearen Zusammenhangs ausreichend, sodass erneut Ausgleichsgeraden mittels linearer Regression bestimmt werden können. Über das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  lässt sich die Güte der Ausgleichsgeraden einschätzen. Je näher  $R^2$  an 1 liegt, de-

	Block 2016	Block 2020
α [°]	39	39
b [MPa]	3,0	2,7
φ [°]	54	54
c [MPa]	5,1	4,5

Tabelle 4.12: Parameter der Bruch- und Schergeraden für Block 2016 und Block 2020



Abbildung 4.34: Bruch- und Schergerade für Block 2016



Abbildung 4.35: Bruch- und Schergerade für Block 2020 für  $\beta=0^\circ$  und  $\beta=90^\circ$ 



Abbildung 4.36: Bruch- und Schergerade für Block 2020

sto besser ist die Korrelation zwischen der Geraden und den tatsächlich gemessenen Werten. Bei  $R^2 = 1$  liegt ein perfekter linearer Zusammenhang vor, während sich eine Punktwolke an Messergebnissen bei  $R^2 = 0$  nicht über einen linearen Zusammenhang beschreiben lassen kann.

Abbildung 4.37 zeigt die Bruchpunkte und Bruchgrenzen für den Block 2016. Die Ausgleichsgeraden weisen mit  $R^2 \ge 0.94$  eine hohe Güte zur Beschreibung der Bruchgrenze auf. Die Bruchgrenzen liegen nah beieinander. Selbiges gilt für Block 2020. Die lineare Regression zeigt für die verschiedenen Fallwinkel ein Bestimmtheitsmaß von knapp bzw. über 0.9. Auch hier liegen Bruchpunkte und die daraus ermittelten Bruchgrenzen nah beieinander, siehe Abbildung 4.38.

Als weiteres Maß zur Einordnung eines möglichen richtungsabhängigen Verhaltens soll hier der Anisotropiefaktor bestimmt werden. Dieser ist in [Plinniger et al., 2019] als Quotient aus minimaler und maximaler Druckfestigkeit im einaxialen Druckversuch definiert:

$$AI = \frac{\sigma_{B,min}}{\sigma_{B,max}}.$$
(4.5)







Abbildung 4.38: Bruchpunkte in Oktaederspannungen (Block 2020)

Die Klassierung des anisotropen Verhaltens erfolgt dann in 20%-Schritten und ist Tabelle 4.13 zu entnehmen.

Tabelle 4.13: Klassierung der	Anisotropie über den Anisotropiefaktor AI, nach [	Plinni-
ger et al., 2019]		

Anisotropiefaktor AI	Klassifizierung
AI < 0,2	extrem anisotrop
$0.2 \le AI < 0.4$	sehr anisotrop
$0.4 \le AI < 0.6$	mäßig anisotrop
$0.6 \le AI < 0.8$	gering anisotrop
$0.8 \le AI \le 1.0$	isotrop

Dieser Faktor soll nun für beide Blöcke bestimmt werden. Dazu wird für jeden Manteldruck  $\sigma_3$  die mittlere Bruchspannung  $\overline{\sigma_B}$  je Fallwinkel betrachtet. Anschließend wird ermittelt, welcher Durchschnittswert der höchste ist. Dieser stellt den Nenner, der geringste den Zähler in der Ermittlung des Anisotropiefaktors dar. Gleichung (4.6) und Gleichung (4.7) zeigen diesen Zusammenhang für Block 2020. Bei Block 2016 sind die Mittelwerte für die Fallwinkel 30° und 60° entsprechend nicht zu berücksichtigen.

$$\overline{\sigma_B}_{max} = max(\overline{\sigma_{B,0^\circ}}, \overline{\sigma_{B,30^\circ}}, \overline{\sigma_{B,60^\circ}}, \overline{\sigma_{B,90^\circ}})$$
(4.6)

$$\overline{\sigma_B}_{min} = min(\overline{\sigma_{B,0^\circ}}, \overline{\sigma_{B,30^\circ}}, \overline{\sigma_{B,60^\circ}}, \overline{\sigma_{B,90^\circ}})$$

$$(4.7)$$

Die Anisotropiefaktoren berechnen sich nach Gleichung (4.8). Die berechneten Faktoren sowie der Fallwinkel des Minimums lassen sich Tabelle 4.14 entnehmen.

$$AI_{\sigma}(\sigma_3) = \frac{\overline{\sigma_B}_{min}(\sigma_3)}{\overline{\sigma_B}_{max}(\sigma_3)}$$
(4.8)

Die Anisotropiefaktoren nehmen für beide Blöcke Werte zwischen 0,9 und 1,0 an. Sie sind hinsichtlich der Bruchspannung somit als "isotrop" zu klassieren.

Die vorgenommenen Auswertungen, Scherparameter, Bruchgrenzen und Anisotropiefaktoren, lassen darauf schließen, dass bei den untersuchten Proben hinsichtlich der Bruchfestigkeit kein anisotropes Verhalten, wie es für Trennflächen im Fels nachgewiesen wurde, vorliegt.
#### 4 Ergebnisse und Auswertung

Manteldruck	Block 2016		Block 2020	
[MPa]	$AI_{\sigma}$ [-]	$\beta(\sigma_{Bmin})$ [°]	$AI_{\sigma}$ [-]	$\beta(\sigma_{Bmin})$ [°]
0,1	-	-	0,9	90*
0,5	1,0	90*	0,9	0
1,0	1,0	90*	1,0	0*
1,5	1,0	90*	0,9	0
2,0	1,0	0*	0,9	30

Tabelle 4.14: Anisotropiefaktoren der Bruchspannung  $AI_{\sigma}$  je Manteldruck

\* keine Versuche bei 30° und 60°

#### Bruchdehnung

Des Weiteren soll die Bruchdehnung auf eine mögliche Anisotropie untersucht werden. Es werden die gleichen Auswertungen wie für die Bruchspannungen vorgenommen. Zunächst werden die Bruchgrenzen, nun aber bezogen auf die Bruchdehnungen, bestimmt. Eine Darstellung vergleichbar zu den Oktaederspannungen ist nicht möglich, da die radialen Dehnungen der Probe nicht bekannt und zudem nicht über die Höhe konstant sind. Es erfolgt somit eine Darstellung der Bruchdehnung in Abhängigkeit der jeweils anliegenden Mantelspannung. Abbildung 4.39 zeigt die aus den Bruchdehnungen abgeleiteten Bruchgrenzen für den Block 2016, Abbildung 4.40 für Block 2020.

Bei dieser Auswertung ist zu berücksichtigen, dass die Bruchpunktdichte der Versuchsreihen je Manteldruck variiert. Die Ergebnisse der Versuchsreihen, die mit vielen Versuchen gefahren wurden, dominieren daher die Lage der Bruchgrenze. Zudem sind die Geraden nur für den untersuchten Bereich zulässig. Mithilfe der Ausgleichsgeraden können keine Prognosen für das Verhalten bei, im Vergleich zu den Versuchen, geringeren und höheren Manteldrücken getroffen werden. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  fällt in dieser Auswertung geringer als bei den Bruchgeraden in Oktaederspannungen aus. Als erster Ansatzpunkt soll dennoch mit einer linearen Regression gearbeitet werden.

Für den Block 2016 zeigt sich, dass die aus den Bruchdehnungen abgeleitete Bruchgrenze der 0°-Proben einen höheren Ordinatenabschnitt bei einer ähnlichen Steigung aufweist. Anschaulich ausgedrückt liegt die Bruchgrenze für den betrachteten Spannungsbereich oberhalb der Bruchgrenze der 90°-Proben. Die 0°-Proben versagen somit tendenziell bei höheren Dehnungen. Beispielhaft soll die Differenz bei einem Manteldruck von 1 MPa herangezogen werden. Zwischen den Grenzen beträgt die Differenz



Abbildung 4.39: Bruchgrenzen abgeleitet aus den Bruchdehnungen (Block 2016)



Abbildung 4.40: Bruchgrenzen abgeleitet aus den Bruchdehnungen (Block 2020)

etwa  $\Delta \epsilon_{1,n} \approx 0.02$ , was bedeutet, dass die Bruchdehnung der 0°-Proben etwa 26 % größer in Bezug auf die Bruchdehnung der 90°-Proben ist.

Für den Block 2020 zeigt sich erneut, dass die aus den Bruchdehnungen abgeleitete Bruchgrenze der 0°-Proben im betrachteten Spannungsbereich oberhalb der Bruchgrenze der 90°-Proben liegt. Die 0°-Proben weisen also auch hier höhere Bruchdehnungen auf. Bei einem Manteldruck von 1 MPa beträgt die Differenz zwischen den Grenzen der 0°- und der 90°-Proben ca. 0,01, was 16 % entspricht. Zusätzlich sind hier die Bruchgrenzen für die Fallwinkel 30° und 60° eingezeichnet. Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche werden die Geraden jedoch durch jedes einzelne Ergebnis stark beeinflusst. Das Bestimmtheitsmaß ist zudem für die 30°-Proben gering, was an der Bruchdehnung bei einem Manteldruck von 2 MPa liegen dürfte.

Den Bruchgeraden für 30° und 60° soll daher weniger Aufmerksamkeit entgegengebracht werden, als dem Gesamtbild der Bruchdehnungen in den einzelnen Versuchsreihen. Bei einem Manteldruck von 1,5 MPa zeigt sich, dass sich die Bruchdehnungen der 30°- und der 60°-Proben in das oben beobachtete Verhalten einreihen. Die 0°-Proben weisen die höchste Bruchdehnung auf, es folgen 30°, 60° und schließlich 90°, vergleiche Abbildung 4.32.

Schließlich sollen auch für die Bruchdehnungen die Anisotropiefaktoren berechnet werden. Die Ermittlung der Minima und Maxima erfolgt äquivalent zu den Bruchspannungen nach Gleichung (4.6) und Gleichung (4.7). Der Anisotropiefaktor der Bruchdehnung wird dann nach Gleichung (4.9) berechnet. Tabelle 4.15 enthält die ermittelten Faktoren.

$$AI_{\epsilon}(\sigma_3) = \frac{\overline{\epsilon_B}_{min}(\sigma_3)}{\overline{\epsilon_B}_{max}(\sigma_3)}$$
(4.9)

Für Block 2016 zeigt sich für die geringen Mantelspannungen ein einheitlicher Faktor von 0,8, der nach [Plinniger et al., 2019] die untere Grenze für den Bereich des "isotropen" Verhaltens darstellt. Der Vergleich zu den Bruchspannungen zeigt den Unterschied. Der Faktor ist bei den Bruchdehnungen geringer. Gleiches gilt für Block 2020, wobei zusätzlich mit einem Faktor von 0,7 Werte im Bereich der "geringen Anisotropie" erzielt werden. Insgesamt liegen die Anisotropiefaktoren für die Bruchdehnung unter denen der Bruchspannung, vergleiche Tabelle 4.14.

Abbildung 4.41 zeigt die an beiden Blöcken erzielten Bruchdehnungen in Abhängigkeit des Fallwinkels je Manteldruck. Diese zusätzliche grafische Auswertung unterstützt die bereits vorangegangenen Analysen. Für Block 2016 zeigt sich bei Manteldrücken unter 2 MPa eine leichte Anisotropie in Abhängigkeit des Fallwinkels. Die





Bruchdehnung sinkt mit Zunahme des Fallwinkels. Bei Block 2020 kann diese Anisotropie ebenfalls bei Manteldrücken unter 2 MPa mit Ausnahme des Manteldrucks von 0,5 MPa festgestellt werden.

•				0 ,	
Manteldruck	Block 2016		Blo	Block 2020	
[MPa]	$AI_{\epsilon}$	$\beta(\epsilon_{Bmin})$	$AI_{\epsilon}$	$\beta(\epsilon_{Bmin})$	
0,1	-	-	0,7	90*	
0,5	0,8	90*	0,8	60	
1,0	0,8	90*	0,8	90*	
1,5	0,8	90*	0,8	90	
2,0	1,0	90*	0,7	30	

Tabelle 4.15: Anisotropiefaktoren der Bruchspannung  $AI_{\epsilon}$  je Manteldruck

\* keine Versuche bei 30° und 60°

#### 4.2.6 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Bruchspannungen kann kein anisotropes Verhalten identifiziert werden. Dies belegen sämtliche diesbezügliche Auswertungen. Ein Verhalten der Korngrenzen, wie es Trennflächen im Fels aufweisen, kann somit für das hier untersuchte Steinsalz ausgeschlossen werden. Die Festigkeitsparameter  $\varphi$  und *c* unterscheiden sich zwischen Korn und Korngrenze nicht.

Dennoch kann für das untersuchte Salz tendenziell ein anisotropes Verhalten sowohl in der Konsolidierungs- als auch in der Kompressionsphase beobachtet werden. Dieses anisotrope Verhalten beschränkt sich auf die Axialdehnungen der Proben. In der Konsolidierungsphase zeigen sich bei beiden Blöcken höhere Dehnungen bei geringeren Fallwinkeln. Die 0°-Proben erreichen somit zum Ende der Konsolidierungsphase die höchsten Dehnungen, während die 90°-Proben die geringste Dehnung aufweisen. Die 30°- und 60°-Proben des Blocks 2020 reihen sich ein, liegen mit ihren Bandbreiten zwischen 0° und 90°. Es kann somit zusammengefasst werden, dass mit steigendem Fallwinkel die Dehnungen in der Konsolidierungsphase abnehmen.

Die axiale Dehnung in der Konsolidierung ergibt sich aus der Kompaktion der Probe, der Schließung von Mikrorissen. Mirkorisse entstehen in der Probe durch den sekundären Spannungszustand im Gebirge vor der Gewinnung der Proben sowie durch die Gewinnung selbst. Spannungszustand und Gewinnung der Probe haben somit Einfluss auf das Verhalten der Probe in der Konsolidierung. Eine isolierte Betrachtung

#### 4 Ergebnisse und Auswertung

des Einflusses des Korngefüges ist für die Konsolidierung ohne Kenntnis über den sekundären Spannungszustand der Proben und dessen Dauer nicht möglich. Durch die Schließung der Mirkorisse in der Konsolidierung ist in der Kompressionsphase dann von intakten Prüfkörpern auszugehen, sodass der sekundäre Spannungszustand und die Probengewinnung zu vernachlässigen sind.

Innerhalb der Kompressionsphase kann für Block 2016 festgestellt werden, dass ein Fallwinkel von 90° bei Mantelspannungen unter 2 MPa mit einer geringeren Bruchdehnung einhergeht. Bei Block 2020 ist das Bild nicht eindeutig. Für Mantelspannungen unter 2 MPa trifft die obige Aussage bis auf  $\sigma_3 = 0.5$  MPa zu. Ein Einreihen der Bruchdehnungen von 30° und 60° findet jedoch nur bei einem Manteldruck von 1,5 MPa statt.

# 5.1 Eingrenzung des anisotropen Verhaltens in der Bruchdehnung

In Bezug auf die Bruchspannungen wurden keine Anzeichen für anisotropes Verhalten identifiziert. Jedoch zeigte sich bei den Axialdehnungen sowohl in der Konsolidierungs- als auch in der Kompressionsphase ein Verhalten, das vom Fallwinkel abhängig war.

Der Unterschied in der Kompressionsphase, respektive in der Bruchdehnung, soll nun eingehender untersucht werden. Die Bruchdehnung kann als Summe aus elastischen, plastischen und viskoplastischen Dehnungen, die bis zum Bruch auftreten, verstanden werden. Es liegt also nahe, zunächst die einzelnen Anteile zu betrachten. Der Anteil der viskoplastischen Dehnung ist im Kurzzeitfestigkeitsversuch von geringer Bedeutung und kann daher in der Betrachtung vernachlässigt werden.

 $\epsilon_{Bruch} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{spl}$ 

Um eine mögliche Eingrenzung des beobachteten anisotropen Verhaltens auf den elastischen oder plastischen Anteil zu untersuchen, wird wie allgemein üblich ein linear elastisches Verhalten sowie die Entkopplung von elastischem und plastischem Verhalten angenommen. Das Salz verhält sich bis zum Erreichen der Fließgrenze linear elastisch und anschließend plastisch.

Zunächst soll das elastische Verhalten im Kurzzeitfestigkeitsversuch analysiert werden. Der elastische Verformungsanteil ist im Kurzzeitfestigkeitsversuch ein geringer Anteil. Dies zeigen die Diagramme in den Abbildungen 5.2 und 5.4. Abbildung 5.1 und Abbildung 5.3 zeigen zunächst den gesamten Kurvenverlauf der Versuche bei einem Manteldruck  $\sigma_3 = 1$  MPa für Block 2016 und Block 2020. Die rote Box zeigt jeweils den Teilbereich der axialen Dehnung (0 bis 0,02, bzw. 0 bis 2 %), welcher dann in den Abbildungen 5.2 und 5.4 zu sehen ist.

Es ist zu erkennen, dass die elastische Dehnung im Vergleich zur Gesamtdehnung sehr gering ist. Ein linear elastischer Anstieg ist in einem Spannungsbereich von ca. 18 bis 22 MPa bei Block 2016 bzw. von 8 bis 13 MPa bei Block 2020 zu erkennen. Die



Abbildung 5.1: Spannungs-Dehnungs-Kurven für  $\sigma_3 = 1$  MPa (Block 2016)







Abbildung 5.3: Spannungs-Dehnungs-Kurven für  $\sigma_3 = 1$  MPa (Block 2020)







Abbildung 5.5: Sekantenmoduln bei $\sigma_3=1\,\mathrm{MPa}$  (Block 2016)



Abbildung 5.6: Sekantenmoduln bei $\sigma_3=1\,\mathrm{MPa}$  (Block 2020)

Fließgrenze liegt bei Block 2016 somit etwa im Bereich von 20 MPa und bei Block 2020 bei 10 MPa. Ein linear elastischer Anstieg mit einem E-Modul von 20 GPa veranschaulicht diese Einschätzung anhand der roten Linie in den Abbildungen 5.2 und 5.4. Die elastische Dehnung, die sich unter Annahme des E-Moduls von 20 GPa bis zu einer Spannung von 20 MPa (Block 2016) einstellt, beträgt 0,001. Bei 10 MPa (Block 2020) wird eine Dehnung von 0,0005 erreicht. Das entspricht jeweils nur rund 1 % der mittleren Bruchdehnung.

Weiterführend wurden die Sekantenmoduln in diesem Dehnungsbereich betrachtet, vgl. Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6. Der Sekantenmodul  $\Theta$  ist nach Gleichung (5.1) definiert, vgl. [O. Schulze und Rust, 1985].  $\epsilon_o$  ist dabei eine zuvor definierte Verformungsmarke, an welcher über die an dieser Marke erreichte Spannung  $\sigma_o$  der Sekantenmodul bestimmt werden soll. Bestimmt wurden die Moduln für  $\epsilon_o = [0,00025; 0,00050; 0,00075; 0,00100].$ 

$$\Theta(\epsilon_o) = \frac{\Delta \sigma_o(\epsilon_o)}{\epsilon_o} \tag{5.1}$$

Sichtbar ist für den Block 2016, dass bei einer Dehnung von  $\epsilon_o = 0,00025$  die arithmetischen Mittel der Sekantenmoduln nah beieinander liegen (ca. 27,2 und 28,9 GPa), wobei für die gesamte Versuchsreihe bei einem Manteldruck von 1 MPa die 0°-Proben etwas höhere Moduln aufweisen. Bei Block 2020 zeigt sich das Gegenteil. Die Mittelwerte der Sekantenmoduln der 90°-Proben liegen oberhalb derjenigen der 0°-Proben. Die Differenz ist etwas größer (ca. 20,6 und 23,7 GPa bei  $\epsilon = 0,00025$ ).

Insgesamt zeigen die Auswertungen zwar leichte Unterschiede im elastischen Dehnungsbereich, können ein anisotropes elastisches Materialverhalten aber nicht belegen. Für eine weiterführende quantitative Auswertung müsste das elastische Verhalten durch spezielle Versuche wie Be- und Entlastungsversuche im elastischen Bereich eingehender untersucht werden. Da hinsichtlich der hier betrachteten Bruchdehnung keine Relevanz vorliegt, wird auf die weitergehende Untersuchung zum elastischen Materialverhalten verzichtet.

An dieser Stelle kann bereits geschlussfolgert werden, dass die unterschiedlich hohe Bruchdehnung im Wesentlichen durch eine unterschiedlich große plastische Verformung erzielt wird, sodass die folgenden Erklärungsansätze die Mechanismen der plastischen Verformung analysieren.

Ein Einfluss der Nebenbestandteile Polyhalit und Anhydrit wäre aufgrund ihrer gegenüber Halit höheren Dichte und ihres anderen mechanischen Verhaltens denkbar. Er wird aufgrund der im Wesentlichen dispersen Verteilung dieser Nebenphasen jedoch ausgeschlossen.

# 5.2 Erklärungsansatz I: Versetzungsdichte

Im Kurzzeitfestigkeitsversuch grenzen die plastischen Verformungen vor dem Bruchpunkt den Bereich der Verfestigung ein. Verfestigung beschreibt auf mikrostruktureller Ebene die Erhöhung der Versetzungsdichte, die mit einer Reduzierung des Abstands zwischen den einzelnen Versetzungen einhergeht. Durch die Erhöhung der Versetzungsdichte wird die Bewegung der freien Versetzungen somit erschwert. Plastische Verformung beginnt bei geringeren Spannungen und das Material verfestigt sich mit Zunahme der Versetzungsdichte, vgl. [Günther, 2009].

Es liegt nahe, aufgrund des in beiden Blöcken vorliegenden Parallelgefüges (oblat bzw. gemischt prolat/oblat, s. Abschnitt 4.1.2) eine unterschiedliche Anzahl an Korngrenzen und somit eine unterschiedliche Versetzungsdichte in axialer Richtung zu vermuten. Dies wird in der Skizze in Abbildung 5.7 beispielhaft veranschaulicht.



Abbildung 5.7: Anzahl der Korngrenzen in axialer Richtung der Probe

Im Probekörper ist je nach Fallwinkel aufgrund der langgezogenen Körner eine unterschiedliche Anzahl an Korngrenzen in axialer Richtung vorhanden. So existieren in den 0°-Proben mehr Korngrenzen über die Probenhöhe. Versetzungshindernisse wie Korngrenzen beeinflussen die Versetzungsdichte und somit die plastische Verformung. In den 0°-Proben ist durch die höhere Anzahl an Korngrenzen eine erhöhte



Abbildung 5.8: Verzerrungsrate bei  $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$  (Block 2016)



Abbildung 5.9: Verzerrungsrate bei  $\sigma_3 = 1$  MPa (Block 2020)

Versetzungsdichte zu erwarten. Plastische Verformungen beginnen hier bei geringeren Spannungen und sind bis zum Erreichen des Bruchs ausgeprägter als bei den 90°-Proben. Der Erklärungsansatz I basiert somit auf einer richtungsabhängigen Kristallplastizität aufgrund einer richtungsabhängigen Versetzungsdichte.

Gegen diese These sprechen jedoch die Spannungs-Dehnungs-Verläufe. Die Verzerrungsraten sind insbesondere zu Beginn des Versuchs in einem quantitativ vergleichbaren Bereich. Erst zum Ende der Verfestigung scheint es zu Unterschieden im Verformungsverhalten zu kommen. Beispielhaft sind dazu in Abbildung 5.8 die Verzerrungsraten der Spannungs-Dehnung-Verläufe der Versuche bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 1$  MPa für Block 2016 und in Abbildung 5.9 für Block 2020 zu sehen. Die Rate wird im *Python*-Skript nach Gleichung (5.2) berechnet. Dabei wird über die Messpunkte *i* iteriert. Durch die Vielzahl an Messwerten ergibt sich ein Rauschen in der Berechnung der Rate. Um dieses Rauschen in der Rate herauszufiltern, wird das Intervall *i* – *e* über die Bestimmung von *e* ausreichend groß gewählt. Für Block 2016 wurde *e* = 150 und für Block 2020 *e* = 50 gewählt. *e* ist unterschiedlich groß, da das Messintervall bei den Versuchen an Block 2016 kleiner war und somit mehr Messwerte vorliegen.

$$\dot{\sigma}_{(i+e)/2} = \frac{\sigma_i - \sigma_{(i-e)}}{\epsilon_i - \epsilon_{(i-e)}} = \frac{\Delta \sigma_{Diff,n}}{\Delta \epsilon_{1,n}}$$
(5.2)

Bis zur Krümmungsänderung sind die Kurven annähernd kongruent. Im Anschluss lässt sich jedoch eine Änderung der Raten beobachten, die in einer unterschiedlichen Bruchdehnung mündet. Der Bruchpunkt wird durch den Nulldurchgang der Ordinate gekennzeichnet. Für einen bedeutenden Unterschied in der Kristallplastizität wäre nach [Lüdeling und Günther, 2023] ein markanterer Unterschied in den Raten zu einem früheren Zeitpunkt erforderlich.

Ein unterschiedliches plastisches Verhalten aufgrund der unterschiedlich hohen Versetzungsdichte in axialer Richtung und das damit verbundene Verfestigungsverhalten sind somit nicht für die Unterschiede in den Bruchdehnungen verantwortlich. Die Kristallplastizität rückt damit in den Hintergrund und die Korngrenzeffekte in den Vordergrund. Die Bruchdehnung resultiert nicht nur aus den intrakristallinen, sondern auch aus den interkristallinen Verformungsprozessen. Daher sollen in einem weiteren Erklärungsansatz die Mechanismen von Scherbewegungen und Mikrorissbildung im Bereich der Korngrenzen näher betrachtet werden.

### 5.3 Erklärungsansatz II: Zugfestigkeit

Der Begriff "Korngrenzeffekte" beinhaltet Scherbewegungen der Körner auf den Korngrenzen sowie Rissöffnungen an den Grenzen aufgrund dieser Scherbewegun-

gen. Der Mechanismus wird ebenfalls von der Versetzungsdichte beeinflusst, sodass die Grundlage für Erklärungsansatz I nicht hinfällig ist. Jedoch sind auch weitere Effekte von Relevanz, auf welche nun näher eingegangen wird.

In experimentellen Untersuchungen konnte bereits nachgewiesen werden, dass in reinem Steinsalz der Kontaktbereich der Korngrenzen eine Schwächezone darstellt, s. [Manthei, 2005; Bourcier et al., 2012]. An Versetzungshindernissen, wie an einer Korngrenze, kommt es zu Versetzungsakkumulationen und somit lokal zu Spannungserhöhungen. Diese führen, sofern sie nicht durch Kriechprozesse abgebaut werden können, zur Mikrorissbildung. Die Mikrorissbildung findet vornehmlich in den schwächeren Bereichen des Gesteins, in diesem Fall im Bereich der Korngrenzen, statt.

Da für das untersuchte Steinsalz des Blocks 2020 kein Bruchverhalten wie für Trennflächen im Fels beobachtet werden konnte, ist anzunehmen, dass die Zugfestigkeit im Bereich der Korngrenzen von Bedeutung ist. Die Zugfestigkeit wird in der Felsmechanik häufig mit einem sogenannten "tension cut off" in das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium implementiert. Dieser schneidet die Schergerade auf Höhe der Zugfestigkeit mit einer senkrechten Gerade ab, siehe Abbildung 5.10.



Abbildung 5.10: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium mit "tension cut off"

Ein Bruch tritt also auf, sobald die auftretenden Zugspannungen die Zugfestigkeit oder wie bereits erläutert, die Schubspannungen die mobilisierbare Scherfestigkeit übersteigen. Dies gilt in einem geschieferten Gestein sowohl für die Gesteinsmatrix als auch für die Trennfläche, wobei individuelle Parameter gelten können.

Dieser Zusammenhang lässt sich nun auf das untersuchte Steinsalz übertragen, wobei nach wie vor angenommen wird, dass die Bereiche der Korngrenzen die Schwächezonen darstellen. Dieser Bereich wird folgend als "Kontaktbereich" bezeichnet. Lokale Bruchzustände werden also zunächst in diesen Kontaktbereichen erreicht und eine Vernetzung der so entstehenden Mikrorisse findet vornehmlich entlang der Korngrenzen bis zum Erreichen des globalen Bruchzustands, gekennzeichnet durch das

Erreichen einer maximal aufnehmbaren Spannung, statt. Maßgeblich sind dabei nicht die auf den Korngrenzen wirkende Reibung oder die im Kontaktbereich vorhandene Kohäsion, wie in Abschnitt 4.2.5 gezeigt wurde. Stattdessen könnte die Zugfestigkeit im Bruchverhalten von Bedeutung sein. Es wird angenommen, dass die Zugfestigkeit im Kontaktbereich der Korngrenzen geringer ist als die Zugfestigkeit im Bereich des Korns:

 $\sigma_{Z,KG} < \sigma_{Z,K}$ 

Während des Versuchsablaufs erhöhen sich axiale Kompression sowie radiale Extension der Probe. Durch diese Querdehnung entstehen lokale Spannungszustände, die unterhalb der durch den Manteldruck verursachten Druckspannung liegen. Das resultiert in lokalen Spannungszuständen, die in radialer Richtung im Zugbereich liegen. Diese Zugspannung überschreitet die Zugfestigkeit im Kontaktbereich. Infolgedessen reißt die Probe entlang der senkrecht zur maximalen Hauptspannung orientierten Korngrenzen auf.

Zur Veranschaulichung soll das bereits in Abschnitt 5.2 genutzte, vereinfachte Modell herangezogen werden. Dazu ist in Abbildung 5.11 jeweils der Längsschnitt einer Probe mit einem Fallwinkel von 0° und 90° zu sehen.



Abbildung 5.11: Modellvorstellung Erklärungsansatz II

Im Modell wird deutlich, dass bei einer senkrechten Schichtung (90°) das Risswachstum erleichtert wird. Die Körner weisen eine bevorzugte Ausrichtung in Richtung der Axialspannung auf. Die Korngrenzen sind in dieser Richtung durchgängig. Der Kontaktbereich öffnet sich senkrecht zum Verlauf der Korngrenzen also in Richtung des Manteldrucks. Wie zuvor erwähnt, können lokale Spannungszustände im Zugbereich auftreten. Der Kontaktbereich wird in radialer Richtung auf Zug belastet. Bei Überschreiten der Zugfestigkeit entsteht ein initialer Riss (in Abbildung 5.11 als Punkt in der Mitte der Probe gekennzeichnet). Dieser Riss wächst ohne weitere Hindernisse entlang der Korngrenze bis die Probe über ihre gesamte Höhe gerissen ist. Auch in der 0°-Probe (rechts in Abbildung 5.11) entsteht mutmaßlich im Kontaktbereich der axial gerichteten Korngrenzen ein initialer Riss, auch hier als Punkt gekennzeichnet. Dieser trifft während des weiteren Aufreißens in axialer Richtung jedoch immer wieder auf Körner und muss daher einen Umweg über radial verlaufende und somit stark überdrückte Kontaktbereiche (rot) oder direkt durch das "festere" Korninnere (blau gestrichelt) nehmen. In jedem Fall ist der Bruch erschwert, was zu höheren axialen Dehnungen führt.

Bei höheren Manteldrücken werden die axial verlaufenden Kontaktbereiche stärker überdrückt. Die Probe ist insgesamt stärker eingespannt, sodass der Unterschied zwischen Kontaktbereich und Korninnerem keine weitere Relevanz hat. Hier lässt sich im Materialverhalten keine Richtungsabhängigkeit mehr beobachten. Dies legen auch die Versuche bei einem Manteldruck von 2 MPa bei einem Fallen von  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$ nahe. Sowohl Bruchspannung als auch Bruchdehnung zeigen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Fallwinkeln. Die Versuche, die bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$  gefahren wurden, bekräftigen diese Annahme. Auch wenn kein Bruch erreicht wird, zeigt sich ein sehr kongruentes Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Kurven. Der Bruchzustand wird bei ähnlichen Spannungen und Dehnungen erwartet. Die Versuche, die bei Manteldrücken von 5 MPa und 10 MPa gefahren wurden, zeigen ebenfalls eine jeweils sehr ähnliche Verzerrungsrate bei beiden Fallwinkeln. Der leichte Versatz zwischen den Kurven lässt jedoch die Mutmaßung zu, dass die 0°-Proben hier bei geringeren axialen Dehnungen den Bruchzustand erreichen. Dies wäre ein Wechsel im anisotropen Verhalten. Für eine abschließende Beurteilung müssten Versuche in diesem Spannungsniveau bis zum Bruch gefahren werden. Dies war im Rahmen der Arbeit nicht vorgesehen.

Zu berücksichtigen ist bei diesem Erklärungsansatz die getroffene Vereinfachung durch die Modellvorstellung. Es wird nicht *die* durchgehende Korngrenze bzw. den durchgehenden Kontaktbereich und auch nicht *den* einen idealen Riss geben, sondern eine Vielzahl von Mikrorissen, die schließlich zu einem Gesamtversagen führen. Dies ist beispielhaft in Form des konjugierten Scherflächenpaars in Abbildung 5.12 dargestellt.



Abbildung 5.12: Versagensmechanismus aufgrund von Extensionsrissen, nach [Herget, 1988] und [Manthei, 2005]

Ein solches Bild des konjugierten Scherflächenpaars zeigt sich beispielsweise für die Probe Bo-2-17 ( $\sigma_3 = 1$  MPa), welche nach dem Ausbau aus der Zelle mittels µCT untersucht wurde. Abbildung 5.13 zeigt eine 3D-Ansicht der ausgebauten Probe, Abbildung 5.14 zwei Längsschnitte sowie einen Querschnitt. Neben dem konjugierten Scherflächenpaar ist die bevorzugte Orientierung der Risse in Richtung der maximalen Hauptspannung  $\sigma_1$  zu erkennen.

Numerische Berechnungen, welche den Versuch simulieren, bekräftigen die These. Die Berechnungen wurden im Rahmen einer studentischen Arbeit am IGG mit dem numerischen Programmsystem *FLAC3D* unter Verwendung des Stoffmodells *TUBSsalt* durchgeführt, s. [Kuhlmann, 2022]. Im äußeren Bereich der Probe werden im Vorbruchbereich Zugspannungen ermittelt. Es ist somit davon auszugehen, dass initiale Risse zunächst in diesem Bereich auftreten und somit eine Entlastung des Bereichs stattfindet. Die Spannungen konzentrieren sich dann bis zum vollständigen Versagen auf den inneren Bereich der Probe.

Durch weitere Auswertungen der Messergebnisse lässt sich die hier aufgestellte These unterstützen. So zeigt sich bei den Versuchen an Block 2016, dass bis zum Erreichen des Bruchs eine höhere spezifische Formänderungsarbeit geleistet wird. Die spezifische Formänderungsarbeit *U* ist nach [Menzel und Schreiner, 1977] als Fläche unter-



Abbildung 5.13: 3D-Ansicht eines µCT-Scans der nach dem Versuch ausgebauten Probe Bo-02-17



(a) Querschnitt, x-y-Ebene

(b) Längsschnitt, y-z-Ebene

(c) Längsschnitt, x-z-Ebene

Abbildung 5.14: µCT-Aufnahmen der nach dem Versuch ausgebauten Probe Bo-2-17

halb der Spannungs-Dehnungs-Kurve definiert, s. Abbildung 5.15 und Gleichung (5.3). Ist die Dilatanzgrenze bekannt, kann zusätzlich der rein plastische Anteil betrachtet werden, s. Gleichung (5.4).

$$U = \int \sigma_{Diff,n} \cdot d\epsilon_{1,n} \tag{5.3}$$

$$U_D = \int (\sigma_{Diff,n} - \sigma_D) \cdot d\epsilon_{1,n} \tag{5.4}$$



Abbildung 5.15: Formänderungsarbeit *U*, nach [Menzel und Schreiner, 1977] und [Günther, 2009]

Für die meisten im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuche ist die Dilatanzgrenze nicht bekannt, sodass die Formänderungsarbeit inklusive des elastischen Anteils berechnet wird. Da bereits gezeigt wurde, dass Verformungen elastischer Natur nur einen geringen Anteil der Gesamtverformung ausmachen, ist dieser auch bei der gesamt erzielten Formänderungsarbeit zu vernachlässigen. Die Formänderungsarbeit kann demnach als plastische Arbeit interpretiert werden. Nach Gleichung (5.5) wird die Formänderungsarbeit bis zum Erreichen des Bruchpunkts  $U_B$  berechnet.

$$U_B = \int_0^{\epsilon_B} \sigma_{Diff,n} \cdot d\epsilon_{1,n} \tag{5.5}$$

Während die Axialdehnung dimensionslos ist und Werte zwischen 0 und etwa 0,22 annehmen kann, ist die Differenzspannung nicht normiert. Sie erreicht zweistellige Werte und beeinflusst das Ergebnis der Formänderungsarbeit somit deutlich stärker als die Bruchdehnung. Da hier jedoch die Bruchdehnung im Fokus liegt, soll die Berechnung der Formänderungsarbeit so angepasst werden, dass der Axialdehnung eine höhere Gewichtung zukommt. Dazu wird die Differenzspannung normiert, indem sie durch die erreichte Bruchspannung dividiert wird. Die normierte Formänderungsarbeit berechnet sich demnach wie folgt:

$$U_{B,norm} = \int_0^{\epsilon_B} \frac{\sigma_{Diff,n}}{\sigma_B} \cdot d\epsilon_{1,n}.$$
(5.6)

Abbildung 5.16 zeigt die normierte Formänderungsarbeit  $U_{B,norm}$  für die Versuche an Block 2016 über die verschiedenen Manteldrücke. Für Manteldrücke von 1 MPa und 1,5 MPa zeigt sich, dass die Formänderungsarbeit der 0°-Proben höher als die der



Abbildung 5.16: Formänderungsarbeit bis zum Bruchzustand bei Block 2016



Abbildung 5.17: Formänderungsarbeit bis zum Bruchzustand bei Block 2020

90°-Proben ist. Im Mittel gilt dies auch für die Versuche bei einem Manteldruck von 0,5 MPa. Bei  $\sigma_3 = 2$  MPa ist die Formänderungsarbeit der 90°-Probe etwas größer als die der 0°-Probe. Für die Manteldrücke von 0,5 bis 1,5 MPa ergibt sich somit, dass bei den 0°-Proben eine größere Formänderungsarbeit bis zum Erreichen des Bruchs geleistet wurde.

Der vorgestellte Erklärungsansatz legt des Weiteren nahe, dass es bei den 90°-Proben bereits bei geringeren Axialdehnungen zu höheren Volumendehnungen kommt, Mikrorissbildung findet hier aufgrund des vereinfachten Risswachstums bereits früher und stärker statt. Auswertungen der Volumendehnungen für die Versuche an Block 2016 bestätigen dies.

Durch die Kalibrierung des über die Spindelpumpe geförderten Ölvolumens war es möglich, eine qualitative Abbildung der Volumendehnung der Probe zu erhalten. Im elastischen bzw. im frühen plastischen Bereich der axialen Verformungen ist die Bestimmung der Volumenänderung aufgrund der nur geringen geförderten Mengen an Öl sehr sensibel. Gleichzeitig spielen in dieser Anfangsphase der Kompression der Faktor Ölkompressibilität und die damit verbundenen temperaturbedingten Einflüsse eine große Rolle bei der Änderung des Ölvolumens. Nur durch eine angepasste Versuchsdurchführung können diese Einflüsse eliminiert werden. Eine alleinige Kalibrierung des Ölvolumens kann dem leider nicht gerecht werden, sodass die kalibrierten Kurven nicht für die Bestimmung der Dilatanzgrenze genutzt werden können. Im späteren Verlauf des Versuchs bestimmt der Faktor Ölkompressibilität die Änderung des Ölvolumens nicht mehr maßgeblich. Daher ist das geförderte Ölvolumen sowie die daraus berechnete Volumendehnung im späten Vorbruch- sowie im Bruchbereich der Proben auch quantitativ belastbar.

Abbildung 5.18 zeigt die Volumendehnungen der Versuche, die an Block 2016 durchgeführt wurden und den Bruchzustand erreicht haben. Für die Versuche bei Manteldrücken unter 2 MPa zeigt sich eine deutlich frühere Zunahme der Volumendehnung bei den 90°-Proben. Bei  $\sigma_3 = 2$  MPa zeigt sich bei der 0°-Probe ein früherer Anstieg, wobei der Unterschied sehr gering ausfällt. Die frühere Zunahme der Volumendehnung bei Manteldrücken von 0,5 bis 1,5 MPa der 90°-Proben lässt sich auf das vereinfachte und somit erhöhte Risswachstum zurückführen.

Abbildung 5.17 zeigt nun die Ergebnisse der normierten Formänderungsarbeit der Versuche an Block 2020 bei  $\beta = 0^{\circ}$  und  $\beta = 90^{\circ}$ . Die Proben, die bei einem Manteldruck von 0,1, 1,0 und 1,5 MPa belastet wurden, belegen die These. Es zeigt sich eine höhere Formänderungsarbeit bei geringeren Fallwinkeln. Die Ergebnisse für  $\sigma_3 = 0,5$  MPa geben das eindeutige Bild jedoch nicht wieder. Es ist kein Trend erkennbar. Die Verläufe der Volumendehnung für Block 2020 sind teilweise annähernd kongruent. Abbildung 5.19 zeigt zur besseren Differenzierbarkeit daher nur einen Teilbereich des Versuchszeitraums. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Formänderungsarbeit.









Die Ergebnisse bei einem Manteldruck von 0,5 MPa passen nicht zur These, während die restlichen Serien die Beobachtung im Mittel bestätigen. Für Block 2020 sind die Ergebnisse jedoch insgesamt weniger eindeutig.

# 5.4 Diskussion und Einordnung des Erklärungsansatzes "Zugfestigkeit"

Dieser Abschnitt soll die unterschiedlich ausgeprägte Anisotropie zwischen den Blöcken im Hinblick auf die aufgestellten Erklärungsansätze diskutieren. Dazu sollen die Unterschiede in der Makro- und Mikrostruktur der beiden Blöcke noch einmal genauer betrachtet werden. Bereits in Abschnitt 4.1 wurde festgestellt, dass die Körner in Block 2016 mit einer durchschnittlichen Größe von 1,7 bis 2,7 mm kleiner als die des Blocks 2020 mit, je nach Homogenbereich, 3,4 bis 7,5 mm sind. Zudem zeigt sich das Salzgefüge in Block 2016 deutlich homogener als in Block 2020. Die Heterogenität des Blocks 2020 äußert sich in einer größeren Bandbreite der Korngröße.

Der Erklärungsansatz der Zugfestigkeit stellt die Korngrenzeffekte in den Mittelpunkt. Somit ist anzunehmen, dass auch die Korngröße respektive eine heterogene Korngrößenverteilung Einfluss auf das Bruchverhalten hat. Auch kann das Verhältnis aus Korngröße zu Probengröße von Relevanz sein. In [Rißler, 2022] heißt es: "Der Durchmesser des Prüfkörpers soll mindestens das Zehnfache des größten Einzelkorndurchmessers des Gesteins betragen [...]", s. [Rißler, 2022, S.7]. Block 2020 weist im Mittel eine Korngröße von 10 mm auf, sodass der Probendurchmesser lediglich das fünffache beträgt. Hinzu kommen teilweise auch größere Korndurchmesser, die das Verhältnis Probendurchmesser:Korndurchmesser weiter verringern und die Güte der Versuchsergebnisse mindern können.

Die heterogenen Ergebnisse am Block 2020 könnten somit auch auf die heterogene Korngrößenverteilung sowie auf das ungünstige Verhältnis zwischen Korngröße und Probengröße zurückzuführen sein. Es lassen sich bei Block 2020 Proben mit einer eher homogenen und Proben mit einer sehr heterogenen Korngrößenverteilung identifizieren. Zudem können die homogenen Proben in solche mit einer fein- bis mittelkristallinen Körnung und in grobkristalline Proben eingeteilt werden. Zur Einteilung wurden die Fotos der Proben vor dem Versuch genutzt. Die Proben wurden jeweils aus drei Perspektiven auf die Mantelfläche fotografiert, um diese möglichst vollständig zu dokumentieren. Anhang D.2 enthält diese Bilder für alle Proben des Blocks 2020.

Hinsichtlich der Kategorisierung der Proben ist zu erwähnen, dass die Beurteilung keinen harten Grenzen unterlag, rein optisch und letztlich somit auch ein Stück weit subjektiv durch die Betrachterin erfolgte.

Ducho	Manteldruck $\sigma_3$	Fallwinkel $\beta$	
Frobe	[MPa]	[°]	
Bo-2-114	1,0	90	
Bo-2-112	1,5	90	
Bo-2-110	20,0	90	

Tabelle 5.1: Homogene grobkristalline Proben aus Block 2020

Eingehender untersucht werden sollen nun die homogenen grobkristallinen sowie die heterogenen Proben. Es wurden insgesamt drei Proben als homogen und grobkristallin eingestuft, siehe Tabelle 5.1. Alle Prüfkörper haben einen Fallwinkel von 90°. Die Proben Bo-2-114 und Bo-2-112 haben im Versuch den Bruchzustand erreicht. Sie weisen innerhalb der Serie jeweils die geringste Bruchspannung bei den Proben mit gleichem Fallwinkel ( $\beta = 90^{\circ}$ ) sowie insgesamt die geringste Bruchdehnung auf, vgl. Abbildung 4.25 und Tabelle C.1. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da die Bruchspannungen bei kleinen Körnern höher sind, siehe Abschnitt 2.4.1, Stichwort "Kornfeinung". Die gegenüber den 0°-Proben geringere Bruchdehnung wäre gemäß der obigen These so zu erklären, dass aufgrund der Elongation ein weniger verzweigtes Risswachstum stattfindet. Dieses Verhalten wird durch die insgesamt geringere Anzahl an Korngrenzen aufgrund der großen Körner zusätzlich verstärkt. Das müsste sich entsprechend auch in der Brucharbeit widerspiegeln. Für die Proben Bo-2-114 und Bo-2-112 kann das bestätigt werden. Es wird innerhalb der Serie jeweils die geringste Brucharbeit geleistet. Für Bo-2-110 kann dieser Wert nicht ermittelt werden, da die Probe nicht bis zum Bruch gefahren wurde.

Ein Blick auf die Proben nach Ausbau aus der Versuchseinrichtung soll als weitere Möglichkeit zur Einschätzung des Erklärungsansatzes herangezogen werden. Abbildung 5.20 und Abbildung 5.21 zeigen dazu Fotos der Proben Bo-2-114 und Bo-2-112 vor und nach dem Versuch aus jeweils der gleichen Perspektive.

Insbesondere bei Bo-2-112 lässt sich erkennen, dass ein Abscheren der Probe im Bereich entlang einer Korngrenze stattfand. Ein großes Korn, dass sich auf dem Foto oben rechts in der Probe befindet, hat sich als Ganzes in den Prüfkörper hinein gedrückt. Dies kann als Indiz für eine Rissentwicklung an den Korngrenzen gewertet werden.

Abbildung 5.22 zeigt Bilder der Probe Bo-2-110 vor und nach dem Versuch aus allen drei Perspektiven auf die Mantelfläche. Diese Probe ist im Versuchsablauf nicht gebrochen, sodass sie sich nicht im Nachbruchbereich befand. Der Versuch endete im Verfestigungsbereich, sodass die Bilder der ausgebauten Probe diesen dokumentieren



Abbildung 5.20: Probe Bo-02-114 vor und nach dem Versuch ( $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$ )



Abbildung 5.21: Probe Bo-2-112 vor und nach dem Versuch ( $\sigma_3 = 1.5 \text{ MPa}$ )

und Riss- bzw. Bruchbilder nicht durch weitere Rissentwicklung im Nachbruchbereich überlagert worden sind.

Auf den Bildern lassen sich teilweise die vor dem Versuch nur latent sichtbaren Korngrenzen nun besser identifizieren. Sie erscheinen deutlich heller bzw. weißer als vor dem Versuch. Dies lässt auf eine Öffnung im Bereich der Korngrenzen schließen. Zugleich lassen sich aber auch vertikale Risse in Bereichen ausmachen, auf denen vor dem Versuch keine Korngrenzen erkennbar waren. Scheinbar hat hier eine Rissentwicklung auch transkristallin, also durch das Korn hindurch stattgefunden. Dies wird vorrangig auf den im Vergleich höheren Manteldruck von 20 MPa zurückgeführt. Die Korngröße dürfte jedoch auch eine Rolle spielen, da aufgrund der großen Körner weniger Korngrenzen im begrenzten Probenvolumen vorhanden sind.

Probe	Manteldruck $\sigma_3$ [MPa]	<b>Fallwinkel</b> β [°]
Bo-1-135	0,1	0
Bo-1-133	0,5	0
Bo-1-134	1,5	0
Bo-1-128	2,0	0
Bo-1-132	20,0	0

Tabelle 5.2: Proben mit heterogener Korngrößenverteilung aus Block 2020

Als sehr heterogen können insgesamt fünf Proben identifiziert werden, siehe Tabelle 5.2. Dies sind ausschließlich Proben mit einem Fallwinkel von  $\beta = 0^{\circ}$ . Bei diesen Prüfkörpern zeigt sich im oberen Drittel, bzw. in der oberen Hälfte, ein feinkristalliner Bereich. Die beiden unteren Drittel, bzw. die untere Hälfte, ist als mittel- bis grobkristallin zu bezeichnen.

Die Ergebnisse hinsichtlich der Bruchspannung sind innerhalb dieser heterogenen Proben ebenfalls heterogen. Bei Manteldrücken von 0,1 MPa und 0,5 MPa weisen die heterogenen Proben die höchsten Bruchspannungen auf. Hinsichtlich der Bruchdehnung lässt sich keine spezifische Aussage treffen. Zu möglichen Bruchfiguren kann keine Aussage getroffen werden, da beide Proben über den gesamten Versuchsablauf in ihrer Mitte in kleinste Bruchstücke zerfallen sind und nicht als Ganzes ausgebaut werden konnten.

Bei einem Manteldruck von 1,5 MPa wird bei der heterogenen Probe die geringste Bruchspannung erreicht. Der Prüfkörper Bo-1-134 zeigt dabei jedoch nicht auch die geringste Bruchdehnung. Zwei der drei 90°-Proben brechen bei kleineren Dehnungen. Abbildung 5.23 zeigt die Probe vor und nach dem Versuch. Zu erkennen ist ein nahezu horizontaler Trennbruch, der im Bereich des Übergangs zwischen fein- und



Abbildung 5.22: Probe Bo-2-110 vor und nach dem Versuch ( $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ )

grobkristalliner Struktur liegt. Hier könnte der Übergangsbereich als Schwächezone interpretiert werden.



Abbildung 5.23: Probe Bo-1-134 vor und nach Versuch ( $\sigma_3 = 1.5$  MPa)

Bei einem Manteldruck von  $\sigma_3 = 2$  MPa zeigen sich keine Einflüsse bei der heterogenen Probe Bo-1-128. Abbildung 5.24 zeigt die Probe vor und nach dem Versuch. Es lässt sich beobachten, dass die besonders großen Körner in ihrem Aussehen milchiger erscheinen. Hier sind vermeintlich auch transkristalline Risse entstanden, die sich aber, zumindest im außenliegenden Bereich, nicht makroskopisch geöffnet haben. Die Kontaktbereiche der Korngrenzen zwischen den großen Körnern sind nach dem Versuch ebenfalls deutlich heller, was auf eine Öffnung dieser schließen lässt. Die außen liegenden großen Körner scheinen als Ganzes "abgeschalt" zu werden.

Auch die Probe Bo-1-132, welche nur den Verfestigungsbereich innerhalb des Versuchs abbildet, zeigt kein gesondertes Verhalten innerhalb der Serie  $\sigma_2 = 20$  MPa. Da Bo-1-132 nicht gebrochen ist, kann an der ausgebauten Probe ebenfalls eine reine Einschätzung zum Vorbruchverhalten vorgenommen werden. Abbildung 5.25 zeigt die Probe vor und nach dem Versuch aus den drei unterschiedlichen Perspektiven.

Die obigen Beobachtungen können auch hier gemacht werden. Die Probe erscheint insgesamt milchiger, auch die großen Körner weisen erkennbare Rissentwicklung auf. Diese scheint auch hier transkristallin erfolgt zu sein. Erneut sind auf den Fotos zudem die nach dem Versuch heller erscheinenden Kontaktbereiche der Korngrenzen zu



Abbildung 5.24: Probe Bo-1-128 vor und nach Versuch ( $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ )

erkennen. Die Fotos bekräftigen somit, dass diese innerhalb der Rissentwicklung von besonderer Bedeutung sind.

Insgesamt könnte für die heterogenen Proben folgender Erklärungsansatz unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.3 erläuterten Zusammenhänge herangezogen werden. Die sehr großen Körner treten bei allen Proben in ihrer unteren Hälfte über den gesamten radialen Querschnitt auf. Durch ihre Elongation in radialer Richtung sind nur wenige Körner und somit wenige Korngrenzen in axiale Richtung über den Querschnitt der Probe vorhanden. Es ist vorstellbar, dass die Rissentwicklung hier vorwiegend transkristallin erfolgen muss, da nur wenige bis keine Korngrenzen in axialer Richtung zur Verfügung stehen. Da das Korninnere als fester gilt, sind höhere Spannungen bis zum Erreichen des Bruchs notwendig.

Dies spiegeln die Proben Bo-1-135 und Bo-1-133 bei einem Manteldruck von 0,1 und 0,5 MPa wider. Je höher der Manteldruck, desto höher ist auch die lokale Druckspannung im Kontaktbereich der Korngrenzen, sodass der Unterschied zwischen Korninnerem und Korngrenze, und somit trans- und interkristalliner Rissentwicklung, nicht mehr zum Tragen kommt. Daher lässt sich bei den Manteldrücken von 2 MPa und 20 MPa kein gesondertes Verhalten bei den heterogenen Proben beobachten.

Die geringe Bruchspannung der Probe-1-134 lässt sich jedoch nicht erklären. Möglicherweise liegt hier eine Fehlstelle in der Probe vor, was auch das geringe Spannungs-



Abbildung 5.25: Probe Bo-1-132 vor und nach Versuch ( $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ )

niveau zu Beginn der Verfestigungsphase erklären könnte.

Auch die 30°- und 60°-Proben weisen Heterogenitäten auf, siehe Tabelle 5.3.

Probe	Manteldruck $\sigma_3$ [MPa]	<b>Fallwinkel</b> β [°]
Bo-3-207	0,5	30
Bo-4-211*	0,5	60
Bo-4-210*	1,5	60
Bo-3-205	2,0	30
Bo-4-214**	2,0	60

Tabelle 5.3: Heterogene Proben mit Fallwinkel  $\beta = 30^{\circ}$  und  $\beta = 60^{\circ}$ 

\*: geringer grobkristalliner Anteil

\*\*: hoher grobkristalliner Anteil

Die Proben, die zwar eine Heterogenität aufweisen, dabei jedoch nur einen geringen grobkristallinen Anteil besitzen, fallen in ihrem Spannungs-Dehnungs- bzw. Bruchverhalten nicht gesondert auf. Innerhalb der Serie mit einer Mantelspannung von 0,5 MPa weist die Probe Bo-3-207 die höchste Bruchspannung und -dehnung auf. Sie besteht etwa jeweils zur Hälfte aus feinkristallinem und aus mittel- bis grobkristallinem Korn. Die höheren Werte werden wie bei den heterogenen Proben mit 0°-Schichtung auf eine notwendige transkristalline Rissentwicklung zurückgeführt.

Bei  $\sigma_3 = 2$  MPa brechen die Proben insgesamt bei geringeren Spannungen und Dehnungen als die 0°- und die 90°-Probe. Der Unterschied zwischen den beiden Proben selbst könnte zunächst auf eine geringere Scherfestigkeit der Kontaktbereiche der Korngrenzen (vgl. Abschnitt 2.6.1) zurückgeführt werden. Auch das Bruchbild der Probe Bo-4-214, die bei einem Fallwinkel von 60° belastet wurde, lässt diese Schlussfolgerung zu, s. Abbildung 5.26. Das Abscheren der Probe scheint entlang der Korngrenze, welche in Richtung der Schichtung liegt, stattgefunden zu haben. Allerdings müsste genau diese Probe dann auch die geringere Bruchspannung aufweisen, was nicht der Fall ist. Zudem konnte ein solches Verhalten bei Manteldrücken von 0,5 und 1,5 MPa nicht beobachtet werden.

Da weder der Unterschied innerhalb der Serie noch die insgesamt geringen Werte für Bruchspannung und -dehnung erklärt werden können, werden weiterhin mögliche Fehlstellen im Gefüge bei beiden Proben vermutet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Proben mit grobkristallinen Bereichen bei einem Fallen von 90° eine geringere Bruchspannung und -dehnung aufgrund möglicher geringerer Rissverzweigung erzielen. Bei  $\beta = 0^\circ$  werden hingegen höhere Werte



Abbildung 5.26: Probe Bo-3-205 vor und nach Versuch ( $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ )



Abbildung 5.27: Probe Bo-4-214 vor und nach Versuch ( $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$ )

erreicht, da hier in den Bereichen mit großen Körnern potentiell vorrangig transkristallines Risswachstum auftritt. Bei den Fallwinkeln 30° und 60° scheinen die großen Körner ebenfalls zu höheren Bruchspannungen und -dehnungen zu führen. Hier ist das Bild jedoch weniger eindeutig und zudem ist eine geringere Anzahl an Proben im Triaxialversuch untersucht worden.

Die Unterschiede in der beobachteten Anisotropie zwischen Block 2016 und Block 2020 lassen sich somit ansatzweise mit der Heterogenität der Proben erklären. Diese steht dabei nicht im Widerspruch zum Erklärungsansatz der Zugfestigkeit. Dennoch darf nicht unerwähnt bleiben, dass diese Vermutungen auf subjektiver Bildauswertung und statistisch gesehen wenigen Versuchen basieren. Ob die beobachteten Öffnungen der Kontaktbereiche der Korngrenzen auch die initialen Risse innerhalb der Verfestigungsphase waren, oder ob diese erst nach dem Bruchpunkt aufgetreten sind, lässt sich auf Basis der vorliegenden Fotos nicht belegen. Hierzu wären mikroakustische Untersuchungen notwendig. Bei diesen werden Aufnehmer an die Probe angebracht, welche die bei der Entstehung von Rissen ausgehenden akustischen Emissionen räumlich erfassen. Die Rissentstehung und -entwicklung in der Probe lässt sich somit während des laufenden Versuchs lokalisieren, vgl. [Manthei, 2005; Grosse und Ohtsu, 2008]. Diese Ergebnisse ließen sich mit zusätzlichen mikrocomputertomographischen Untersuchungen vor und nach der Versuchsdurchführung verifizieren.

Zusätzlich sollte ein ausreichendes Verhältnis von Korndurchmesser:Probendurchmesser garantiert werden. Die bei den 0°-Proben angenommene erhöhte transkristalline Rissentwicklung ließe sich mit ausreichend großen Prüfkörpern voraussichtlich verhindern.

Zur Bestätigung der These einer unterschiedlichen Zugfestigkeit bieten sich entsprechende Versuche an. In der Werkstoffprüfung wird dazu häufig ein einaxialer Zugversuch durchgeführt. Dieser ist in der Felsmechanik mit Schwierigkeiten verbunden, sodass hier in der Regel ein indirekter Zugversuch, auch Spaltzugversuch oder Brazilian-Test genannt, durchgeführt wird, vgl. [Wittke, 1984]. In [Lepique, 2022] werden zur Untersuchung einer möglichen Anisotropie der Spaltzugfestigkeit die entsprechenden Versuchsanordnungen aufgezeigt.
## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden insgesamt 62 triaxiale Kurzzeitfestigkeitsversuche an Steinsalz aus flacher Lagerung durchgeführt. Dabei wurden der anliegende Manteldruck sowie der Winkel zwischen Belastungsrichtung und Orientierung der Schichtung variiert. Schichtung beschreibt hier die Gefügeorientierung resultierend aus dem Sedimentationsprozess und der anschließenden Überprägung durch das Deckgebirge. Es liegt keine Schichtung durch Einlagerungshorizonte oder starke Verunreinigungen des verhältnismäßig reinen Steinsalzes vor. Die untersuchten Proben stammen aus zwei verschiedenen Großblöcken des Gewinnungsbergwerks Borth. Die Blöcke wurden hinsichtlich ihrer Makro- und Mikrostruktur analysiert und unterschieden sich im Wesentlichen in ihrer mittleren Korngröße, der Färbung des Gefüges sowie im Reinheitsgrad.

Die Triaxialversuche bestanden aus einer Konsolidierungs- und einer Kompressionsphase. In beiden Phasen wurde ein anisotropes Verhalten bei den axialen Verformungen der zylindrischen Proben beobachtet. Bei axialer Belastung senkrecht zur Schichtung zeigten sich höhere Dehnungen in der Konsolidierung sowie höhere Bruchdehnungen in der Kompressionsphase gegenüber den Proben, bei denen die axiale Belastung parallel zur Schichtung erfolgte.

Die unterschiedlich hohe axiale Dehnung in der Konsolidierung ist dabei auf eine unterschiedlich stark aufgelockerte Probe zurückzuführen. Diese Auflockerung ist wiederum durch den sekundären Spannungszustand im Gebirge vor der Gewinnung der Blöcke sowie durch die Gewinnung selbst beeinflusst. Es kann somit keine isolierte Betrachtung des Einflusses des Korngefüges stattfinden.

Für die Kompressionsphase sind die Ergebnisse beider Blöcke grundsätzlich vergleichbar. Es zeigen sich jedoch quantitative Unterschiede in den axialen Dehnungen. In den Bruchdehnungen wurde für Block 2016 zudem eine stärkere Anisotropie festgestellt. Die Ergebnisse der Proben aus Block 2020 sind heterogener, was auf die heterogene Korngrößenverteilung sowie auf das Verhältnis von Korngröße zu Probendurchmesser zurückgeführt wird. Es wurde gezeigt, dass das untersuchte flach gelagerte Steinsalz mit Schichtung in Form einer Gefügeorientierung (oblat bzw. gemischt prolat/oblat) und geringen Verunreinigungen sich nicht wie ein Festgestein mit Trennflächengefüge verhält. Obwohl der Kontaktbereich der Korngrenzen die Schwächezone darstellt, ist er nicht mit einer Trennfläche gleichzusetzen. Vielmehr scheint die Zugfestigkeit des Kontaktbereichs im Vergleich zur Zugfestigkeit des Korninneren geringer zu sein, was zu unterschiedlich hohen axialen Dehnungen bei verschiedenen Belastungsrichtungen führt.

Anisotrope Effekte waren hauptsächlich bei Manteldrücken zwischen 0,1 und 1,5 MPa feststellbar. Bei Manteldrücken ab 2MPa scheinen Korngrenzeffekte im Bruchverhalten keine signifikante Rolle zu spielen und das Korngefüge verhält sich isotrop. Diese Beobachtungen zeigen eine Praxisrelevanz bei kleinen Einspannungen, also im hohlraumnahen Bereich, der Hohlraumkontur. Offene Hohlräume sind bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle nur während der Betriebsphase zu erwarten. Zur Stabilisierung des Gebirges geht die Stilllegung bzw. der Verschluss des Endlagers mit einer Verfüllung der Hohlräume einher. Während der Betriebsphase ist insbesondere die Bildung der Auflockerungszone ein relevanter Prozess in der Hohlraumkontur. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit ist zu erwarten, dass sich die Auflockerungszone in einem Steinsalz mit vergleichbaren Eigenschaften, wie das hier untersuchte, anisotrop ausbildet. Dies könnte dazu führen, dass sich die Stöße stärker verformen und sie somit eine höhere Schädigung als Firste und Sohle aufweisen. Dabei handelt es sich nach den Ergebnissen dieser Arbeit jedoch um geringe Unterschiede. Die Bestätigung dieser Annahmen erfordert weitere Untersuchungen wie die Analyse der Zugfestigkeit sowie die Lokalisierung der Rissentwicklungen über mikroakustische Emissionsmessungen.

Die bisherige Arbeit konzentrierte sich ausschließlich auf das Kurzzeitfestigkeitsverhalten und dabei speziell auf das Bruchverhalten. Über längere Standzeiten ist bei Hohlräumen im Steinsalz jedoch insbesondere sein Kriechvermögen relevant. So könnte ein oblates bzw. gemischt oblates/prolates Korngefüge auf eine bevorzugte Kriechrichtung schließen lassen. Eine umfassende Untersuchung des Kriechverhaltens ist für ein vollständiges Verständnis daher von essentieller Bedeutung. Neben systematischen Kriechversuchen zur Bestimmung der Kriechraten der verschiedenen Kriechphasen spielt die Ermittlung der Dilatanzfestigkeit in den Kurzzeitfestigkeitsversuchen eine zentrale Rolle. Falls ein anisotropes Kriechverhalten festgestellt wird, wäre je nach Ausprägung der Anisotropie eine Relevanz des anisotropen Korngefüges über die Betriebsphase des Endlagers, dem Verschluss der Einlagerungsstrecken, vgl. [Stahlmann et al., 2015a], hinaus zu prüfen. Die Kriechprozesse beeinflussen einerseits die Bildung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) positiv, fördern aber auf der anderen Seite das Auspressen von potentiell kontaminierter Lösung.

Neben der Wichtigkeit, die Prozesse zu verstehen, ist es von Bedeutung, sie möglichst realitätsnah abzubilden. Sollte sich durch weitere Untersuchungen ein anisotropes Verhalten bestätigen, so wäre dies in die höherwertigen Stoffmodelle zu implementieren.

#### 6 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits jetzt ist festzuhalten, dass eine tensorielle Betrachtung der schädigungsinduzierten Volumendehnung von Vorteil wäre. Das Stoffmodell *TUBSsalt* teilt diese aktuell nur in die drei Hauptdehnungsrichtungen auf. Eine solche Weiterentwicklung ist jedoch durchaus komplex.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Anisotropie bei Steinsalz in flacher Lagerung auftreten kann. Sie sollte zunächst grundlegend weiter untersucht werden. Abhängig von den weiteren Erkenntnissen wären, sollte ein Standort für hochradioaktive Abfälle mit flach gelagertem Steinsalz in den Fokus rücken, für das dortige Gestein die Ausprägung sowie die spezifischen Eigenschaften einer möglichen Anisotropie zu kontrollieren und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

- Barabasch, J., Schmatz, J., Klaver, J., Schwedt, A., & Urai, J. L. (2023). Large grainsize-dependent rheology contrasts of halite at low differential stress: evidence from microstructural study of naturally deformed gneissic Zechstein 2 rock salt (Kristallbrockensalz) from the northern Netherlands. *Solid Earth*, 14(3), 271–291.
- Bauer, S. J., Song, B., & Sanborn, B. (2019). Dynamic compressive strength of rock salts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 113, 112–120.
- Becker, F., Bräuning, A., Hagenguth, G., Steinweller, M., & Wrede, V. (2014). Nr. 7 GeoPark Themen: Salz und Sole im GeoPark Ruhrgebiet (Geopark Ruhrgebiet e.V., Hrsg.).
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Liu, W., Minkley, W., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Thiemeyer, T., Völkner, E., & Wolf, J. (2018). KOSINA: Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany.
- Bonnet, M. (2017). Wiley-Schnellkurs Werkstoffkunde (1. Auflage). Wiley.
- Bornemann, O., Bäuerle, G., Behlau, J., & Mingerzahn, G. (2001). Endlagerprojekt Gorleben: Geologische BEarbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie): 1. Geologischer Ergebnisbericht (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.).
- Bourcier, M., Dimanov, A., Héripré, E., Raphanel, J. L., Bornert, M., & Desbois, G. (2012). Full field investigation of salt deformation at room temperature: Cooperation of crystal plasticity and grain sliding. In P. Bérest, M. Ghoreychi, F. Hadj-Hassen & M. Tijani (Hrsg.), *Mechanical behavior of salt VII: Proceedings of the 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Paris, France, 16-19 April 2012* (S. 37–43). CRC Press.
- Braitsch, O. (1971). Salt deposits, their origin and composition (Bd. 4). Springer.
- Brasser, T., Herbert, H. J., Miehe, R., & Schmidt, G. (2008). Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland: Anhang Wirtsgesteine: Potentielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften.
- Bräunig, A., & Kirchhof, J. (2009). Bergbau unter Naturschutzgebiet: Bewusste Wasserstandserhöhung des Xantener Altrheins durch Steinsalzgewinnung unter der Bislicher Insel. Kali und Steinsalz, (3), 12–21.

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2007). Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland: Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen.
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. (2020a). Zwischenbericht Teilgebiete. Abgerufen am 2. Januar 2023 unter https://www.bge.de/fileadmin/user\_upload/ Standortsuche/Wesentliche\_Unterlagen/Zwischenbericht\_Teilgebiete/Karte\_ Teilgebiete\_A4.jpg
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. (2020b). Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG.
- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.). (2021). Kompendium zum Stand von Wissenschaft und Technik bei der Planung und Ausführung geotechnischer Barrieren für Untertagedeponien im Salinargebirge: Kompendium des Arbeitskreises Salzmechanik AK 3.1 (1. Auflage). Papierflieger Verlag GmbH.
- Dressel, I., Hegemann, R., & Schleinig, J.-P. (2023). Geologische Einordnung und Probenahmeorte im Steinsalzbergwerk Borth für Salzuntersuchung an der TU Braunschweig.
- Dubey, R. K. (2018). Bearing of structural anisotropy on deformation and mechanical response of rocks: An experimental example of rocksalt deformation under variable compression rates. *Journal of the Geological Society of India*, 91(1), 109– 114.
- Dubey, R. K., & Gairola, V. K. (2000). Influence of structural anisotropy on the uniaxial compressive strength of pre-fatigued rocksalt from Himachal Pradesh, India. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(6), 993–999.
- Dubey, R. K., & Gairola, V. K. (2008). Influence of structural anisotropy on creep of rocksalt from Simla Himalaya, India: An experimental approach. *Journal of Structural Geology*, 30(6), 710–718.
- Düsterloh, U. (2009). Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlraumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen: Ein Beitrag zum Nachweis von Standsicherheit und Barrierenintegrität für untertägige Abfallentsorgungsanlagen und Hohlraumbauten des salinaren Berg- und Kavernenbaus [Habilitation]. Technische Universität Clausthal.
- Elliger, C. (2005). Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlaugen in Steinsalz bei der Endlagerung wärmeentwickelnder nuklearer Abfälle [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt.
- Epkenhans, I., Wacker, S., & Stahlmann, J. (2022). Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS) (Verbundprojekt: Teilprojekt D): Endbericht des Teilprojekts: 01.04.2016 bis 31.03.2019, verlängert bis 31.03.2022.
- FOSSGIS e.V. (2020). *OpenStreetMap*. Abgerufen am 17. März 2020 unter https://www. openstreetmap.de/karte.html

- Gährken, A. (2018). Untersuchungen zum Einfluss der Spannungsgeometrie auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig.
- Geologischer Dienst NRW (Hrsg.). (2016). *Geologie und Boden in Nordrhein-Westfalen* (1. Auflage). Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen Landesbetrieb.
- Gross, D., Hauger, W., & Wriggers, P. (2011). *Hydromechanik, Elemente der höheren Mechanik, numerische Methoden* (8. Aufl., Bd. 4). Springer.
- Gross, D., & Seelig, T. (2016). Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik (6., erweiterte Auflage). Springer Vieweg.
- Grosse, C., & Ohtsu, M. (Hrsg.). (2008). *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg.
- Grotzinger, J., & Jordan, T. (2017). Allgemeine Geologie (7. Auflage). Springer Spektrum.
- Günther, R.-M. (2009). Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens [Dissertation]. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Hampel, A., Lüdeling, C., Günther, R.-M., Salzer, K., Yildirim, S., Zapf, D., Epkenhans, I., Wacker, S., Gährken, A., Stahlmann, J., Sun-Kurczinski, J., Wolters, R., Herchen, K., & Lux, K.-H. (2022a). Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Synthesebericht.
- Hampel, A., Lüdeling, C., Günther, R.-M., Sun-Kurczinski, J., Wolters, R., Düsterloh, U., Lux, K.-H., Yildirim, S., Zapf, D., Wacker, S., Epkenhans, I., Stahlmann, J., & Reedlunn, B. (2022b). WEIMOS: Simulations of two geomechanical scenarios in rock salt resembling structures at WIPP. In J. de Bresser, M. R. Drury, P. A. Fokker, M. Gazzani, S. Hangx, A. R. Niemeijer & C. J. Spiers (Hrsg.), *The Mechanical Behavior of Salt X: Proceedings of the 10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (Saltmech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022* (S. 421–435). CRC Press.
- Hampel, A., Schulze, O., Heemann, U., Zetsche, F., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Hou, Z., Wolters, R., Düsterloh, U., Zapf, D., Rokahr, R., & Pudewills, A. (2007). BMBF-Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen; Synthesebericht; Projektlaufzeit: 01.04.2004 30.11.2006.
- Hansen, F. D., Kuhlman, K. L., & Sobolik, S. R. (2016). Considerations of the Differences between Bedded and Domal Salt Pertaining to Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste (U.S. Department of Energy, Hrsg.). Sandia National Laboratories.
- Hatzor, Y. H., & Heyman, E. P. (1997). Dilation of anisotropic rock salt: Evidence from Mount Sedom diapir. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7), 14853– 14868.
- Henneberg, M., Nowara, P., Hammer, J., Zulauf, J., & Zulauf, G. (2022). Depthdependent variation of microfabrics and deformation mechanisms in bedded

rock salt. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 173(1), 167– 191.

- Herchen, K., Popp, T., Düsterloh, U., Lux, K.-H., Salzer, K., Lüdeling, C., Günther, R.-M., Rölke, C., Minkley, W., Hampel, A., Yildirim, S., Staudtmeister, K., Gährken, A., Stahlmann, J., Reedlunn, B., & Hansen, F. D. (2018). WEIMOS: Laboratory Investigations of Damage Reduction an Creep at Small Deviatoric Stresses in Rock Salt. In S. Fahland, J. Hammer, F. D. Hansen, S. Heusermann, K.-H. Lux, W. Minkley, B. Frenzel & W. Liu (Hrsg.), *The mechanical behavior of salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018* (S. 175–192). Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR).
- Herget, G. (1988). Stresses in rock. Balkema.
- Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79(3-4), T63–T67.
- Kleber, W., Meyer, K., & Schoenborn, W. (1968). *Einführung in die Kristallphysik*. De Gruyter.
- Knauth, M. (2018). *Diskontinuumsmechanische Modellierung von Salzgesteinen* [Dissertation]. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Kuhlmann, J. (2022). Steinsalz aus der Grube Borth: Durchführung, Auswertung, Kalibrierung und numerische Modellierung von Triaxialversuchen [Studienarbeit]. Technische Universität Braunschweig.
- Küster, Y. (2011). Bromide characteristics and deformation mechanisms of naturally deformed rock salt of the German Zechstein Basin [Dissertation]. Georg-August-Universität Göttingen.
- Langer, M., Burckhardt, H., Dreyer, W., Duddeck, H., Haddenhorst, H.-G., Lux, K.-H., Neuber, H., Schmidt, M. W., Wallner, M., & Koch, R. (1984). Hohlraumbau im Salzgebirge, Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik: Teil A: Geologische und mechanische Grundlagen. In Deutsche Gesellschaft für Erdund Grundbau e.V. (Hrsg.), *Taschenbuch für den Tunnelbau* (S. 237–300). Verl. Glückauf.
- Lepique, M. (2022). Empfehlung Nr. 10: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben Spaltzugversuch. In Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Empfehlungen des Arbeitskreises Versuchstechnik Fels (S. 115–122). Ernst & Sohn.
- Linckens, J., Zulauf, G., & Mertineit, M. (2019). The influence of a grain-shape fabric on the mechanical behaviour of rock salt: Results from deformation experiments. *Tectonophysics*, 751, 73–82.
- Lüdeling, C., & Günther, R.-M. (2023). Ergebnisse und Interpration der triaxialen Kurzzeitfestigkeitsversuche an Salz aus flacher Lagerung.
- Manthei, G. (2005). Characterization of Acoustic Emission Sources in a Rock Salt Specimen under Triaxial Compression. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(5), 1674–1700.

- Matei, A., & Cristescu, N. D. (2000). The effect of volumetric strain on elastic parameters for rock salt. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 5(2), 113–124.
- Menzel, W., & Schreiner, W. (1977). Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR: Teil II: Das Verformungsverhalten. Neue Bergbautechnik, 7(8), 565–571.
- Mertineit, M., Schramm, M., Dlugosch, R., Richter, L., & Furche, M. (2022). Ergebnisse mineralogisch-geochemischer Untersuchunge, Fluid- bzw. Wassergehaltsbestimmungen und in situ ERT-Messungen an der Kurzbohrung 07YER71/RB359, Bereich südlich Lager H, ERA Morsleben: Ergebnisbericht (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.).
- Mertineit, M., Schramm, M., Dlugosch, R., Richter, L., Kaufhold, S., Epkenhans, I., & Stahlmann, J. (2023). Zawartosc fluidów w silnie nachylonych i plasko ulozonych skalach solnych: pierwsze wyniki relaksometrii NMR i spektrometrii IR na stosunkowo duzych probkach skal = Fluid content in steeply inclined and flat-bedded rock salt: First results of NMR-relaxometry and IR-spectrometry on relatively large rock samples. In Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego & Kopalnia Soli Klodawa S.A. (Hrsg.), XXVII Miedzynarodowe Sympozjum Solne 'Quo vadis sal', Klodawa-Uniejów, 11.10.-13.10.2023: wysadowe zloza soli-ich rola w polityce energetycznej (S. 128–134).
- Meschede, M. (2015). *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. Springer Spektrum.
- Minkley, W., Knöfel, S., Popp, T., & Frühwirt, T. (2018). Geomechanical characterisation of lithological discontinuities and anisotropy effects in salt rocks. In H. Konietzky (Hrsg.), 47. Geomechanik-Kolloquium: Heft 2018-2 (S. 1–9). SDV Direct World GmbH.
- Mintzlaff, V., Daumlechner, E., Lunardelli, M., & Stahlmann, J. (2019). Kurzzeitfestigkeitsversuche an flach gelagertem Steinsalz aus der Grube Borth (NRW). In Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Fachsektionstage Geotechnik - Interdisziplinäres Forum: 29.-30. Oktober 2019, Congress Centrum Würzburg: Tagungsband (S. 280–285).
- Missal, C. (2019). Numerisches Modell zur Entwicklung der Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit von Schädigung, Fluiddruck und Spannungszustand [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig.
- Moslehy, A., Alshibli, K. A., & Truster, T. J. (2022). Influence of Temperature and Crystal Orientation on Compressive Strength of Rock Salt Using a Newly Developed High-Pressure Thermal Cell. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(1), 91–108.
- Mouritz, A. P. (2012). Introduction to aerospace materials. Woodhead Publishing.
- Okrusch, M., & Matthes, S. (2014). *Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde* (9. Aufl.). Springer Spektrum.

- Plinniger, R. J., Alber, M., & Düllmann, J. (2019). Praxisorientierte Untersuchung und Klassifizierung anisotroper Festigkeitseigenschaften von Festgesteinen. In Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Fachsektionstage Geotechnik - Interdisziplinäres Forum: 29.-30. Oktober 2019, Congress Centrum Würzburg: Tagungsband (S. 268–273).
- Popp, T. (2022). Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. *Institut für Gebirgsmechanik mbH*.
- Raith, M. M., Raase, P., & Reinhardt, J. (2011). Leitfaden zur Dünnschliffmikroskopie.
- Redlich, K. A., Terzaghi, K., & Kampe, R. (1929). Ingenieurgeologie. Springer Vienna.
- Reinhold, K., & Hammer, J. (2016). Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 167(2-3), 167–190.
- Rißler, P. (2022). Empfehlung Nr. 2: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. In Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Empfehlungen des Arbeitskreises Versuchstechnik Fels (S. 21–32). Ernst & Sohn.
- Rösler, J. (2012). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe* (4., überarb. u. erw. Aufl. 2013). Springer Vieweg.
- Schleinig, J.-P., & Dressel, I. (2023). Geologische Einordnung der von K+S zur Verfügung gestellten Salzblöcke aus der Grube Borth.
- Schrank, S. (2019). Triaxiale Extensionsversuche zur Bestimmung des Ausmaßes der Anisotropie innerhalb des mechanishen Verhaltens von Steinsalz in flacher Lagerung [Masterarbeit]. Technische Universität Braunschweig.
- Schulze, G. (1974). Metallphysik: Ein Lehrbuch (2., bearb. Aufl.). Springer.
- Schulze, O. (2007). Investigations on damage and healing of rock salt Investigations on damage and healing of rock salt. In M. Wallner, K.-H. Lux, W. Minkley & H. R. Hardy (Hrsg.), The mechanical behavior of salt – understanding of THMC processes in salt: Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (Saltmech VI), Hannover, Germany, 22-25 May 2007 (S. 33–44). Taylor & Francis.
- Schulze, O., & Rust, S. (1985). Untersuchung des Verformungsverhaltens von anisotrop eingeregeltem Steinsalz (Bundesanstalt f
  ür Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.).
- Skrotzki, W., & Haasen, P. (1981). Hardening Mechanisms of Ionic Crystals on 110 and 100 Slip Planes. Le Journal de Physique Colloques, 42(C3), 119–148.
- Skrotzki, W., & Welch, P. (1983). Development of texture and microstructure in extruded ionic polycrystalline aggregates. *Tectonophysics*, 99(1), 47–61.
- Sobolik, S. R. (2022). WEIMOS: Shear behaviors of bedded salt clay seams and their impact on disposal room porosity. In J. de Bresser, M. R. Drury, P. A. Fokker, M. Gazzani, S. Hangx, A. R. Niemeijer & C. J. Spiers (Hrsg.), *The Mechanical Behavior of Salt X: Proceedings of the 10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (Saltmech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022* (S. 168–179). CRC Press.

- Sobolik, S. R., Keffeler, E., & Buchholz, S. (2020). Shear Behavior of Artificial Clay Seams within Bedded Salt Structures (Sandia National Laboratories, Hrsg.).
- Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., & Mintzlaff, V. (2015a). ENTRIA-Arbeitsbericht-03: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und geotechnische Aspekte für die Auslegung.
- Stahlmann, J., Mintzlaff, V., Vargas, R. L., & Epkenhans, I. (2019). ENTRIA-Arbeitsbericht-15 Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung.
- Stahlmann, J., Missal, C., & G\u00e4hrken, A. (2015b). Interaktionen zwischen Abdichtungsbauwerk und Wirtsgestein im Steinsalz. *Bautechnik*, 92(5), 370–376.
- Teichmüller, R. (1958). Ein Querschnitt durch den Südteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. In Geologische Landesanstalten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), Geologisches Jahrbuch (S. 39–50, Bd. 73).
- Terzaghi, K. (1954). *Theoretische Bodenmechanik* (5. amerikanische Auflage). Springer Berlin Heidelberg.
- Thiemeyer, N., Zulauf, G., Mertineit, M., Linckens, J., Pusch, M., & Hammer, J. (2016). Microfabrics and 3D grain shape of Gorleben rock salt: Constraints on deformation mechanisms and paleodifferential stress. *Tectonophysics*, 676, 1–19.
- Urai, J. L., & Spiers, C. J. (2007). The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation. In M. Wallner, K.-H. Lux, W. Minkley & H. R. Hardy (Hrsg.), *The mechanical behavior* of salt – understanding of THMC processes in salt: Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (Saltmech VI), Hannover, Germany, 22-25 May 2007 (S. 149–158). Taylor & Francis.
- Vittinghoff, T. (2002). Analyse des Langzeitverhaltens einer Spundwandkonstruktion in einem überkonsolidierten Ton [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig.
- Wallner, M. (1981). Forschungsprogramm auf dem Gebiet der Lagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen: Laborversuche an Asse-Salzgesteinen (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.) [2. Halbjahresbericht 1980].
- Wittke, W. (1984). Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer Berlin Heidelberg.

## A.1 Block 2016



Abbildung A.1: Foto der Scheibe



Abbildung A.2: Fotos des Quaders, von oben nach unten: xy-, xz-, yz-Ebene

## A.2 Block 2020



Abbildung A.3: Fotos des Würfels x\_8, von oben nach unten: xy-, xz-, yz-Ebene



Abbildung A.4: Fotos des Würfels x\_17.5, von oben nach unten: xy-, xz-, yz-Ebene



Abbildung A.5: Fotos des Würfels x\_27, von oben nach unten: xy-, xz-, yz-Ebene



Abbildung A.6: Fotos des feinkristallinen Würfels von oben nach unten: xy-, xz-, yz-Ebene

# B Übersicht der triaxialen Kompressionsversuche

Proben-	Fallwinkel	Manteldruck	Versuchs-
bezeichnung	[°]	[MPa]	datum
Bo-1-1	0	20	11.01.2017
Bo-1-2	0	2	28.02.2017
Bo-1-3	0	1	17.01.2017
Bo-1-4	0	0.5	19.01.2017
Bo-2-5	90	20	05.12.2016
Bo-2-6	90	2	08.12.2016
Bo-2-7	90	1	13.12.2016
Bo-2-8	90	0.5	14.12.2016
Bo-2-10	90	0.5	21.06.2017
Bo-2-11	90	0.5	27.06.2017
Bo-1-12	0	0.5	29.06.2017
Bo-1-13	0	0.5	04.07.2017
Bo-1-14	0	1	06.07.2017
Bo-1-15	0	1	11.07.2017
Bo-2-16	90	1	13.07.2017
Bo-2-17	90	1	18.07.2017
Bo-1-18	0	1.5	20.07.2017
Bo-1-19	0	1.5	25.07.2017
Bo-2-20	90	1.5	27.07.2017
Bo-2-21	90	1.5	01.08.2017
Bo-1-22	0	0.5	09.08.2017
Bo-2-23	90	0.5	15.08.2017
Bo-1-24	0	1	17.08.2017
Bo-2-25	90	1	22.08.2017
Bo-1-26	0	5	01.09.2017
Bo-1-27	0	10	12.09.2017
Bo-2-28	90	5	19.09.2017

Tabelle B.1: Probenübersicht und zugehörige Versuchsrandbedingungen

## B Übersicht der triaxialen Kompressionsversuche

Tabelle B.1 (Fortsetzung)			
Proben-	Fallwinkel Manteldruck		Versuchs-
bezeichnung	[°]	[MPa]	datum
Bo-2-29	90	10	05.10.2017
Bo-2-100	90	2	07.03.2023
Bo-2-102	90	1	09.02.2021
Bo-2-103	90	1.5	16.03.2021
Bo-2-104	90	0.5	23.07.2021
Bo-2-105	90	1	04.03.2021
Bo-2-106	90	0.5	03.02.2021
Bo-2-107	90	0.1	23.03.2021
Bo-2-110	90	20	07.09.2021
Bo-2-111	90	1.5	18.02.2021
Bo-2-112	90	1.5	02.09.2021
Bo-2-114	90	1	24.08.2021
Bo-2-115	90	0.5	26.02.2021
Bo-1-120	0	1	02.03.2021
Bo-1-121	0	0.5	05.02.2021
Bo-1-122	0	1.5	16.02.2021
Bo-1-123	0	1	12.02.2021
Bo-1-124	0	0.5	24.02.2021
Bo-1-125	0	1	30.07.2021
Bo-1-126	0	1.5	11.03.2021
Bo-1-128	0	2	28.02.2023
Bo-1-132	0	20	03.09.2021
Bo-1-133	0	0.5	13.07.2021
Bo-1-134	0	1.5	26.08.2021
Bo-1-135	0	0.1	25.03.2021
Bo-3-204	30	1.5	08.12.2022
Bo-3-205	30	2	21.02.2023
Bo-3-206	30	1.5	13.01.2023
Bo-3-207	30	0.5	19.01.2023
Bo-3-208	30	0.5	17.01.2023
Bo-4-210	60	1.5	20.12.2022
Bo-4-211	60	0.5	26.01.2023
Bo-4-213	60	1.5	10.01.2023
Bo-4-214	60	2	24.02.2023
Bo-4-215	60	0.5	24.01.2023

Tabelle	B.1	(Fortsetzung)

## C Versuchsergebnisse der triaxialen Kompressionsversuche

indene e.i. obersteht der en zenten bruchpunkte				
Proben-	Manteldruck	Fallwinkel	Bruchspannung	Bruchdehnung
bezeichnung	[MPa]	[°]	[MPa]	[-]
Bo-1-135	0	0.1	32.64	0.068
Bo-2-107	90	0.1	30.14	0.050
Bo-1-4	0	0.5	40.84	0.073
Bo-1-12	0	0.5	35.88	0.063
Bo-1-13	0	0.5	34.80	0.070
Bo-1-22	0	0.5	34.87	0.089
Bo-1-121	0	0.5	30.96	0.072
Bo-1-124	0	0.5	27.46	0.067
Bo-1-133	0	0.5	33.60	0.069
Bo-3-207	30	0.5	33.58	0.070
Bo-3-208	30	0.5	32.75	0.057
Bo-4-211	60	0.5	33.38	0.059
Bo-4-215	60	0.5	33.60	0.057
Bo-2-8	90	0.5	35.52	0.052
Bo-2-10	90	0.5	35.80	0.066
Bo-2-11	90	0.5	35.72	0.059
Bo-2-23	90	0.5	35.23	0.050
Bo-2-106	90	0.5	34.12	0.058
Bo-2-115	90	0.5	35.53	0.085
Bo-2-104	90	0.5	33.90	0.065
Bo-1-3	0	1	42.68	0.089
Bo-1-14	0	1	37.21	0.091
Bo-1-15	0	1	38.60	0.100
Bo-1-24	0	1	36.75	0.101
Bo-1-120	0	1	35.49	0.089
Bo-1-123	0	1	31.09	0.083
Bo-1-125	0	1	35.22	0.111

Tabelle C.1: Übersicht der einzelnen Bruchpunkte

Tabelle C.1 (Fortsetzung)				
Proben-	Manteldruck	Fallwinkel	Bruchspannung	Bruchdehnung
bezeichnung	[MPa]	[°]	[MPa]	[-]
Bo-2-7	90	1	35.14	0.061
Bo-2-16	90	1	39.41	0.077
Bo-2-17	90	1	40.30	0.072
Bo-2-25	90	1	39.41	0.082
Bo-2-102	90	1	35.00	0.075
Bo-2-105	90	1	34.25	0.085
Bo-2-114	90	1	33.26	0.073
Bo-1-18	0	1.5	45.21	0.146
Bo-1-19	0	1.5	41.02	0.125
Bo-1-122	0	1.5	38.02	0.115
Bo-1-126	0	1.5	36.39	0.119
Bo-1-134	0	1.5	29.47	0.107
Bo-3-204	30	1.5	39.89	0.107
Bo-3-206	30	1.5	38.89	0.103
Bo-4-210	60	1.5	39.72	0.106
Bo-4-213	60	1.5	39.76	0.086
Bo-2-20	90	1.5	40.71	0.106
Bo-2-21	90	1.5	42.39	0.099
Bo-2-103	90	1.5	37.23	0.095
Bo-2-111	90	1.5	37.94	0.110
Bo-2-112	90	1.5	37.33	0.073
Bo-1-2	0	2	41.17	0.114
Bo-1-128	0	2	40.87	0.117
Bo-3-205	30	2	35.17	0.085
Bo-4-214	60	2	38.33	0.098
Bo-2-6	90	2	41.50	0.113
Bo-2-100	90	2	40.38	0.112
Bo-1-26	0	5	-	-
Bo-2-28	90	5	-	-
Bo-1-27	0	10	-	-
Bo-2-29	90	10	-	-
Bo-1-1	0	20	-	-
Bo-1-132	0	20	-	-
Bo-2-5	90	20	-	-
Bo-2-110	90	20	-	-

### C Versuchsergebnisse der triaxialen Kompressionsversuche

### D.1 Block 2016



(a) Bo-1-12

(c) Bo-1-22

Abbildung D.1: Proben mit  $\beta=0^\circ$  vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=0,5\,\mathrm{MPa}$ 



(a) Bo-2-10 (b) Bo-2-11 (c) Bo-2-23

Abbildung D.2: Proben mit  $\beta = 90^{\circ}$  vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.3: Proben mit  $\beta = 0^{\circ}$  vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1$  MPa



(a) Bo-2-16

(b) Bo-2-17

(c) Bo-2-25

(d) Bo-2-28





Abbildung D.5: Proben vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1.5$  MPa



(a) Bo-1-26,  $\sigma_3 = 5 \,\mathrm{MPa}$ (b) Bo-2-28,  $\sigma_3 = 5 \,\mathrm{MPa}$ (c) Bo-1-27,  $\sigma_3 = 10 \,\mathrm{MPa}$ (d) Bo-2-28,  $\sigma_3 = 10 \,\mathrm{MPa}$ 



### D.2 Block 2020



Abbildung D.7: Bo-1-135 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0,1$  MPa



Abbildung D.8: Bo-2-107 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=0,1\,\mathrm{MPa}$ 



Abbildung D.9: Bo-1-121 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.10: Bo-1-124 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.11: Bo-1-133 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.12: Bo-2-104 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0,5$  MPa



Abbildung D.13: Bo-2-106 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.14: Bo-2-115 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0,5$  MPa



Abbildung D.15: Bo-1-120 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$ 



Abbildung D.16: Bo-1-123 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1$  MPa



Abbildung D.17: Bo-1-125 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$ 



Abbildung D.18: Bo-2-102 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=1\,\mathrm{MPa}$ 



Abbildung D.19: Bo-2-105 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$ 



Abbildung D.20: Bo-2-114 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1$  MPa



Abbildung D.21: Bo-1-122 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.22: Bo-1-126 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa


Abbildung D.23: Bo-1-134 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.24: Bo-2-103 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=1,5\,\mathrm{MPa}$ 



Abbildung D.25: Bo-2-111 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.26: Bo-2-112 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.27: Bo-1-128 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 2$  MPa



Abbildung D.28: Bo-2-100 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=2\,\mathrm{MPa}$ 



Abbildung D.29: Bo-1-132 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 



Abbildung D.30: Bo-2-110 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3=20\,\mathrm{MPa}$ 



Abbildung D.31: Bo-3-207 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.32: Bo-3-208 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.33: Bo-4-211 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0.5$  MPa



Abbildung D.34: Bo-4-215 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 0,5$  MPa



Abbildung D.35: Bo-3-204 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.36: Bo-3-206 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.37: Bo-4-210 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.38: Bo-4-213 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 1,5$  MPa



Abbildung D.39: Bo-3-205 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 2$  MPa



Abbildung D.40: Bo-4-214 vor Versuchsdurchführung mit  $\sigma_3 = 2$  MPa