

**Parameterstudie zur
Gletscherüberfahung
und Integrität eines
Salzdiapirs**

Parameterstudie zur Gletscherüberfahrung und Integrität eines Salzdiapirs

Ingo Kock

Juli 2013

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609 R 03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Gletscher, Integrität, numerische Modellrechnungen, Parameterstudien, Salzdiapir

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Parameterstudien vorgestellt, in welchen die Auswirkung der Überfahrung eines Salzstockes durch einen Gletscher im Hinblick auf die geomechanische Integrität untersucht wird. Unterschiedliche Gletschermächtigkeiten und unterschiedliche Vortriebs- bzw. Rückzugsgeschwindigkeiten des Gletschers werden betrachtet. Die Parameterstudien werden mit einem geomechanischen Berechnungsmodell durchgeführt.

Die Berechnungen zeigen, dass die Integritätskriterien (Minimalspannungskriterium und Dilatanzkriterium) während des Herannahens eines Gletschers verletzt werden können. Die Möglichkeit einer Verletzung der Integritätskriterien steigt mit zunehmender Gletschermächtigkeit und mit zunehmender Gletschergeschwindigkeit.

Abstract

In the present work a parameter study on the consequences for geomechanical integrity of glacier advancement above a salt diapir is presented. Different glacier thicknesses as well as speed of advancement and retreat are considered. The parameter study is conducted with a geomechanical numerical model.

Results show that relevant criteria (minimum stress criterion and dilatancy criterion) may be violated during advancement of a glacier. The possibility of violating these criteria increases with increasing thickness and increasing speed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Motivation der Untersuchung	3
2.2	Charakteristika von Kaltzeiten.....	4
2.3	Integritätskriterien	6
3	Methodik	9
3.1	Modellaufbau	9
3.2	Parametervariationen und Auswertung	11
4	Ergebnisse und Diskussion	15
4.1	Generelle Charakteristika des Spannungsverlaufs.....	15
4.2	Verletzung des Minimalspannungskriteriums	17
4.3	Verletzung des Dilatanzkriteriums.....	25
5	Schlussfolgerungen	31
	Literaturverzeichnis	35
	Abbildungsverzeichnis	39
	Tabellenverzeichnis	41
A	Anhang zu Kapitel 4	43
A.1	Minimalspannungskriterium	43
A.2	Dilatanzkriterium	53

1 Einleitung

Im April 2009 wurde die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beauftragt, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern durchzuführen. Dieses Vorhaben (3609R03210) umfasste mehrere Schwerpunkte, so unter anderem die Betrachtung der Auswirkung des Vordringens und des Überfahrens eines Salzstockes durch einen Gletscher.

In der vorliegenden Arbeit werden Parameterstudien vorgestellt, in welchen diese Auswirkung im Hinblick auf die Integrität eines Salzstockes untersucht wird. Die Parametervariation erfolgt dabei durch die Betrachtung von unterschiedlichen Gletschermächtigkeiten und unterschiedlichen Vortriebs- bzw. Rückzugsgeschwindigkeiten des Gletschers. Die Parameterstudien werden mit einem geomechanischen Berechnungsmodell durchgeführt.

Im Folgenden werden zunächst die Motivation für die vorliegende Untersuchung sowie einige Grundlagen zum Verständnis beschrieben. Danach wird im Detail auf die Methodik der Parameterstudien (z. B. Berechnungsprogramm, Stoffgesetze, Modellaufbau) bevor Ergebnisse und Schlussfolgerungen erläutert werden.

2 Grundlagen

2.1 Motivation der Untersuchung

Die aktuell gültigen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ sehen in §7.2.1 vor, im Rahmen eine Langzeitsicherheitsanalyse zu zeigen, dass die Integrität des sog. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG, mehr dazu siehe unten) für 1.000.000 Jahre sichergestellt ist.

Unter der Voraussetzung, dass globale Klimaänderungen auf bestimmten Gesetzmäßigkeiten und Regelmäßigkeiten beruhen, (z. B. Milanković-Zyklen, etc.) ist davon auszugehen, dass innerhalb dieses Zeitraums (1.000.000 a) eine oder mehrere Kaltzeiten mit den damit verbundenen Auswirkungen auftreten. Die hauptsächlichen, großräumigen Auswirkungen einer Kaltzeit in einer Region für einen potentiellen Endlagerstandort können das Auftreten von Permafrost und/oder Vergletscherung sein, welche mit einer Vielzahl von lokalen Auswirkungen verbunden sind (z. B. Änderung der hydrogeologischen Bedingungen). Aus diesem Grund werden in der Entwicklung von Szenarien für eine Langzeitsicherheitsanalyse die klimatischen Veränderungen mit einbezogen (z. B. /BEU 12/).

In mehreren Salzstöcken (im Folgenden auch „Diapir“ genannt) in Norddeutschland werden im oberen Teil Klüfte vorgefunden, die oft mit einer eiszeitlichen Genese in Verbindung gebracht werden. Kurze Überblicke über diese sog. „kryogenen Klüfte“ sind in /BRU 11/, /HAM 12/ zu finden. Laut /HAM 12/ und der darin zitierten Literatur wird es für möglich gehalten, dass die Ursache dieser Klüfte Temperaturschwankungen einer Permafrostphase sind, welche starke Thermospannungen im oberen Salzstock verursachen. Es wird außerdem vermutet, dass auch das Vordringen bzw. Abschmelzen von Gletschern hohe Differenzspannungen verursacht. Die Thermo- oder Differenzspannungen sollen dann zur Entstehung von Rissen bzw. Klüften führen.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass für eine vollständige Untersuchung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die Betrachtung der Auswirkungen von Kaltzeiten notwendig ist. Berücksichtigt wurde dies beispielsweise im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)“. In diesem Vorhaben wurden sowohl die Prozesse der Abkühlung als auch der Gletscherüberfahrung in geomechanischen numerischen Analysen betrachtet. Die Schlussfolgerungen in diesen Untersuchungen

sind, dass selbst eine Abkühlungsphase mit einem hohen Gradienten (d. h. einer starken Abkühlung bzw. Erwärmung innerhalb kurzer Zeit) die Integrität des untersuchten Salzstocks nicht beeinträchtigt, während eine Gletscherüberfahung Auswirkungen auf die Integrität hat /KOC 12/. Diese Auswirkungen sind die lokale Verletzung des sog. Dilatanzkriteriums (siehe Kap. 2.3) und geringfügige Verletzungen des Minimalspannungskriteriums (siehe Kap. 2.3) am Salzspiegel. In /BRU 11/ wurde ebenfalls eine Gletscherüberfahung mit einem numerischen Modell betrachtet. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass als Folge der Spannungsentlastung durch die Annäherung der Gletscherfront eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums wahrscheinlich ist und Hydrofracs (d. h. durch Fluiddruck entstehende Risse) auftreten können. Alle Analysen zeigen, dass eine rein statische Auflast keine integritätsgefährdenden Auswirkungen hat, sondern sogar das Gegenteil bewirken kann. Ein relevanter integritätsgefährdender Prozess ist vielmehr das Vorrücken des Gletschers und möglicherweise ebenso dessen Rückzug.

In den oben beschriebenen Analysen /BRU 11/, /KOC 12/ wurden nur wenige oder keine Parametervariationen hinsichtlich der Gletschermächtigkeit und -geschwindigkeit durchgeführt. Dies wird in der vorliegenden Untersuchung mit einem einfachen Berechnungsmodell durchgeführt, um die Abhängigkeit eines möglichen Integritätsverlustes eines Salzstocks von diesen Parametern zu beleuchten. Im Berechnungsmodell wird dabei ein Gletscher simuliert der, ausgehend vom Modellrand, einen Salzstock bis zu dessen Zentrum überfährt und anschließend wieder bis zum Modellrand zurückweicht. Während der Berechnung werden die Spannungsentwicklung und die mögliche Auswirkung auf die Integritätskriterien (siehe Kap. 2.3) betrachtet. Ziel soll es unter anderem sein, für zukünftige Sicherheitsanalysen notwendige Parameterbandbreiten aufzuzeigen und möglicherweise unnötige Konservativitäten abzubauen.

2.2 Charakteristika von Kaltzeiten

Es existieren zahlreiche Prozesse, die während einer Kaltzeit möglicherweise gravierende Auswirkungen auf ein Endlagersystem haben (z. B. Rinnenbildung, Subrosion, etc.). Ein Überblick über diese Prozesse ist z. B. im FEP-Katalog zum Vorhaben VSG /WOL 12/ zu finden. Wie bereits erwähnt werden zwei wesentliche Prozesse mit der Entstehung von Rissen und Klüften in einem Salzstock in Verbindung gebracht. Dies sind Ausbildung von Permafrost in den oberen geologischen Schichten in Tiefen von z. B. 140 m /DES 03/ oder bis zu 500 m /SAF 04/ und eine großräumige regionale Ver-

gletscherung. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die Vergletscherung betrachtet.

Die Eisbedeckung der norddeutschen Tiefebene in geologischen Zeiträumen wird in der Literatur umfassend behandelt. Eine ausführliche Zusammenfassung mit weiterführenden Literaturhinweisen findet sich z. B. in /EHL 04/ und in einer aktualisierten Fassung von /EHL 11/. Vereinfacht betrachtet lassen sich danach im Pleistozän für Norddeutschland drei Vergletscherungen feststellen. Diese fanden während der Elster-Kaltzeit, des Saale-Komplexes und der Weichsel-Kaltzeit statt. Die Ausdehnung der Eisbedeckung war bezogen auf Norddeutschland während der Elster-Kaltzeit und des Saale-Komplexes am größten (Abb. 2.1).

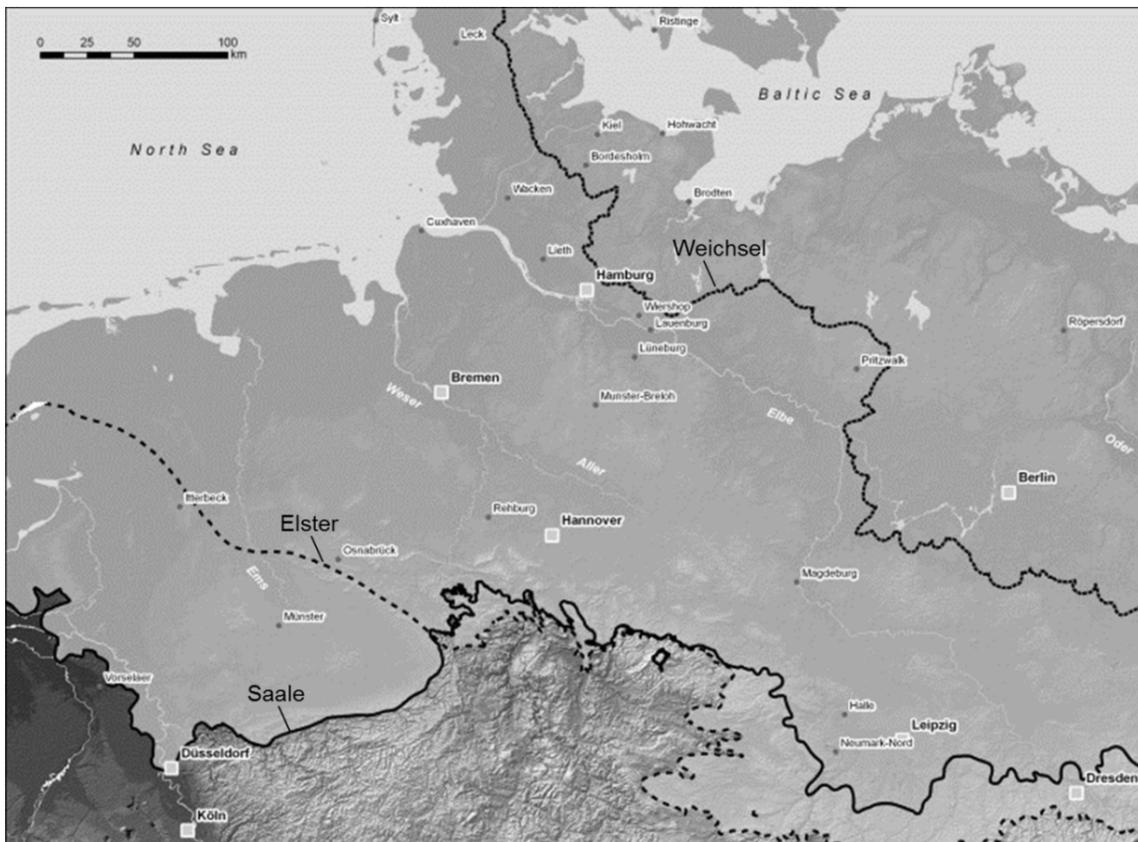


Abb. 2.1 Maximale Ausdehnung der Eisschilde in den Kaltzeiten im Pleistozän (geändert aus /EHL 11/)

Die Geschwindigkeiten mit welchen die Vergletscherung voranschreitet, werden mit sehr unterschiedlichen Beträgen angegeben. Für die Elster-Kaltzeit werden von /EHL 11/ beispielsweise Geschwindigkeiten von 600 – 900 m pro Jahr erwähnt. Für

Polen gibt /NAR 13/ für die Vereisung der Weichsel-Kaltzeit Geschwindigkeiten von wenigen 10er bis zu mehreren 1.000 m pro Jahr an.

Die Mächtigkeit des Eisschildes (bzgl. Norddeutschland) ist in den letzten Kaltzeiten ebenso sehr unterschiedlich ausgeprägt gewesen. In der Region um die Ölbohrplattform Mittelplate (Nordsee) wurden von /GRA 10/ Mächtigkeiten von bis zu 1.700 m rekonstruiert. Für die Weichsel-Kaltzeit werden z. B. von /WOL 12/ bei Kopenhagen 500 m Mächtigkeit angegeben.

2.3 Integritätskriterien

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ sind zwei geomechanische Integritätskriterien festgeschrieben anhand derer die Integrität bewertet wird. Diese Kriterien gelten im Grunde genommen nur für den sog. einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), da nur für diesen die Integrität im Sinne vom „Erhalt der Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ /BMU 10/ nachzuweisen ist. Vereinfacht werden diese Kriterien in der vorliegenden Untersuchung für den gesamten Salzstock angewendet.

Die in /BMU 10/ vorgegebenen Kriterien sind

- (1) das Dilatanzkriterium und
- (2) das Fluidruckkriterium bzw. Minimalspannungskriterium.

Die Auswirkung der mechanischen Schädigung des Gebirges durch deviatorische Beanspruchung wird durch das Dilatanzkriterium, die mögliche fluiddruck-getriebene Entstehung von Fließwegen durch das Minimalspannungskriterium bewertet.

Der Beginn von Dilatanz (Gefügauflockerung, Mikrorisse, etc.) für ein Gestein kann auf unterschiedliche Weise definiert werden. Eine verbreitete und auch hier genutzte Definition des Beginns von Dilatanz ist der Spannungszustand¹, an dem die Änderung des Volumens bei mechanischer Beanspruchung positiv wird. Ergebnisse aus La-

¹ Spannungskonvention in dieser Arbeit: Druckspannung ist positiv. Die minimale Hauptspannung ist:
 $\sigma_{min} = \sigma_3$

bormessungen zeigen in einem Oktaedernormalspannungs – Oktaederschubspannungs – Diagramm ($\sigma_{N,okt}, \tau_{okt}$) keine scharfe Grenze für den Beginn von Dilatanz, sondern bilden einen Bereich in welchem die sog. Dilatanzgrenze liegen kann (z. B. in /HAM 07/), welche dilatantes von kompressivem Materialverhalten trennt. Dementsprechend nutzen unterschiedliche Autoren teils unterschiedliche Definitionen der Dilatanzgrenze um zu beurteilen, ob das Dilatanzkriterium verletzt bzw. nicht verletzt ist /HAM 07/.

In dieser Arbeit wird für Steinsalz die Dilatanzgrenze nach /CRI 98/, /HUN 03/ benutzt (Abb. 2.2):

$$\tau_{Dil,okt} = 0.899 * \frac{\sigma_{N,okt}}{\sigma_*} - 0.0167 * \left(\frac{\sigma_{N,okt}}{\sigma_*}\right)^2 \quad (2.1)$$

mit $\sigma_* = 1$ MPa und

$$\tau_{Dil,okt} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.2)$$

sowie

$$\sigma_{N,okt} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.3)$$

wenn $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ die drei Hauptspannungen sind.

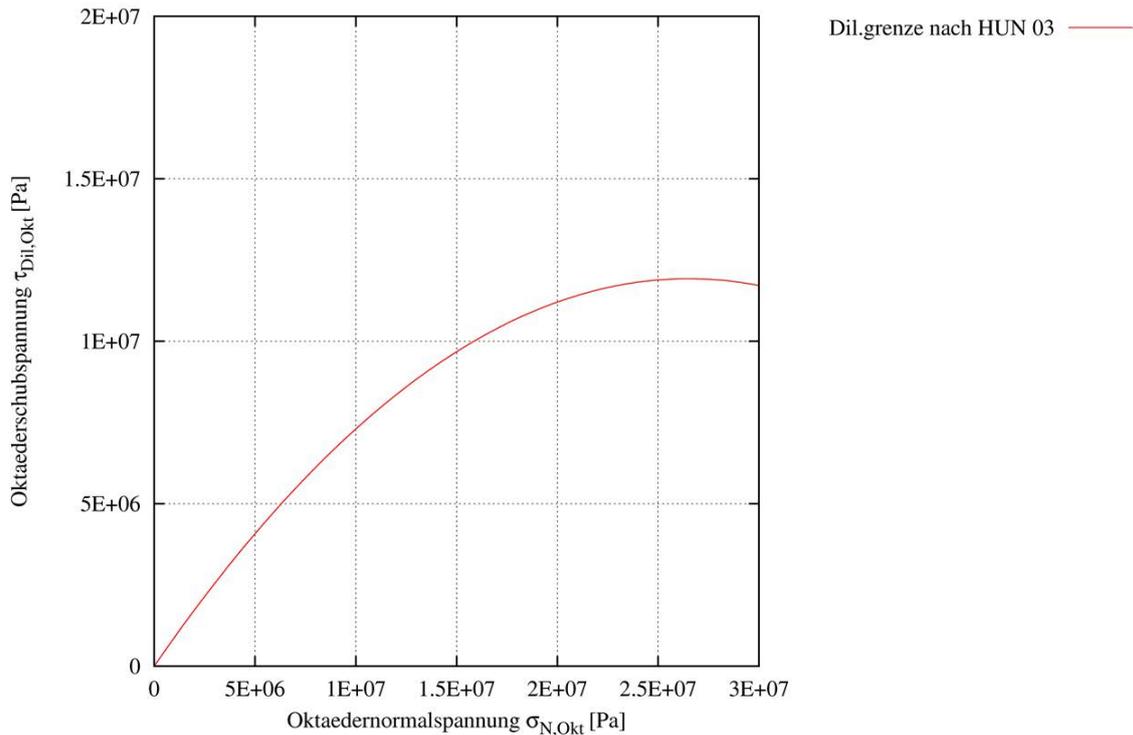


Abb. 2.2 Dilatanzgrenze nach /CRI 98/, /HUN 03/

Zur Einhaltung des Minimalspannungskriteriums muss, unter der Annahme dass kompressive Spannungen positiv sind, der Fluiddruck p_{fluid} kleiner sein als die minimale Hauptspannung ($\sigma_{min} = \sigma_3$) und eine zu überwindende Zugfestigkeit des Gesteins.

Üblicherweise wird die Zugfestigkeit des Steinsalzes gleich Null gesetzt so dass zur Einhaltung des Minimalspannungskriteriums gelten muss:

$$p_{fluid} < \sigma_3 \quad \text{bzw.} \quad \sigma_3 - p_{fluid} > 0 \quad (2.4)$$

Der Fluiddruck p_{fluid} wird in den vorliegenden Berechnungen als hydrostatischer Teufendruck einer gesättigten NaCl-Lösung (Dichte 1.100 kg/m³) angenommen, unabhängig davon ob tatsächlich in einer bestimmten Teufe Lösung vorhanden ist.

3 Methodik

3.1 Modellaufbau

Für die geomechanischen Berechnungen wurde das Programm FLAC3D 4.0 der Fa. Itasca verwendet. FLAC3D ist ein explizites Finite-Differenzen Programm um numerisch das mechanische Verhalten von geologischen und geotechnischen Materialien zu untersuchen. Die theoretischen Grundlagen und die Implementierung von z. B. Materialgesetzen ist in den Handbüchern /ITA 09/ detailliert beschrieben und werden an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

Das Rechenmodell ist ein stark vereinfachtes zweidimensionales Modell eines Salzdiapirs mit Neben- und Deckgebirge (s. Abb. 3.1). Das gesamte Modellgebiet hat eine horizontale Erstreckung von ca. 15,6 km und eine vertikale Tiefe von 4 km. Der Zentralteil des Salzdiapirs ist im Modell eine Ellipse mit einer Abplattung von 1,5 deren Zentrum auf 1.300 m Teufe liegt. Die Entfernung vom Zentrum des Diapirs bis zum Salzspiegel beträgt 1.000 m. Darüber liegt eine 300 m mächtige Deckgebirgsschicht, in horizontaler Erstreckung befindet sich das Nebengebirge. Vom unteren Rand des Zentralteils erstreckt sich bis zur maximalen Teufe von 4.000 m der Fuß des Diapirs.

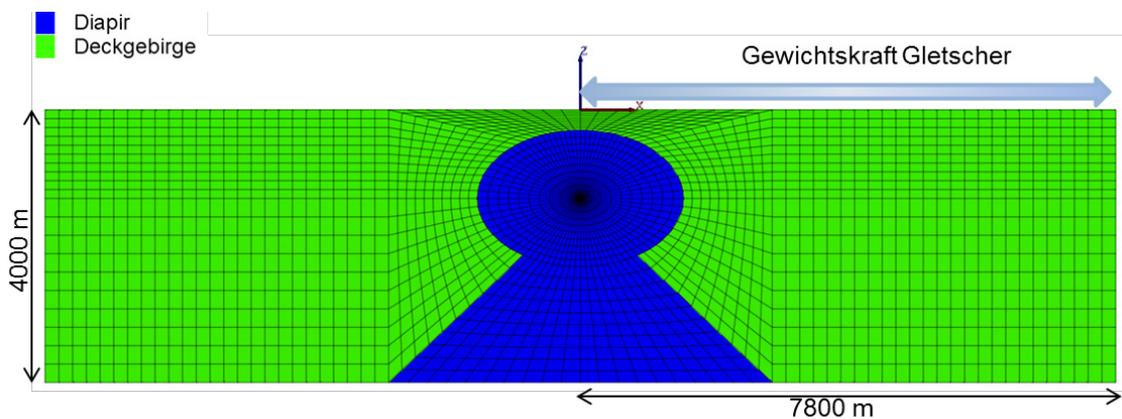


Abb. 3.1 Modellaufbau

Für die Berechnungen wurde für das Deck- und Nebengebirge ein elastisches Materialverhalten angenommen. Der Salzdiapir verhält sich mechanisch nach dem sog. WIPP-Ansatz, so dass die Verformung neben dem elastischen Anteil auch plastisch als Kriechen erfolgt. Die für die Berechnungen der elastischen Verformung genutzten Moduln sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Für die plastische Verformung ist die Kriechrate geteilt in einen primären und sekundären Anteil:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_p + \dot{\epsilon}_s \quad (3.1)$$

Die primäre Verformungsrate hängt von der Größe der sekundären Verformungsrate ab:

$$\dot{\epsilon}_p = \begin{cases} (A - B\epsilon_p)\dot{\epsilon}_s, & \text{wenn } \dot{\epsilon}_s \geq \dot{\epsilon}_{ss}^* \\ \left(A - B\left(\frac{\dot{\epsilon}_{ss}^*}{\dot{\epsilon}_s}\right)\epsilon_p\right)\dot{\epsilon}_s, & \text{wenn } \dot{\epsilon}_s < \dot{\epsilon}_{ss}^* \end{cases} \quad (3.2)$$

Die sekundäre Verformungsrate wird (vergleichbar zum sog. BGRa /HUN 99/ Gesetz) mit

$$\dot{\epsilon}_s = D\bar{\sigma}^n e^{(-Q/RT)} \quad (3.3)$$

berechnet. Dabei ist R die allgemeine Gaskonstante, Q die Aktivierungsenergie und T die Temperatur. Die Parameter A, B, $\dot{\epsilon}_{ss}^*$, D und n sind Materialparameter von Steinsalz und werden durch experimentelle Untersuchungen bestimmt. Für die vorliegenden Berechnungen wurden Daten aus der Literatur genutzt, diese Parameter sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Für numerische Berechnungen im kleinen Maßstab kann für das Material eine konstante Temperatur definiert werden, für das vorliegende großmaßstäbliche Modell ist eine Temperaturzunahme mit der Teufe zu berücksichtigen. In der Natur existiert im Salzdiapir und im Deck- und Nebengebirge ein lokationsabhängiger geothermischer Gradient. Für die vorliegenden Berechnungen wird bei einer Oberflächentemperatur von 4 °C am oberen Rand des Modells von einer Temperaturerhöhung von 3 °C pro 100 m ausgegangen, so dass am unteren Rand des Modells eine Temperatur von ca. 124 °C herrscht. Für die thermischen und thermomechanischen Berechnungen sind weitere Materialparameter notwendig (Wärmekapazität und -leitfähigkeit, thermischer Expansionskoeffizient). Diese sind ebenfalls in Tab. 3.1 aufgeführt.

Der Gletscher selbst wird nicht im Modell vernetzt, vielmehr wird die Gewichtskraft des Gletschers als Randbedingung auf Teilbereiche des oberen Rands des Modells gebracht (Abb. 2.1). Entsprechend der Vortriebs- bzw. Rückzugsgeschwindigkeit (siehe Tab. 3.2) vergrößert bzw. verkleinert sich im Laufe der Modellzeit der Teilbereich, auf welchen die Gewichtskraft aufgebracht wird. Die Dichte des Gletschers ist in Tab. 3.1

dargestellt, die Mächtigkeit wurde entsprechend Kap. 3.2 variiert und ist homogen. Im Modell wirkt die Erdbeschleunigung mit $9,81 \text{ m/s}^2$.

Da im Modell unterschiedliche Dichten und eine ungleichmäßige Vernetzung genutzt wird, wird nach Zuweisung der Rand- und Anfangsbedingungen für das Modell zunächst ein Gleichgewichtszustand t_0 berechnet. Zum Startzeitpunkt für die Parametervariation $t_0 = 0$ a wirkt auf das Modell keine Gewichtskraft durch den Gletscher.

Tab. 3.1 Parameter für die Berechnungen (z. B. aus /BER 12/, /HUN 99/, /KOC 12/)

Parameter		Material		
		Salz	Deckgebirge	Gletscher
Dichte	[kg/m ³]	2200	2500	900
E-Modul	[Pa]	$2.5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^8$	n. a.
Poissonzahl	[-]	0.27	0.33	n. a.
Gaskonstante R	[J/(molK)]	8.3144	n. a.	n. a.
Aktivierungsenergie Q	[J/mol]	54000.00	n. a.	n. a.
A	[-]	4.56	n. a.	n. a.
B	[-]	127	n. a.	n. a.
$\dot{\epsilon}_{ss}^*$	[s ⁻¹]	$5.39 \cdot 10^{-8}$	n. a.	n. a.
D	[Pa ⁻ⁿ s ⁻¹]	$2.1 \cdot 10^{-36}$	n. a.	n. a.
n	[-]	5	n. a.	n. a.
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	900	1000	n. a.
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	5.6	2.0	n. a.
Therm. Expansionskoeffizient	[1/K]	$4.2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	n. a.

n. a.: nicht anwendbar

3.2 Parametervariationen und Auswertung

Im Berechnungsmodell wurden insgesamt drei Parameter variiert. Dies sind die Gletschermächtigkeit, die Vortriebsgeschwindigkeit und die Rückzugsgeschwindigkeit des Gletschers. Die Bandbreite der in Kap. 2.2 angegebenen Daten ist relativ groß, für die vorliegenden Berechnungen werden für die Gletschermächtigkeit Werte von 100 bis 1.500 m genutzt, für die Vortriebsgeschwindigkeit des Gletschers von 10 bis 500 m/a und für die Rückzugsgeschwindigkeit von 20 bis 1.000 m/a. Die Geschwindigkeiten des Gletschers wurden für eine konstante Mächtigkeit (1.500 m) variiert. Die Rückzugsge-

schwindigkeit wurde als doppelt so hoch angesetzt wie die Vortriebsgeschwindigkeit. Zur Analyse dieser Parameterbandbreite wurden insgesamt 21 Modellläufe (Tab. 3.2) durchgeführt.

Tab. 3.2 Übersicht über die durchgeführten Parametervariationen

Modelllauf	Gletschermächtigkeit [m]	Vortriebsgeschwindigkeit [m/a]	Rückzugsgeschwindigkeit [m/a]
1	100	100	200
2	200	100	200
3	300	100	200
4	400	100	200
5	500	100	200
6	600	100	200
7	700	100	200
8	800	100	200
9	900	100	200
10	1.000	100	200
11	1.100	100	200
12	1.200	100	200
13	1.300	100	200
14	1.400	100	200
15	1.500	10	20
16	1.500	50	100
17	1.500	100	200
18	1.500	200	400
19	1.500	300	600
20	1.500	400	800
21	1.500	500	1.000

Zur Auswertung der Modellläufe wurden an verschiedenen Punkten im Modell der Spannungszustand (maximale, mittlere und minimale Hauptspannung; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) fortlaufend aufgezeichnet, so dass für diese Punkte beispielsweise ein Spannungs-Zeit-Diagramm erstellt werden kann. Insgesamt geschah dies an 30 Punkten im Modell, die in Abb. 3.2 abgebildet sind. Dabei liegen 18 dieser Punkte im Salzdiapir und werden im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet, die weiteren liegen im Deck- und Nebengebirge.

Zusätzlich wurde im Abstand von 10 Jahren Modelllaufzeit der Gesamtzustand (Spannungen, Verschiebungen, etc.) des kompletten Berechnungsmodells gespeichert.

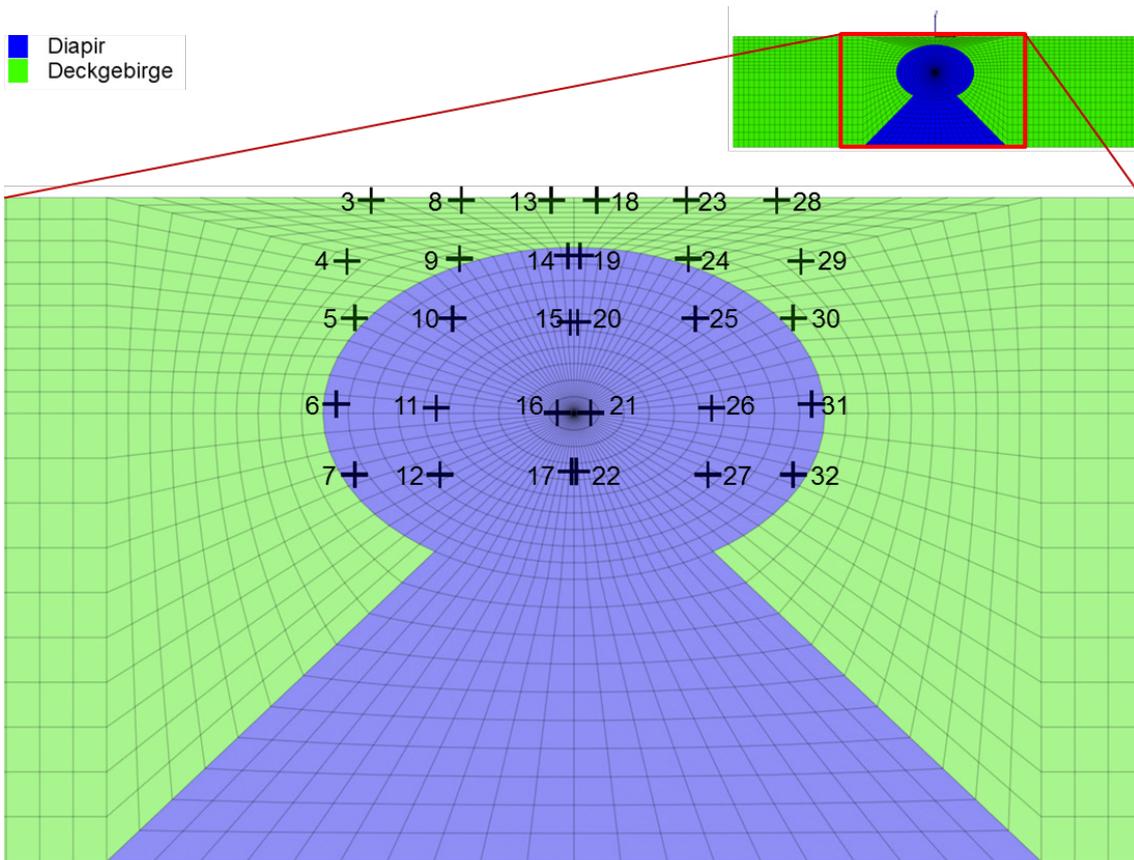


Abb. 3.2 Spannungsmesspunkte (Kreuze, Messpunktnr.) im Berechnungsmodell

Da in den Modellläufen 1 – 14 sowie 17 die gleichen Geschwindigkeiten genutzt werden, ließen sich deren Ergebnisse direkt miteinander vergleichen, für die Modellläufe 15 – 21 ist das aufgrund der unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeit nicht der Fall. Deshalb wird in der Auswertung (z. B. im Spannungs-Zeit-Diagramm) die Modellzeit t_{Modell} normiert betrachtet:

$$t_{Modell,norm} = \frac{t_{Modell}}{t_{Mitte}} \quad (3.4)$$

Die Modellzeit t_{Modell} wird durch den Zeitpunkt dividiert, an welchem der modellierte Gletscher „über“ dem Zentrum des Salzdiapirs liegt. Damit wird in jedem Modell das Zentrum des Modells vom Gletscher zum Zeitpunkt $t = 1$ erreicht.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Generelle Charakteristika des Spannungsverlaufs

Der generelle (Minimal-) Spannungsverlauf während der Berechnungen wird anhand dreier Messpunkte im Salzdiapir beispielhaft dargestellt (siehe Abb. 4.1). Die Messpunkte 31,21 und 6 (Abb. 3.2) wurden ausgewählt, da sie vertikal im Zentrum des Salzdiapirs liegen und jeweils unterschiedlich vom Vorrücken des Gletschers betroffen sind.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ zeigt die Minimalspannung für die beiden äußeren Messpunkte (6 u. 31) den gleichen Wert, während die Minimalspannung im Zentrum (Messpunkt 21) etwas größer ist. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass das Modell aufgrund der unterschiedlichen Materialdichten zu einem Spannungsgleichgewicht gerechnet werden musste. Dabei ist bereits Verformung durch Kriechprozesse erfolgt. Ein weiterer Grund ist die Tatsache dass aufgrund der radialen Modellgeometrie des Diapirs die Spannungsmesspunkte nicht exakt auf derselben Teufe liegen (Messpunkte 31 und 6 liegen ca. 50 m höher).

Charakteristisch in allen Spannungsverläufen ist ein mehr oder weniger ausgeprägtes Sägezahnmuster im Kurvenverlauf (Abb. 4.1, Detailausschnitt). Dieses Muster hat seine Ursache darin, dass die kontinuierliche Fortbewegung des Gletschers auf dem diskreten Gitter eine stufenweise Erhöhung der Minimalspannung erzeugt, sobald die Gletscherfront das jeweils nächste Gitterelement erreicht. Die darauffolgende, durch das Salzkriechen verursachte Spannungsverringerung ist für die Sägezahnform der Kurven ausschlaggebend. Dieser Effekt kann minimiert werden, indem man das Modellgitter in horizontaler Richtung feiner diskretisiert oder in das Modell eine abgeflachte Gletscherfront einführt, so dass die Mächtigkeit des Gletschers sukzessive zunimmt. Die Ausprägung des Sägezahnusters nimmt außerdem mit der Teufe des Messpunkts ab und hängt auch von der lateralen Position des Messpunkts im Diapir ab, ist aber in allen Modellläufen vorhanden. Auch in /BRU 11/ kann ein solches, allerdings weniger ausgeprägtes Muster beobachtet werden (/BRU 11/: Abbildung 87).

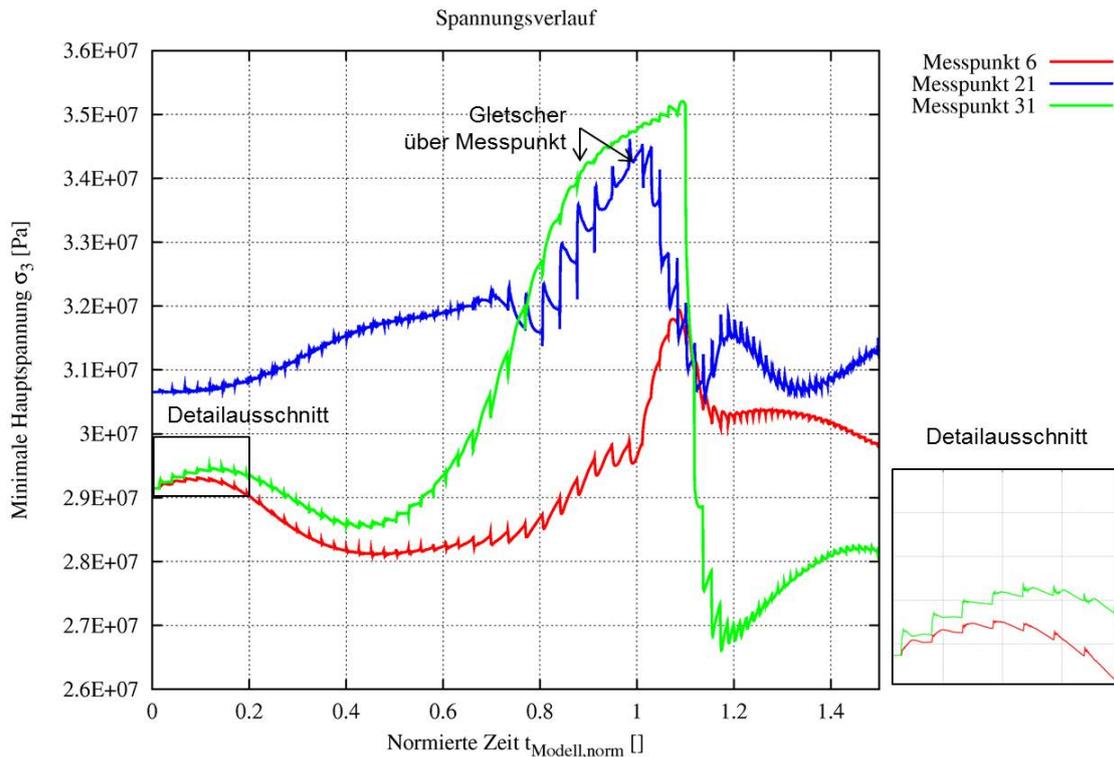


Abb. 4.1 Exemplarischer Spannungsverlauf an ausgewählten Messpunkten. Detailausschnitt zur Illustration der Sägezahnform

Für die Messpunkte 6 und 31 ist nach Start der Berechnung ein kurzfristiger Anstieg der minimalen Hauptspannung zu beobachten (Abb. 4.1, bis ca. $t = 0,1$), bevor die Minimalspannung danach deutlich unter den Startwert sinkt (Abb. 4.1, bei ca. $t = 0,4$). Für den Messpunkt 21 im Zentrum des Diapirs ist kein solcher Rückgang der Minimalspannung zu beobachten. Neben den unterschiedlichen Randbedingungen (Mächtigkeit, Geschwindigkeit) hängt der Kurvenverlauf vor der Überführung des Gletschers stark von der Position des Messpunkts im Diapir ab. Generell zeigen Spannungskurven im Zentrum des Diapirs weniger stark ausgeprägte Schwankungen. Die Ursache liegt vermutlich im unterschiedlichen Verformungsverhalten zwischen Randbereich und Zentrum des Diapirs, welches im Rahmen dieser Untersuchung allerdings nicht näher betrachtet wurde.

Das Vorrücken der Gletscherfront bedingt einen starken Anstieg der minimalen Hauptspannung. Auch diese Erhöhung hängt stark von der Position des Messpunktes ab. Deshalb ist dieser Anstieg am Messpunkt 6 nur gering ausgeprägt, da dieser Messpunkt während der Berechnung nicht vom Gletscher überfahren wird.

Der Rückzug des Gletschers verursacht wiederum lokale Schwankungen im Spannungsverlauf und ebenfalls das bereits beschriebene Sägezahnmuster. Zum Abschluss des Rückzugs ($t = 1,5$) ist der ursprüngliche Spannungszustand noch nicht wieder erreicht. Bei Fortsetzung der Berechnung über einen längeren Zeitraum nähern sich die Spannungswerte wieder dem Ausgangszustand an. Beachtenswert ist, dass der Rückzug des Gletschers kleinere Werte der Minimalspannung verursacht als der Vortrieb (Messpunkte 31 und 21). Das bedeutet, dass unter Umständen auch der Rückzug eines Gletschers zur Verletzung des Minimalspannungskriteriums führen könnte.

4.2 Verletzung des Minimalspannungskriteriums

In einigen Modellläufen (7 – 14, 17) verursachen der Vortrieb und der Rückzug des Gletschers eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums. Für alle Messpunkte im Salzdiapir ist der Verlauf von $\sigma_3 - p_{fluid}$ für alle Modellläufe in Anhang A.1 dargestellt (Abb. A.1 – Abb. A.18). In diesen Abbildungen zeigt sich, dass das Minimalspannungskriterium im Salzdiapir ausschließlich im Bereich des Salzspiegels für einige Modellläufe verletzt wird. Deshalb werden im Folgenden nur die Modellläufe bzw. Messpunkte näher betrachtet, in welchen das Minimalspannungskriterium verletzt wird. In Abb. 4.2 und Abb. 4.3 sind die Ergebnisse dieser Modellläufe für diese Messpunkte (Messpunkte 14 und 19) dargestellt.

Das Herannahen eines Gletschers führt im Berechnungsverlauf zu einer Unterschreitung des Minimalspannungskriteriums (Abb. 4.2, Abb. 4.3). Dies gilt nur für Modellläufe, in welchen die Gletschermächtigkeit 700 m überschreitet. Unterhalb dieser Mächtigkeit kann in den Berechnungen keine Verletzung gezeigt werden (siehe auch Abb. A.6 und Abb. A.10).

Das weitere Herannahen der Gletscherfront führt dazu, dass im zeitlichen Verlauf ein Minimum der Differenz $\sigma_3 - p_{fluid}$ erreicht wird, noch bevor der Messpunkt im Salzdiapir durch den Gletscher überfahren wird (Messpunkt 19) bzw. der Gletscher die nächstgelegene Position zum Messpunkt einnimmt (Messpunkt 14). Die weitere vollständige Überfahrung (Messpunkt 19) und auch die kürzeste (horizontale) Entfernung an der Modelloberkante zum Messpunkt (14) führen dagegen zu einer Erhöhung der Minimalspannung und damit zu keiner Verletzung des Minimalspannungskriteriums im weiteren Berechnungsverlauf. Diese Ergebnisse decken sich mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen /BRU 11/, /KOC 12/, dass eine Gletscherauflast über einem Salzdiapir

zu keiner Integritätsverletzung führt, sondern dass das Heranrücken eines Gletschers der – im Hinblick auf eine Integritätsverletzung – bedeutsamere Prozess ist.

Der danach stattfindende Rückzug des Gletschers führt in einigen Fällen zu erneuter, allerdings weniger deutlicher Verletzung des Kriteriums (ca. $t = 1,03$ in Abb. 4.2 und Abb. 4.3) für Gletschermächtigkeiten von 700 – 1.000 m.

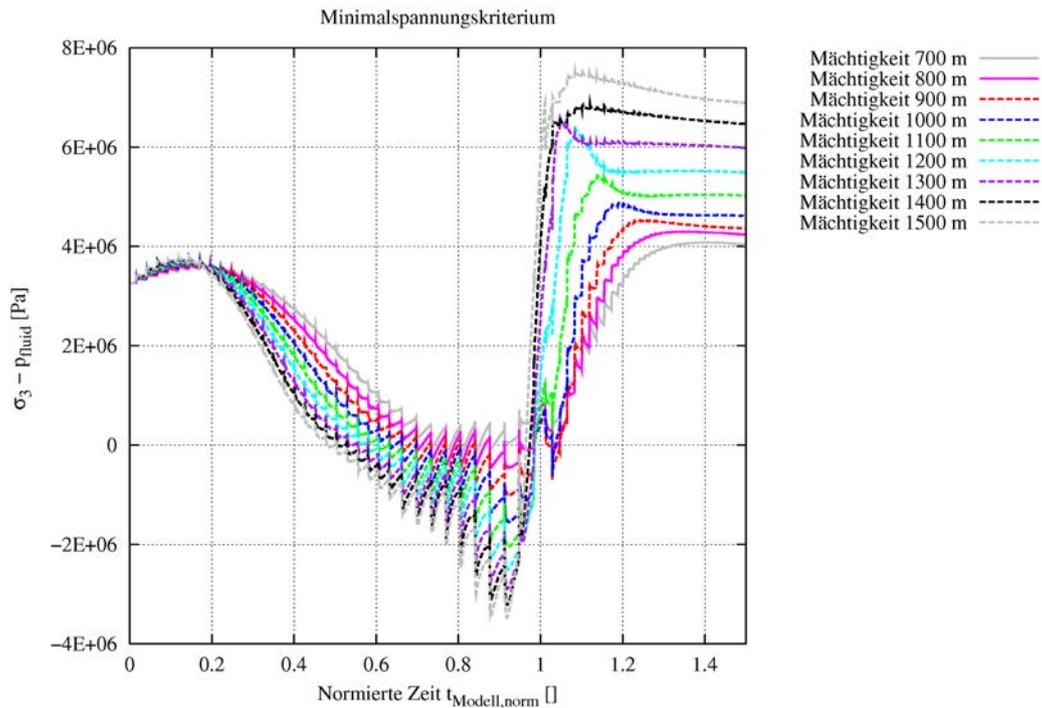


Abb. 4.2 Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 14

Gletschergeschwindigkeit: 100 m/a bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug)

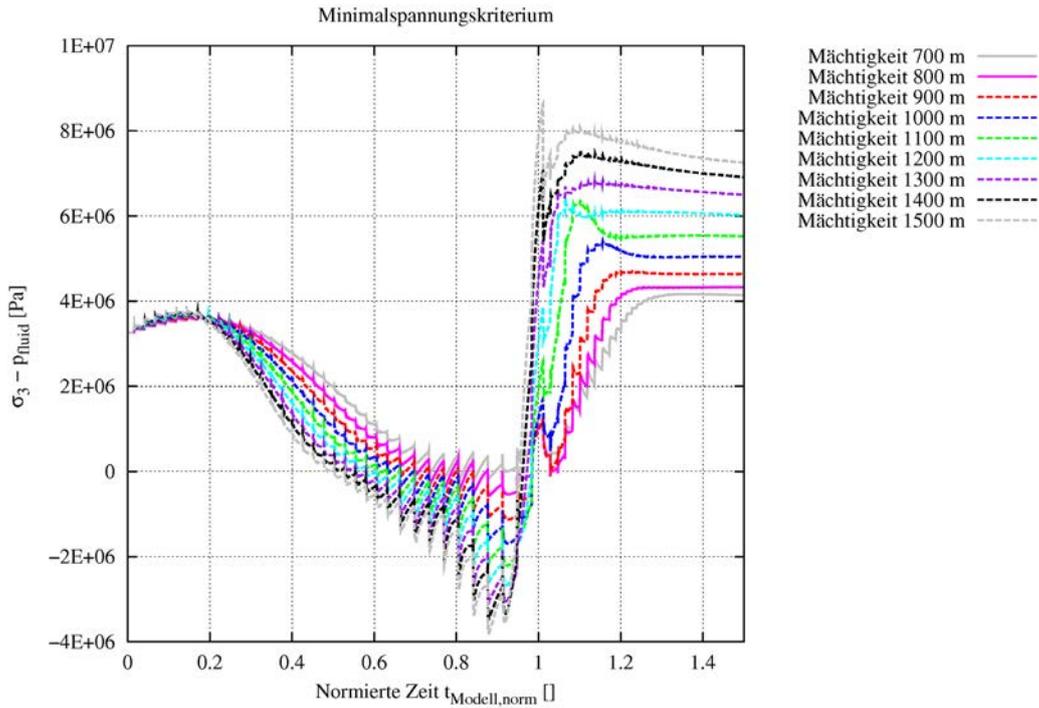


Abb. 4.3 Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 19

Gletschergeschwindigkeit: 100 m/a bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug)

Die Abhängigkeit der Verletzung des Minimalspannungskriteriums von der Gletschergeschwindigkeit bei jeweils gleicher Mächtigkeit von 1.500 m zwischen den Modellläufen ist weniger deutlich. In Abb. 4.4 und Abb. 4.5 sind die Ergebnisse der Modellläufe 16 – 21 dargestellt, jeweils für Messpunkt 14 und 19. In Abb. 4.4 ist erkennbar, dass das Minimalspannungskriterium für fast alle verwendeten Geschwindigkeiten verletzt wird. Die Ausnahme bildet der Modelllauf mit der geringsten Geschwindigkeit von 10 m/a und 20 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug), in welchem das Kriterium nicht verletzt wird. Diese Ausnahme gilt bereits nicht mehr für den Spannungsverlauf für Messpunkt 19. Hier wird selbst bei dieser geringen Geschwindigkeit das Minimalspannungskriterium – wenn auch nur kurzfristig – verletzt (Abb. 4.5, ca. $t = 0,75$).

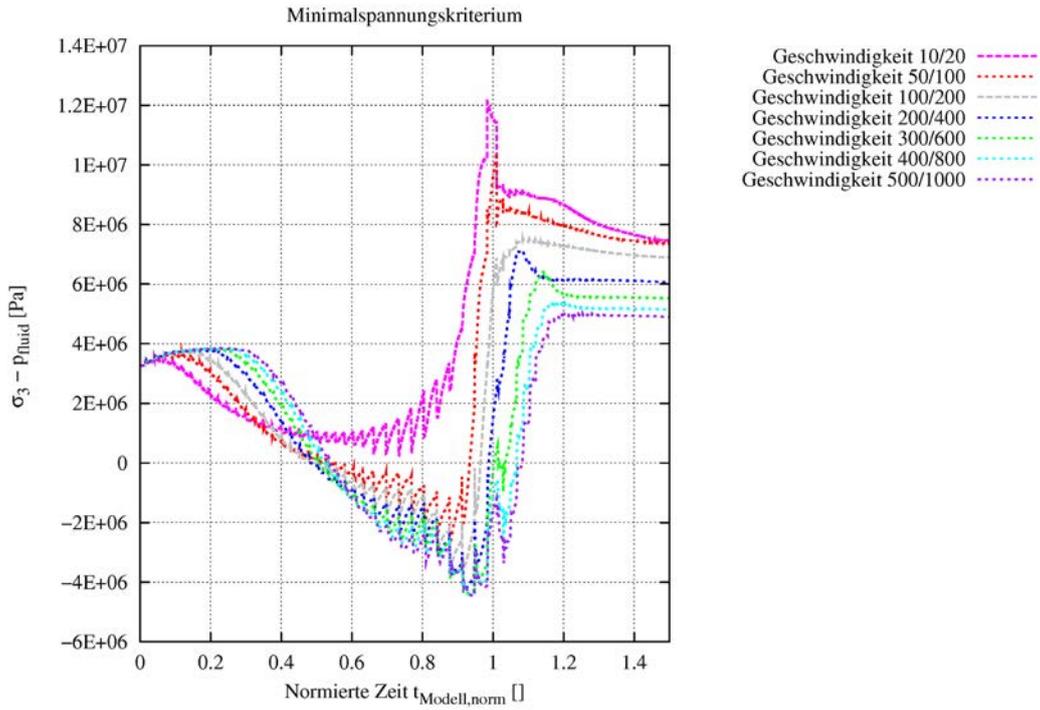


Abb. 4.4 Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 14 bei einer Mächtigkeit von 1.500 m

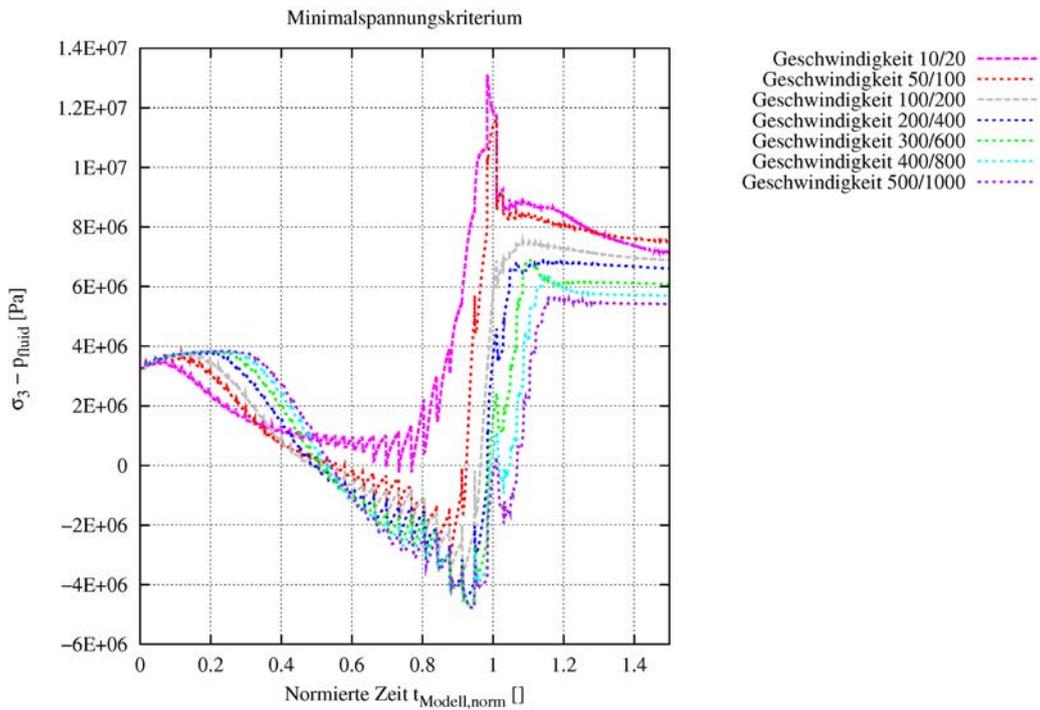


Abb. 4.5 Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 19 bei einer Mächtigkeit von 1.500 m

Möglicherweise vorhandene Gesetzmäßigkeiten zwischen Gletschermächtigkeit, Gletschergeschwindigkeit und dem Ausmaß der Verletzung des Minimalspannungskriteriums lassen sich anhand zweier Charakteristika aus den berechneten Modellläufen darstellen. Diese Charakteristika sind:

- (1) Das Minimum des zeitlichen Verlaufs der Differenz $\sigma_3 - p_{fluid}$ (Minimalspannung – Fluiddruck) am Salzspiegel.
- (2) Der Zeitpunkt der erstmaligen Verletzung des Minimalspannungskriteriums.

Die Minima von $(\sigma_3 - p_{fluid})$ in Abhängigkeit von der Gletschermächtigkeit sind in Abb. 4.6 dargestellt. Hier (und auch in Abb. 4.7) werden auch Modellläufe berücksichtigt, in welchem das Minimalspannungskriterium nicht verletzt wurde. Im Vergleich der Modellläufe zeigt sich bei gleicher Gletschergeschwindigkeit (100 bzw. 200 m/a für Vortrieb bzw. Rückzug) für die größte Gletschermächtigkeit das niedrigste Minimum und für die niedrigste Gletschermächtigkeit das höchste Minimum. Im Rahmen dieser Parameterstudie weisen die Berechnungsergebnisse auf einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Gletschermächtigkeit und Minima hin. Die Unterschiede der Minima zwischen den – horizontal ca. 75 m entfernt voneinander liegenden – Messpunkten sind gering, nehmen aber mit zunehmender Gletschermächtigkeit zu.

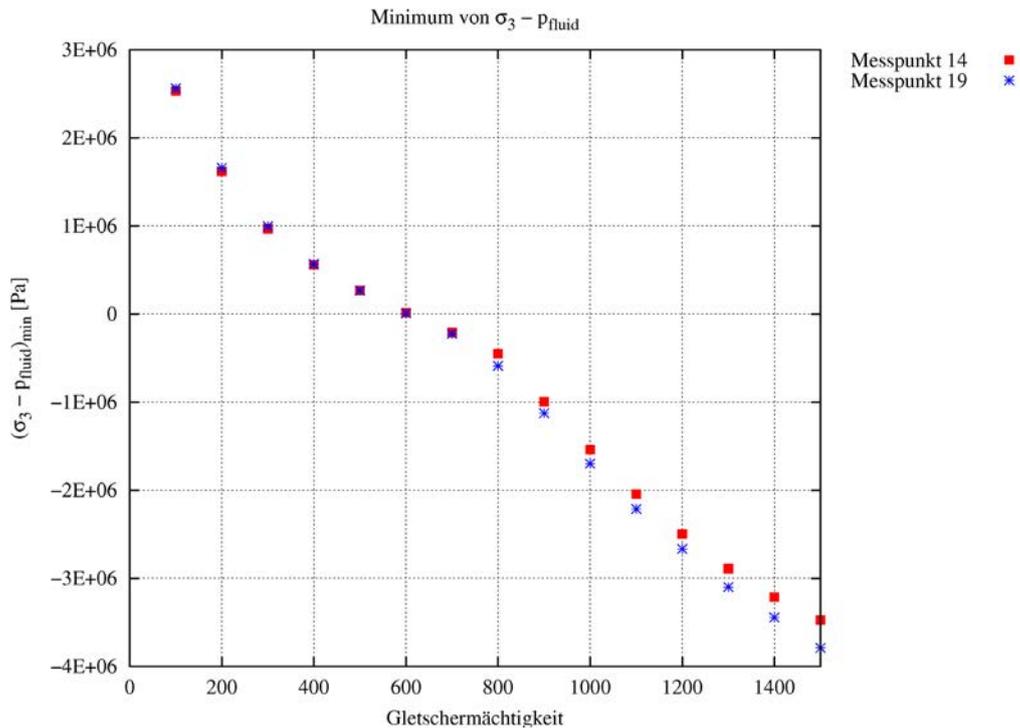


Abb. 4.6 Abhängigkeit des Minimums ($\sigma_3 - p_{fluid}$) von der Gletschermächtigkeit

Gletschergeschwindigkeit: 100 m/a bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug)

Die Abhängigkeit der Minima ($\sigma_3 - p_{fluid}$) von der Gletschergeschwindigkeit ist in Abb. 4.7 dargestellt. In diesem Fall ist kein linearer Zusammenhang erkennbar. Mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt jeweils für die Modellläufe das Minimum der Differenz $\sigma_3 - p_{fluid}$. Die Daten zeigen, dass die Verringerung der Minima bei Erhöhung der Geschwindigkeit jeweils weniger stark ausgeprägt ist, beispielsweise beträgt der Unterschied der Minima ($\sigma_3 - p_{fluid}$) zwischen einer Vortriebsgeschwindigkeit von 100 m/a und 200 m/a noch etwa 0,7 MPa während es zwischen 200 m/a und 300 m/a nur etwa 0,2 MPa sind. Die Daten deuten darauf hin, dass bei weiter zunehmender Geschwindigkeit ein unterer Grenzwert erreicht wird. Die Ursache für die Verminderung des Minimums mit zunehmender Geschwindigkeit liegt vermutlich darin, dass das Salzkriechen, welches durch die Spannungsänderung verursacht wird, bei hohen Geschwindigkeiten lokal am Messpunkt weniger weit fortgeschritten ist als bei niedrigen Geschwindigkeiten.

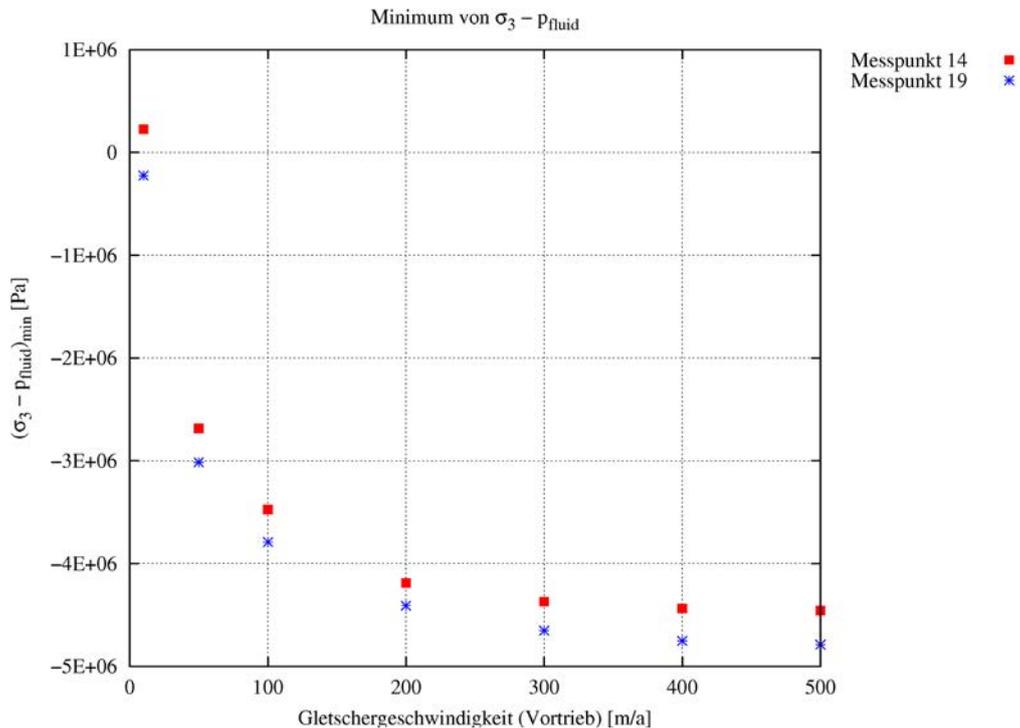


Abb. 4.7 Abhängigkeit des Minimums ($\sigma_3 - p_{fluid}$) von der Gletschergeschwindigkeit

Gletschermächtigkeit: 1.500 m

Nicht nur das Ausmaß (Wert des Minimums) sondern auch der Zeitpunkt, zu welchem das Minimalspannungskriterium im Modelllauf am Salzspiegel (Messpunkte 14 und 19) verletzt wird, weist eine Abhängigkeit sowohl von der Gletschermächtigkeit als auch von der Gletschergeschwindigkeit auf. In Abb. 4.8 ist die Abhängigkeit des Zeitpunktes von der Gletschermächtigkeit, in Abb. 4.9 von der Gletschergeschwindigkeit, dargestellt. Je größer die Mächtigkeit, desto früher im Modellverlauf wird das Kriterium verletzt: bei einer Mächtigkeit von 1.500 m bereits nachdem der Gletscher erst die Hälfte der Strecke bis zum Mittelpunkt des Modells zurückgelegt hat (Abb. 4.8, ca. $t = 0,5$).

Die Ergebnisse in Abb. 4.8 weisen auf einen linearen Zusammenhang zwischen Gletschermächtigkeit und dem Zeitpunkt der Verletzung des Minimalspannungskriteriums hin. Beachtenswert ist, dass für Mächtigkeiten < 1.300 m die Zeitpunkte der Verletzung für beide Messpunkte identisch sind. Für große Gletschermächtigkeiten ist dies nicht der Fall. Hier sinkt die Minimalspannung für Messpunkt 14 deutlich früher unter den Fluiddruck als es für Messpunkt 19 der Fall ist. Dies ist bemerkenswert, da Messpunkt 14 eine etwas größere Entfernung zur Gletscherfront besitzt und somit erwartet werden könnte, dass das Minimalspannungskriterium für den näherliegenden Mess-

punkt früher verletzt wird. Das dies nicht der Fall ist, deutet daraufhin, dass möglicherweise Unterschiede in den Verformungsprozessen zwischen den beiden Messpunkten existieren, die Auswirkungen auf die Verletzung des Minimalspannungskriteriums haben. Eine detaillierte Analyse der Verformungs- und Verschiebungsprozesse die im Rahmen dieser Arbeit nicht stattfand, ist für das weitere Verständnis der Prozesse am Salzspiegel notwendig.

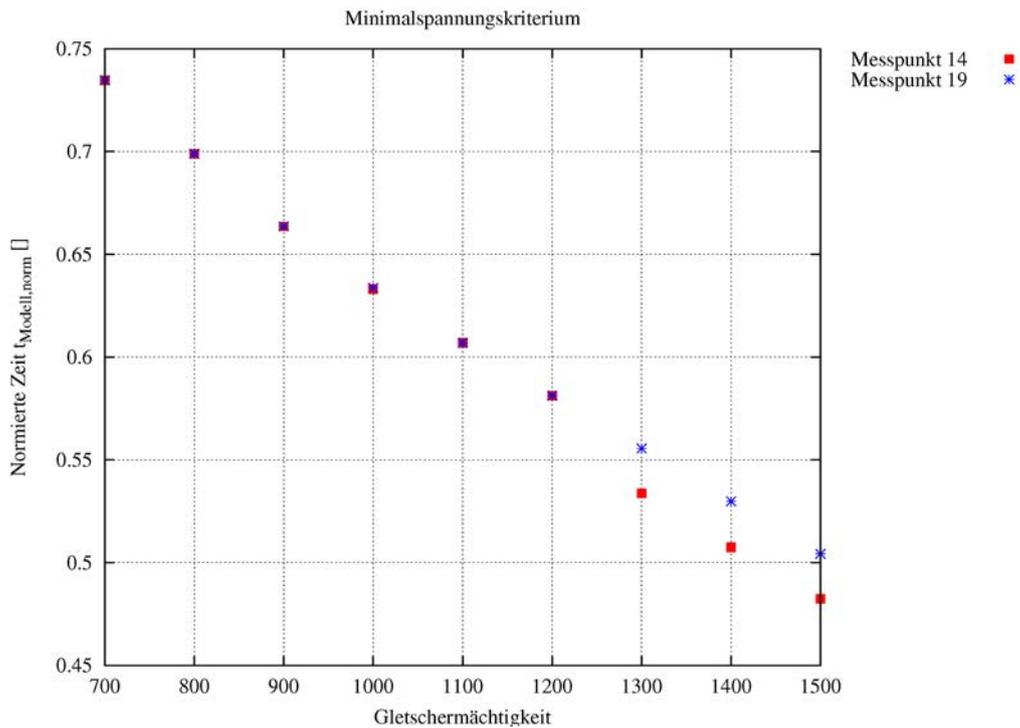


Abb. 4.8 Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Minimalspannungskriteriums von der Gletschermächtigkeit

Gletschergeschwindigkeit: 100 m/a bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug)

Zwischen der Gletschergeschwindigkeit und dem Zeitpunkt der erstmaligen Verletzung des Minimalspannungskriteriums ist kein einheitlicher Zusammenhang erkennbar. Bis zu einer Geschwindigkeit von 200 m/a (Vortrieb) sinkt dieser Zeitpunkt auf Werte von $t < 0,5$, für größere Geschwindigkeiten steigt der Zeitpunkt der Verletzung wieder leicht an. Die Ursache für dieses uneinheitliche Verhalten sollte in zukünftigen Analysen des Verformungsverhaltens am Salzspiegel untersucht werden.

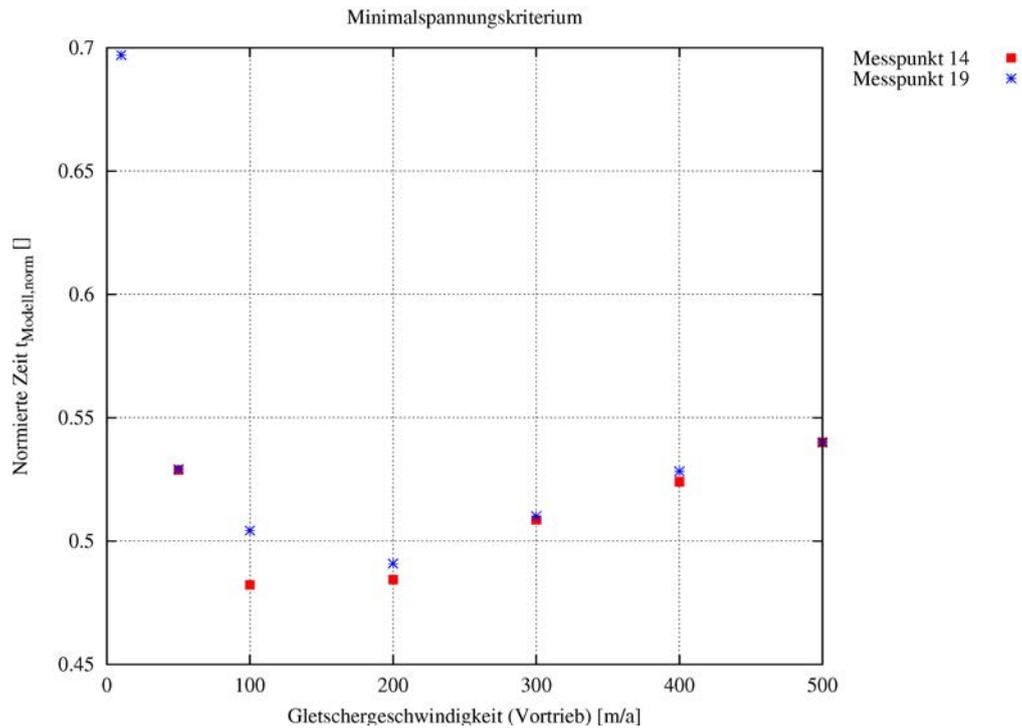


Abb. 4.9 Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Minimalspannungskriteriums von der Gletschergeschwindigkeit

Gletschermächtigkeit: 1.500 m

4.3 Verletzung des Dilatanzkriteriums

Das Dilatanzkriterium wird ebenso wie das Minimalspannungskriterium nur im Bereich des Salzspiegels verletzt. Für Messpunkt 14 sind die Ergebnisse in Abb. 4.10, für Messpunkt 19 in Abb. 4.11 dargestellt, für alle anderen Messpunkte in Anhang A.2 (Abb. A.19 – Abb. A.34) Das Dilatanzkriterium ist verletzt, wenn die Spannungen $\sigma_{N,okt}, \tau_{dil,okt}$ im Verlauf der Berechnung (hier auch „Spannungspfad“ genannt) mindestens einmal über der Dilatanzgrenze liegen.

Das Dilatanzkriterium wird nur in wenigen Modellläufen und nur sehr geringfügig verletzt, die Überschreitung der Dilatanzgrenze beträgt nur wenige Pa. Beachtenswert ist, dass innerhalb der betrachteten Parameterbandbreite die Verletzung des Dilatanzkriteriums nicht von der Gletschermächtigkeit abhängt. Für die Modellläufe 1 – 14 sowie 17 wurde in keinem Fall die Dilatanzgrenze überschritten.

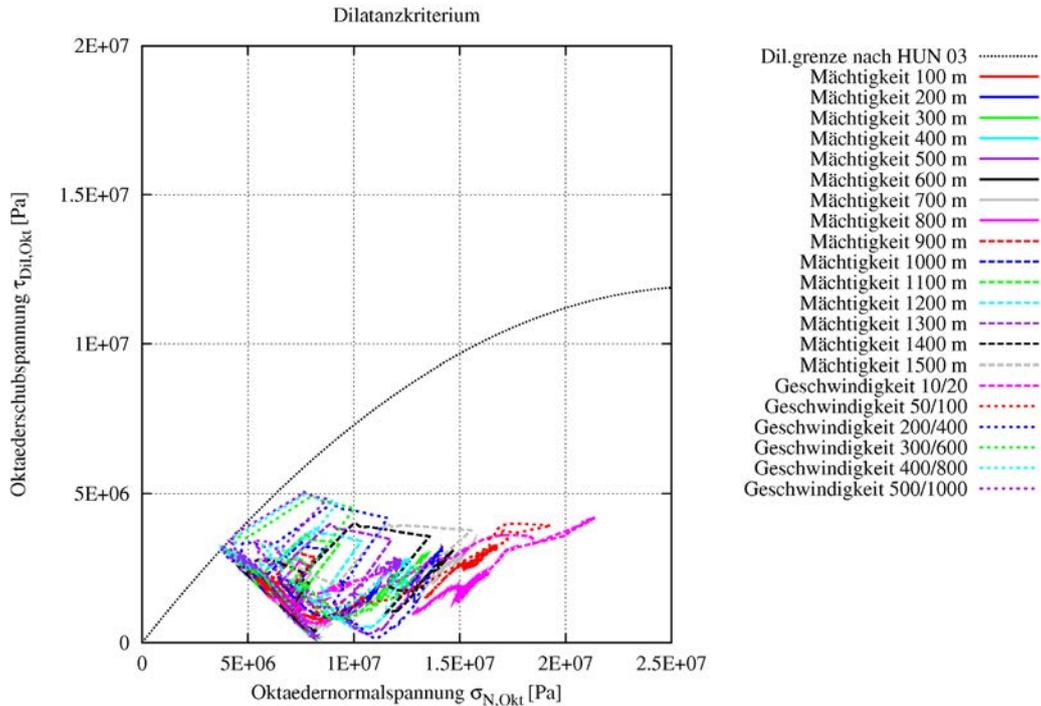


Abb. 4.10 Spannungspfad ($\sigma_{N,okt}, \tau_{okt}$) an Messpunkt 14 für alle Modellläufe

Die Dilatanzgrenze wird nur in den Modellläufen überschritten, in denen die Geschwindigkeit des Gletschers höher ist als 100 bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug) und die Gletschermächtigkeit im Modell 1.500 m beträgt. Dies gilt gleichermaßen für beide Messpunkte (14 und 19) im Bereich des Salzspiegels. Deshalb wird die Abhängigkeit der Verletzung des Dilatanzkriteriums von der Gletschergeschwindigkeit – analog zum Minimalspannungskriterium – im Folgenden anhand zweier Charakteristika beschrieben. Dies sind:

- (1) Die maximale Oktaederschubspannung $(\tau_{dil,okt})_{max}$ während einer Überschreitung der Dilatanzgrenze.
- (2) Der Zeitpunkt zu welchem die Dilatanzgrenze erstmalig überschritten wird.

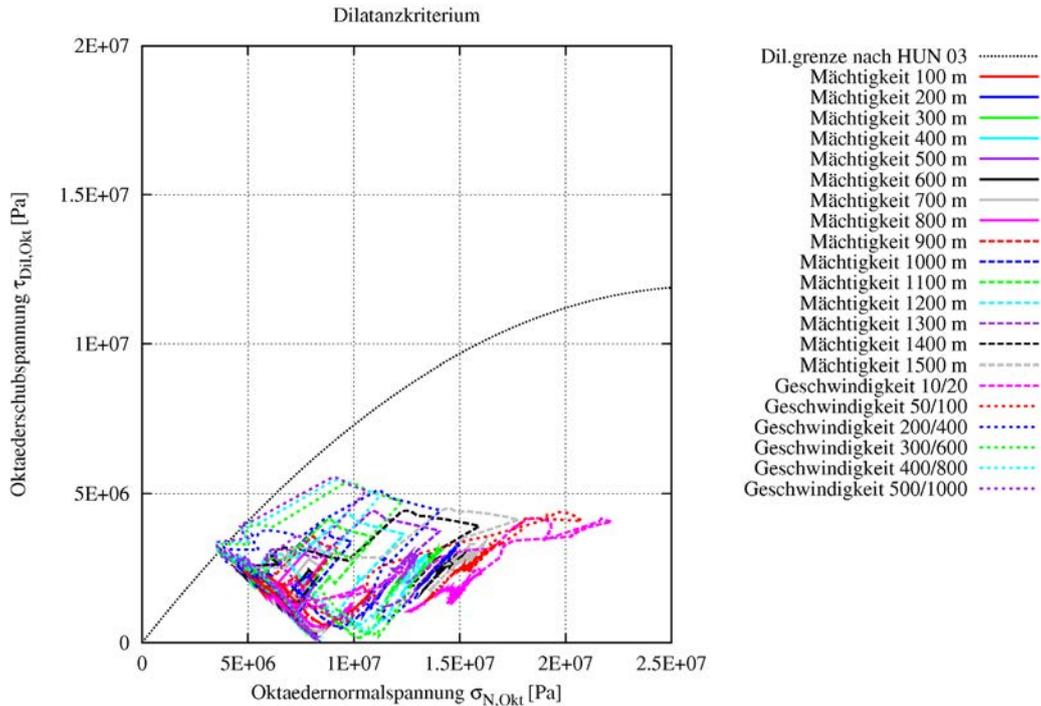


Abb. 4.11 Spannungspfad ($\sigma_{N,okt}, \tau_{okt}$) an Messpunkt 19 für alle Modellläufe

Zum besseren Verständnis sind in Abb. 4.12 diese beiden Charakteristika illustriert. In dieser Abbildung ist der vereinfachte² Spannungspfad ($\sigma_{N,okt}, \tau_{dil,okt}$) eines Modelllaufs dargestellt. In Abb. 4.12 ist erkennbar, dass während des Vordringens der Gletscherfront der Wert der Oktaedernormalspannung kontinuierlich abnimmt während die Oktaederschubspannung zunimmt. Das führt zu einer Überschreitung der Dilatanzgrenze und damit zu einer Verletzung des Dilatanzkriteriums. Im weiteren Verlauf bewegt sich der Spannungspfad immer nahe an der Dilatanzgrenze. Schließlich erreicht der Spannungspfad den Maximalwert der Oktaederschubspannung während der Überschreitung der Dilatanzgrenze. Danach steigen die Oktaederschubspannung und auch

² Der Spannungspfad wird gebildet aus Vektoren, welche zu jedem Zeitschritt aus der Differenz des jeweiligen Spannungszustands gebildet werden:

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} \sigma_{N,okt,2} - \sigma_{N,okt,1} \\ \tau_{okt,2} - \tau_{okt,1} \end{pmatrix}$$

Die Vereinfachung besteht hier darin, dass nicht alle Vektoren jedes Zeitschritts abgebildet werden, sondern nur diejenigen, in welchen jeweils eine Komponente $> |\pm 0.2|$ MPa beträgt. Damit soll eine „Überfrachtung“ der Illustration vermieden werden, der generelle Verlauf des Spannungspfads bleibt erhalten.

die Oktaedernormalspannung deutlich an, so dass der Spannungspfad für die weitere Berechnung die Dilatanzgrenze stets unterschreitet.

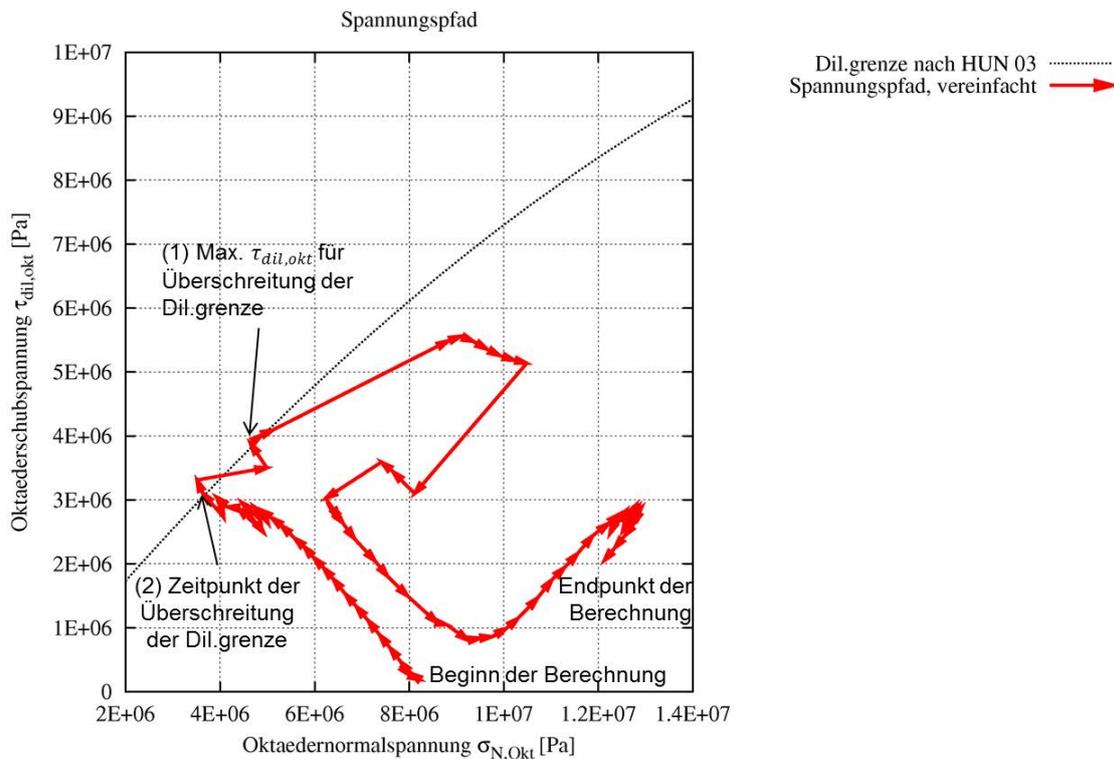


Abb. 4.12 Beispielhafter Spannungspfad (Messpunkt 19) für die Oktaederspannungen
Mächtigkeit 1.500 m, Geschwindigkeit 500 bzw. 1.000 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug)

In Abb. 4.13 ist für die Modellläufe, in welchen das Dilatanzkriterium verletzt wird, die Abhängigkeit des Maximalwerts der Oktaederschubspannung von der Gletschergeschwindigkeit dargestellt. Für beide Messpunkte (14 und 19) steigt der Maximalwert mit zunehmender Gletschergeschwindigkeit an. Analog zur Entwicklung des Minimums bei der Betrachtung des Minimalspannungskriteriums liegt die Ursache für die Erhöhung des Maximums von $(\tau_{dil,okt})_{max}$ mit zunehmender Geschwindigkeit vermutlich darin, dass das Salzkriechen bei hohen Geschwindigkeiten lokal am Messpunkt weniger weit fortschreiten kann als bei niedrigen Geschwindigkeiten und somit der Spannungszustand, der zu einer Verletzung führt, nicht weiter abgebaut werden kann.

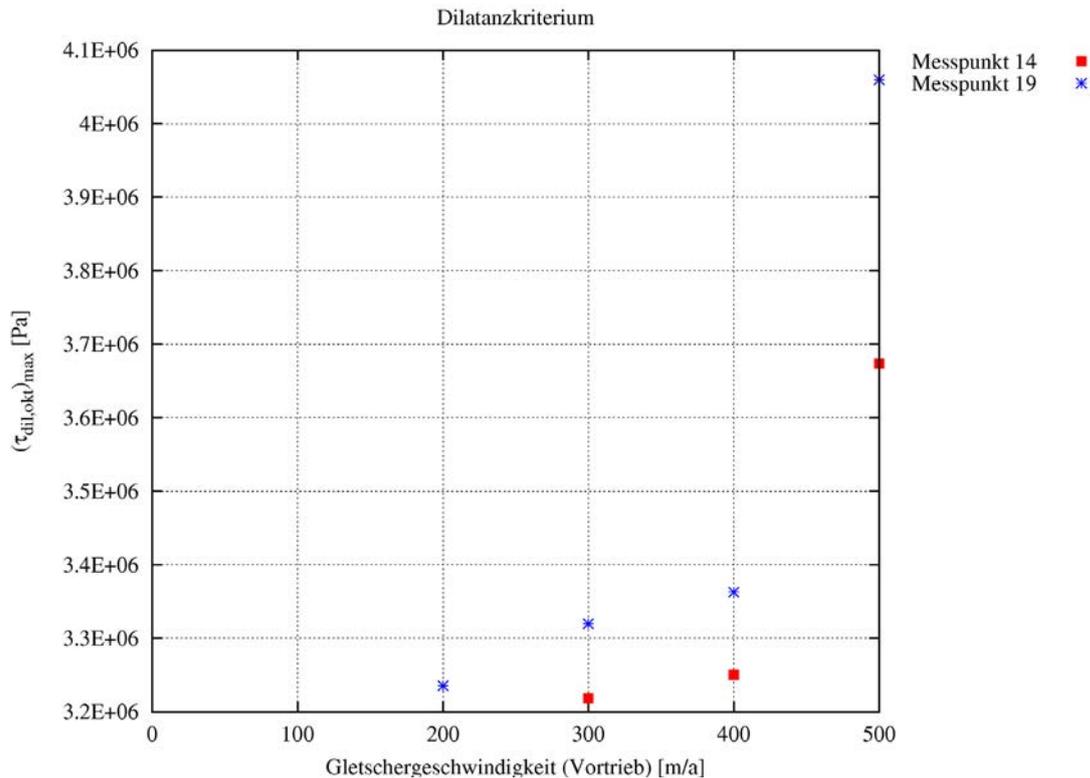


Abb. 4.13 Abhängigkeit des Maximums der Oktaederschubspannung ($(\tau_{dil,okt})_{max}$) von der Gletschergeschwindigkeit

Die Betrachtung des Zeitpunkts zu welchem die Dilatanzgrenze erstmalig überschritten wird, ist in Abb. 4.14 dargestellt und zeigt für beide Messpunkte ein uneinheitliches Bild. Während für Messpunkt 14, also für den Messpunkt, der zu keinem Zeitpunkt von der Gletscherfront „überfahren“ wird, die Verletzung des Kriteriums mit zunehmender Geschwindigkeit erhöht, ist für Messpunkt 19 eine Zunahme der Gletschergeschwindigkeit mit einer früheren Verletzung des Dilatanzkriteriums verbunden. Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass sich die Verformungsprozesse an beiden Seiten der vertikalen Symmetrieachse des Modells deutlich voneinander unterscheiden.

Für alle Modellläufe erfolgt die Verletzung des Dilatanzkriteriums erst kurz vor Erreichen des Salzdiapirzentrums und damit kurz vor (für Messpunkt 14) oder während der Überfahrung (für Messpunkt 19) durch die Gletscherfront. Damit wird im Verlauf der Berechnung das Dilatanzkriteriums deutlich später als das Minimalspannungskriteriums verletzt.

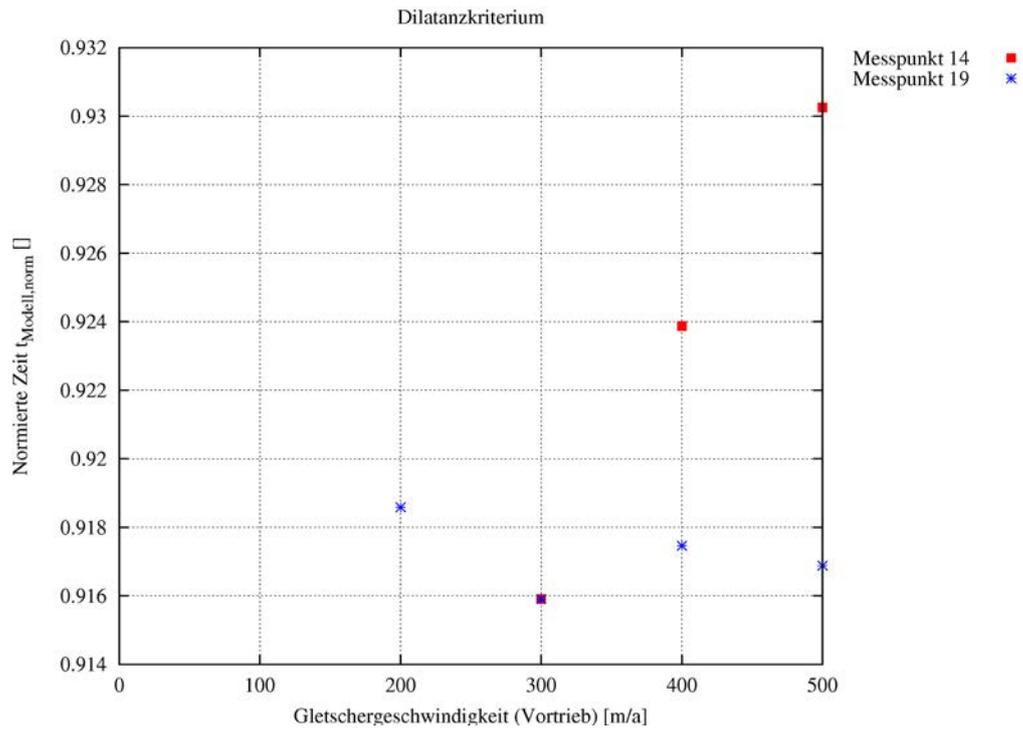


Abb. 4.14 Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Dilatanzkriteriums von der Gletschergeschwindigkeit

Gletschermächtigkeit: 1.500 m

5 Schlussfolgerungen

Zusammenfassung

Die Berechnungen in dieser Parameterstudie zeigen, dass die Integritätskriterien

- (1) Minimalspannungskriterium und
- (2) Dilatanzkriterium

während des Herannahens eines Gletschers verletzt werden. Das Minimalspannungskriterium wird verletzt:

- ab einer Mächtigkeit des Gletschers von 700 m, wenn die Gletschergeschwindigkeit 100 bzw. 200 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug) beträgt,
- ab einer Gletschergeschwindigkeit von mehr als 10 bzw. 20 m/a (Vortrieb bzw.-Rückzug) wenn die Gletschermächtigkeit 1.500 m beträgt.

Das Dilatanzkriterium wird verletzt:

- ab einer Gletschergeschwindigkeit von 200 bzw. 400 m/a (Vortrieb bzw. Rückzug) wenn die Gletschermächtigkeit 1.500 m beträgt.

Im Ergebnis lassen sich folgende grundsätzliche Aussagen treffen:

- Die Möglichkeit einer Verletzung der Integritätskriterien steigt mit zunehmender Gletschermächtigkeit und mit zunehmender Gletschergeschwindigkeit.
- Mit zunehmender Teufe im Salzdiapir sinkt die Möglichkeit der Integritätsverletzung, so dass diese vorwiegend am Salzspiegel (bei vorhandenem Deckgebirge) stattfindet.
- Für Lokationen in welchen eine Verletzung des Dilatanzkriteriums indiziert ist, findet diese kurz vor der Überfahung durch den Gletscher bzw. in sehr geringer Entfernung der Gletscherfront statt.
- Wie bereits in anderen Arbeiten gezeigt, findet die Verletzung des Minimalspannungskriteriums während des Herannahens der Gletscherfront statt. Eine statische Auflast hat keine Auswirkung auf eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums.

Bedeutung der Ergebnisse für einen realen Standort

Trotz der im Modell genutzten vereinfachten Geometrie des Salzdiapirs und des Gletschers sind die Ergebnisse grundsätzlich vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Studien, in welchen etwas komplexere /BRU 11/ oder sogar realistische /KOC 12/ Modellgeometrien genutzt wurden. Die grundsätzlichen Aussagen hinsichtlich der Verletzung beider Integritätskriterien als Funktion von Gletschermächtigkeit und -geschwindigkeit lassen sich deshalb mit Einschränkungen auf reale Standorte übertragen.

Insbesondere der Unterschied in den Ergebnissen für Messpunkt 14 und 19 zeigt, dass Verformungsprozesse im Salzdiapir auch in lateraler Richtung lokationsabhängig sind, gerade hinsichtlich der relativen Position der Lokation zur herannahenden Gletscherfront. Eine Übertragung der berechneten Detailergebnisse für den genutzten generischen Salzdiapir auf reale Standortgegebenheiten mit komplexen geologischen Strukturen ist deshalb nicht möglich, da nicht auszuschließen ist, dass Details der Ergebnisse der grob vereinfachten Diapirstruktur im Modell geschuldet sind. Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Parameterstudie eine Reihe von Faktoren nicht untersucht, die einen Einfluss die Entwicklung der Spannung und Deformation des Diapirs haben können und die in das generische Modell des Salzdiapirs eingegangen sind (siehe unten).

Anhand dieser Analysen können möglicherweise nicht notwendige Konservativitäten nicht abgebaut werden, im Gegenteil zeigt sich, dass in der Bandbreite der Parameter Gletschermächtigkeit und -geschwindigkeit die in dieser Studie genutzten Maximalwerte die größte Integritätsverletzung zur Folge haben. Das bedeutet, dass für zukünftige Sicherheitsanalysen umso mehr eine realistische und gesicherte Erkenntnis über diese Parameter notwendig ist.

Ausblick / zukünftige Untersuchungen

Wie oben erwähnt konnten eine Reihe von Faktoren in dieser Parameterstudie nicht berücksichtigt werden. Deshalb bleibt unklar, ob diese Faktoren für die Spannungsentwicklung und die Deformation Bedeutung haben oder sich z. B. nur hinsichtlich des Initialzustands auswirken.

Nachfolgende sind einige dieser Faktoren aufgeführt, welche im Rahmen zukünftiger Untersuchungen betrachtet werden sollten:

- **Die Berücksichtigung der Mächtigkeit des Deckgebirges über dem Salzdiapir.** In der vorliegenden Arbeit wurde von einer Deckgebirgsmächtigkeit von 300 m ausgegangen. Der Effekt einer geringeren oder größeren Mächtigkeit wurde nicht berücksichtigt und hat mindestens einen Einfluss auf den initialen Spannungszustand. Die damit einhergehende Änderung der Lokation des Salzspiegels kann Auswirkungen auf die Verletzung der Integritätskriterien bedingen.
- **Eine Mächtigkeitsreduktion des Deckgebirges während des Herannahes des Gletschers oder während der Gletscherüberfahung.** Das Entstehen einer sog. glazialen Rinne im Laufe mehrerer Kaltzeiten wird als wahrscheinlich angesehen /BEU 12/. Der Einfluss auf den Salzdiapir lässt sich bislang nur grob abschätzen. Modellrechnungen hinsichtlich dieser Thematik erfordern allerdings ein weitaus komplexeres Modell als das hier verwendete.
- **Die Form des Diapirs, z. B. hinsichtlich der Symmetrie, der Abrundung, etc.** Die Form des Diapirs wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht variiert. Eine Änderung der Form hat ebenfalls mindestens Auswirkungen auf den initialen Spannungszustand.
- **Der Vortriebswinkel des Gletschers in Relation zum Salzstockstreichen.** In der vorliegenden Studie ist dieser senkrecht zum Streichen, aber denkbar ist jeder andere Winkel bis zur Parallelität des Vortriebs und des Streichens. In 3D Analysen mit einem Vortrieb parallel zum Streichen des Salzstocks zeigen sich im Vergleich zu den 2D Analysen mit einem Vortrieb senkrecht zum Streichen andere Lokationen und Arten (Dilatanz/Minimalspannung) der Kriterienverletzung /KOC 12/. Weiterführende Studien könnten zeigen, ob dies ein Effekt ist der den unterschiedlichen Analysemethoden (2D zu 3D) zu Grunde liegt, oder tatsächlich der Vortriebswinkel des Gletschers in Relation zum Salzstockstreichen eine grundsätzliche Bedeutung besitzt.
- **Eine vollständige hydro-mechanische Kopplung um realitätsnahe hydraulische Zustände zu berücksichtigen.** In der vorliegenden Arbeit wurde das Minimalspannungskriterium unter Verwendung einer hypothetischen Wassersäule ohne Berücksichtigung der tatsächlichen hydraulischen Drücke genutzt.

Literaturverzeichnis

- /BER 12/ Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M.: The Mechanical Behavior of Salt VII. ISBN 9780415621229, 22. März 2012.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BRU 11/ Bruns, J., Boetticher, L., Doose, H., Cottrell, M., Wolff, P., Günther, R.-M., Naumann, D., Popp, T., Salzer, K.: Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers. Abschlussbericht, 292 Seiten, Golder Associates GmbH in Kooperation mit IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Celle, 2011.
- /CRI 98/ Cristescu, N.D., Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics. ISBN 0471955175, Wiley & Sons, 1998.
- /DES 03/ Delisle, G., Caspers, G., Freund, H.: Permafrost in north-central Europe during the Weichselian: how deep. S. 187-191, Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost.
- /EHL 04/ Ehlers, J., Eissmann, L., Lippstreu, L., Stephan, H.-J., Wansa, S.: Pleistocene glaciations of North Germany. In: Developments in Quaternary Sciences, Vol. Volume 2, Part 1, Ehlers, J., Gibbard, P.L. (Editoren), S. 135-146, ISBN 1571-0866, Elsevier, 2004.

- /EHL 11/ Ehlers, J., Grube, A., Stephan, H.-J., Wansa, S.: Chapter 13 - Pleistocene Glaciations of North Germany—New Results. In: Developments in Quaternary Sciences, Vol. Volume 15, Jürgen Ehlers, P.L.G., Philip, D.H. (Editoren), S. 149-162, ISBN 1571-0866, Elsevier, 2011.
- /GRA 10/ Grassmann, S., Cramer, B., Delisle, G., Hantschel, T., Messner, J., Winsemann, J.: pT-effects of Pleistocene glacial periods on permafrost, gas hydrate stability zones and reservoir of the Mittelplate oil field, northern Germany. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 27, No. 1, S. 298-306, DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.08.002>.
- /HAM 07/ 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.: BMBF-Verbundprojekt: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz - Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Synthesebericht.
- /HAM 12/ Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretzki, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A., Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273, ISBN: 978-3-939355-49-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /HUN 99/ Hunsche, U., Hampel, A.: Rock salt - the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, Vol. 52, No. 3, S. 271-291, April 1999.
- /HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben – Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht. Arbeitspaket 9G 213 811, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.

- /ITA 09/ ITASCA: FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Manuals. 4. Edition, Version 4.0, ITASCA Consulting Group Inc.: Minneapolis, Minnesota, USA, 2009.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /NAR 13/ Narloch, W., Wysota, W., Piotrowski, J.A.: Sedimentological record of subglacial conditions and ice sheet dynamics of the Vistula Ice Stream (north-central Poland) during the Last Glaciation (accepted, in proof). *Sedimentary Geology*, No. 0, DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.05.001>.
- /SAF 04/ Šafanda, J., Szewczyk, J., Majorowicz, J.: Geothermal evidence of very low glacial temperatures on a rim of the Fennoscandian ice sheet. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, No. 7, S. L07211, DOI 10.1029/2004gl019547.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Maximale Ausdehnung der Eisschilde in den Kaltzeiten im Pleistozän (geändert aus /EHL 11/)	5
Abb. 2.2	Dilatanzgrenze nach /CRI 98/, /HUN 03/	8
Abb. 3.1	Modellaufbau	9
Abb. 3.2	Spannungsmesspunkte (Kreuze, Messpunktnr.) im Berechnungsmodell	13
Abb. 4.1	Exemplarischer Spannungsverlauf an ausgewählten Messpunkten. Detailausschnitt zur Illustration der Sägezahnform	16
Abb. 4.2	Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 14	18
Abb. 4.3	Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 19	19
Abb. 4.4	Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 14 bei einer Mächtigkeit von 1.500 m	20
Abb. 4.5	Modellläufe mit Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Messpunkt 19 bei einer Mächtigkeit von 1.500 m	20
Abb. 4.6	Abhängigkeit des Minimums ($\sigma_3 - p_{fluid}$) von der Gletschermächtigkeit	22
Abb. 4.7	Abhängigkeit des Minimums ($\sigma_3 - p_{fluid}$) von der Gletschergeschwindigkeit	23
Abb. 4.8	Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Minimalspannungskriteriums von der Gletschermächtigkeit	24
Abb. 4.9	Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Minimalspannungskriteriums von der Gletschergeschwindigkeit	25
Abb. 4.10	Spannungspfad ($\sigma_N, \sigma_{kt}, \tau_{kt}$) an Messpunkt 14 für alle Modellläufe	26
Abb. 4.11	Spannungspfad ($\sigma_N, \sigma_{kt}, \tau_{kt}$) an Messpunkt 19 für alle Modellläufe	27

Abb. 4.12	Beispielhafter Spannungspfad (Messpunkt 19) für die Oktaederspannungen	28
Abb. 4.13	Abhängigkeit des Maximums der Oktaederschubspannung ($(\tau_{dil, okt})_{max}$) von der Gletschergeschwindigkeit.....	29
Abb. 4.14	Abhängigkeit des frühestens Zeitpunkts der Verletzung des Dilatanzkriteriums von der Gletschergeschwindigkeit	30

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Parameter für die Berechnungen (z. B. aus /BER 12/, /HUN 99/, /KOC 12/)	11
Tab. 3.2	Übersicht über die durchgeführten Parametervariationen	12

A Anhang zu Kapitel 4

A.1 Minimalspannungskriterium

Im Folgenden ist der Verlauf der minimalen Hauptspannung abzüglich des teufenabhängigen Fluiddrucks für alle Modellläufe und für alle Messpunkte im Salzstock dargestellt.

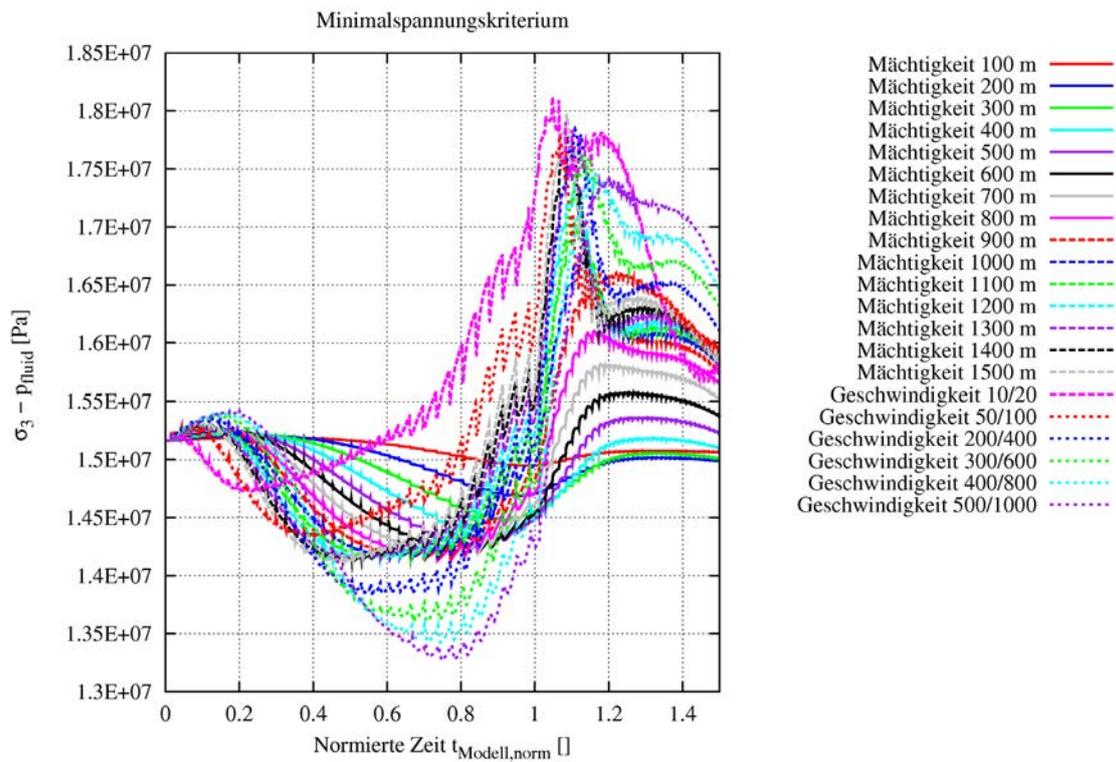


Abb. A.1 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 6

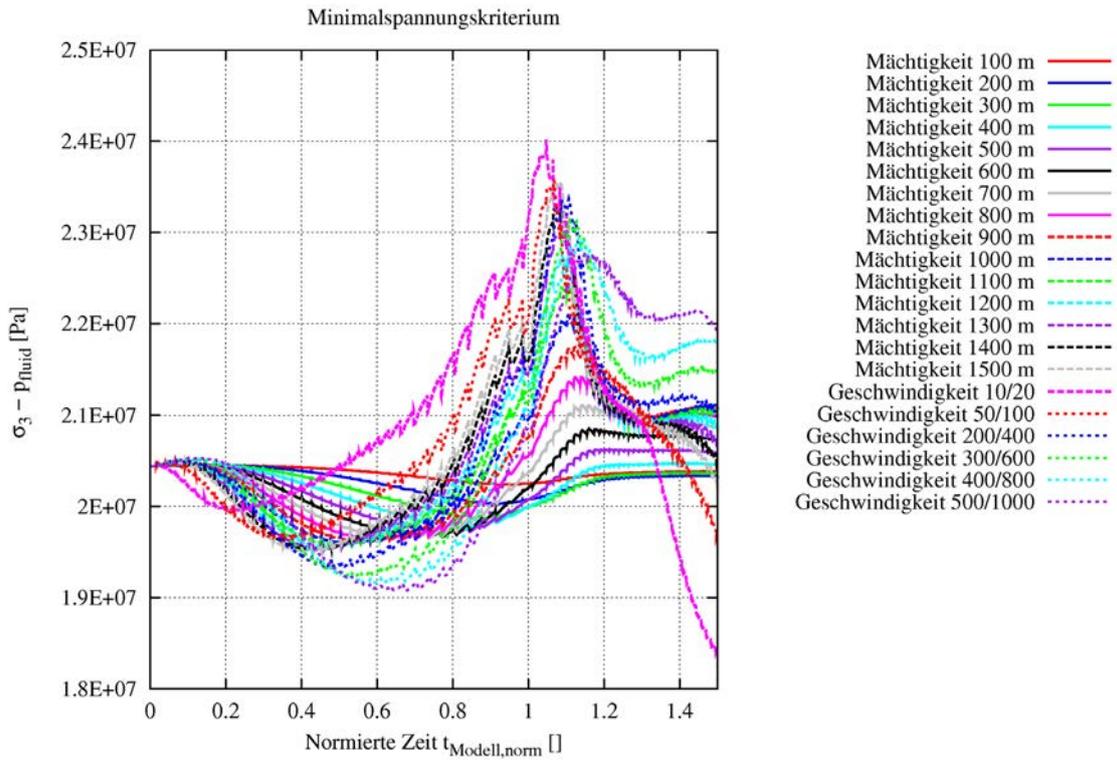


Abb. A.2 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 7

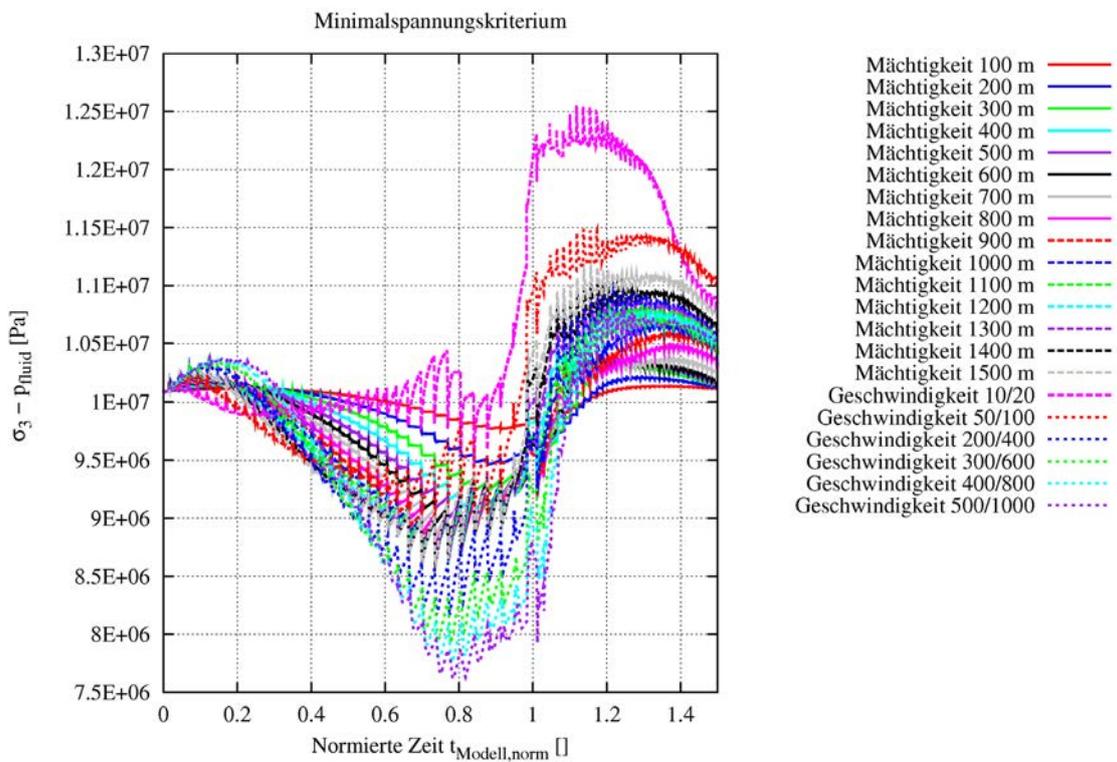


Abb. A.3 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 10

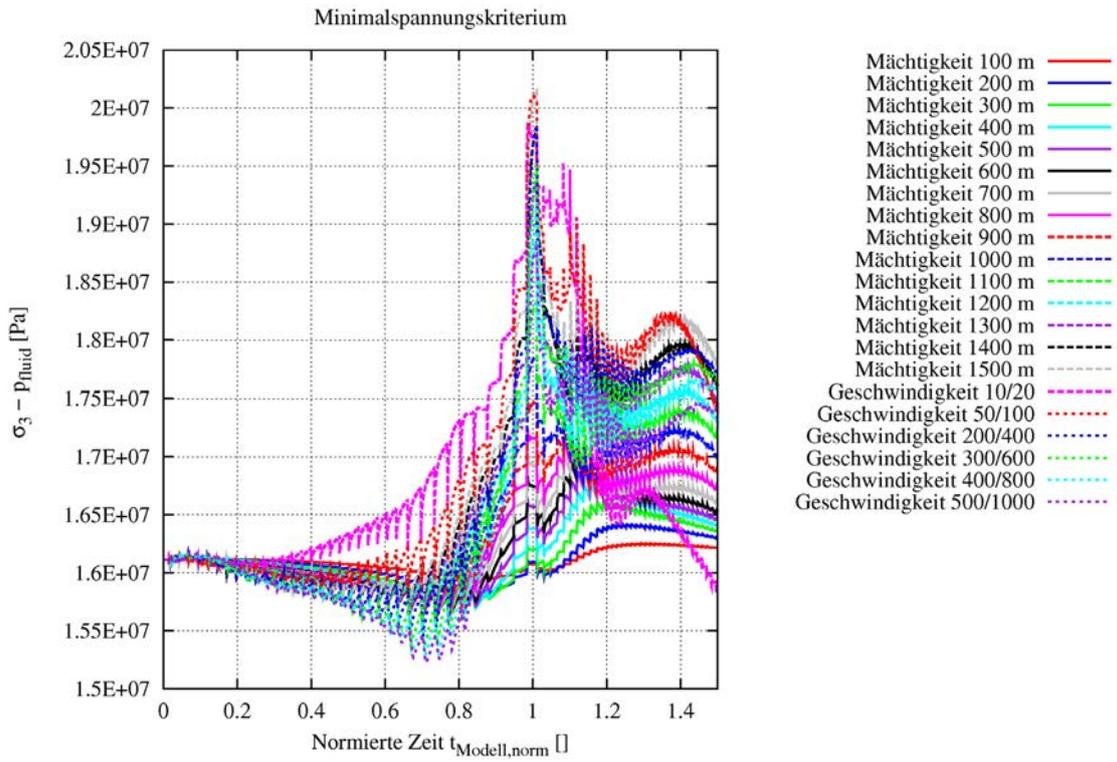


Abb. A.4 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 11

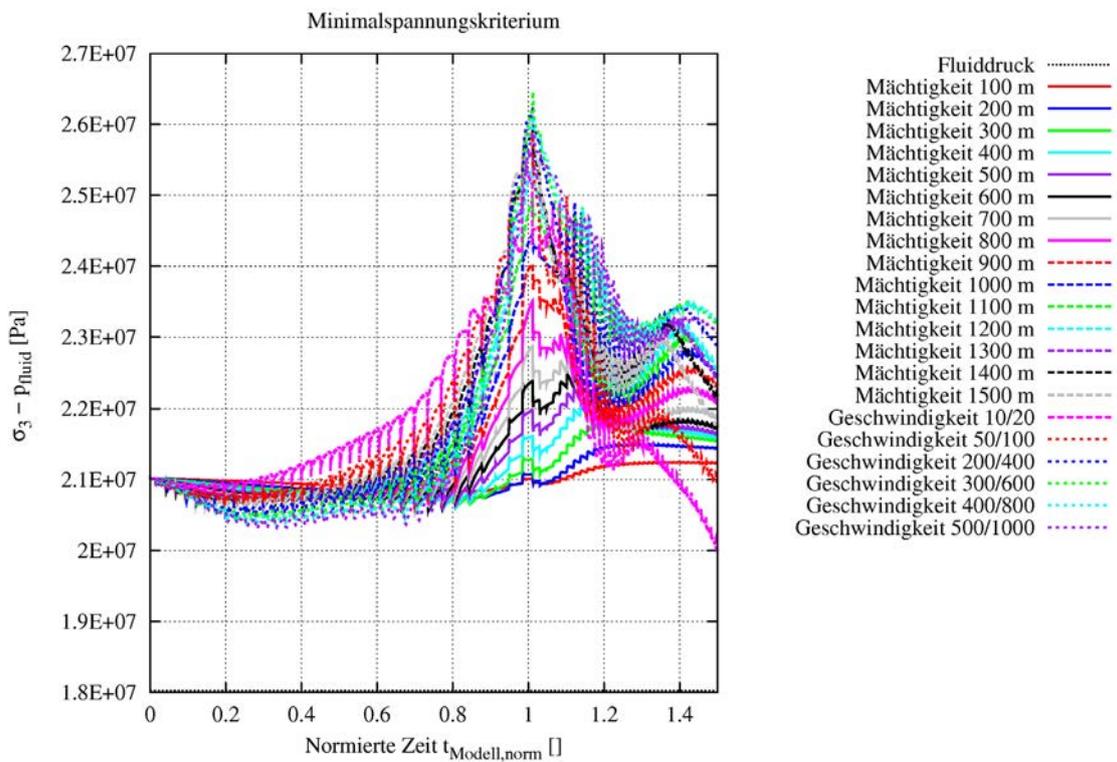


Abb. A.5 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 12

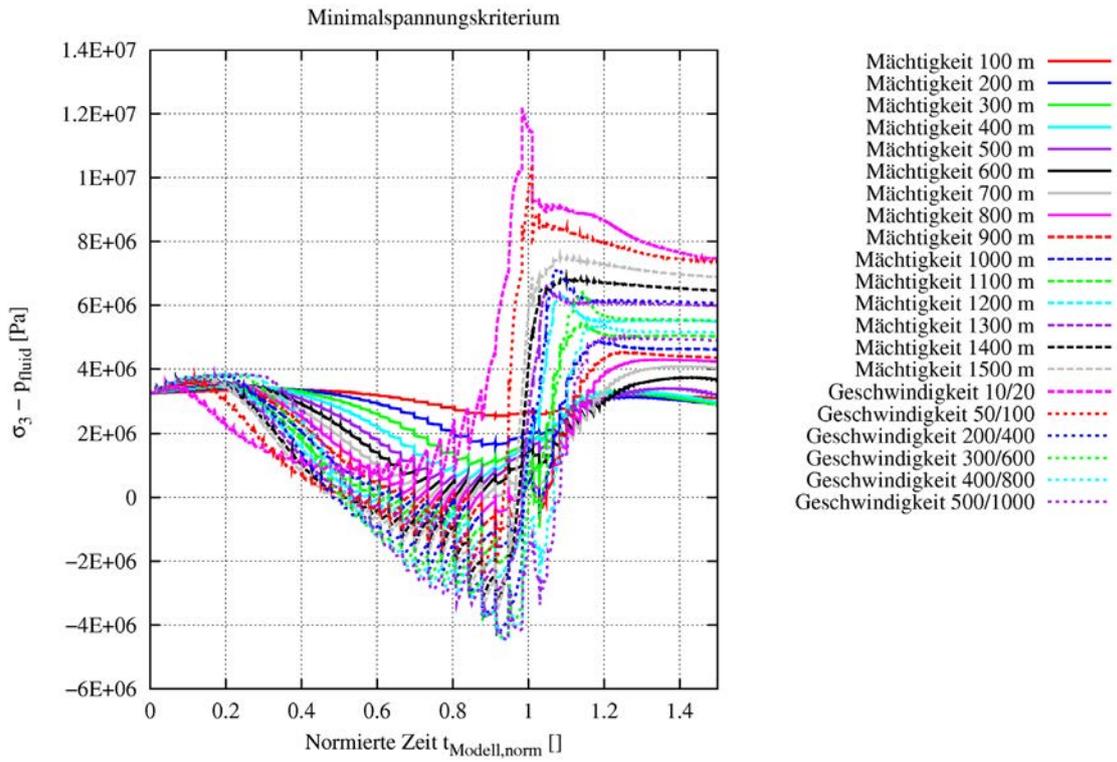


Abb. A.6 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 14

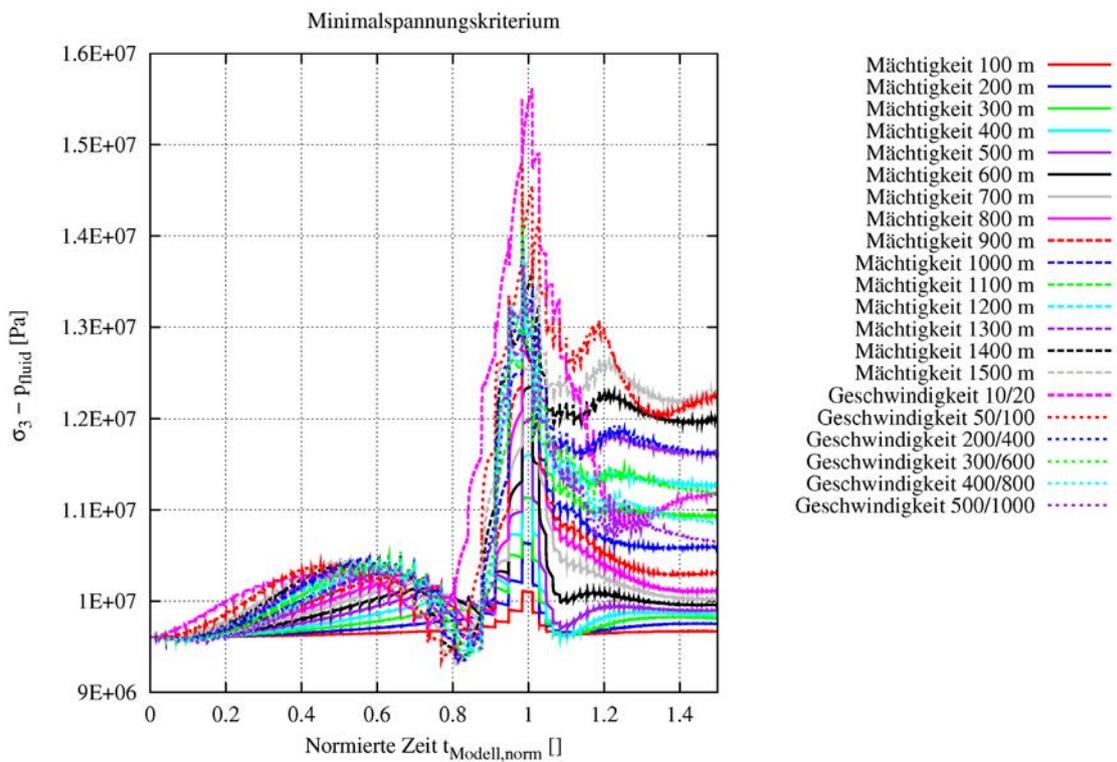


Abb. A.7 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 15

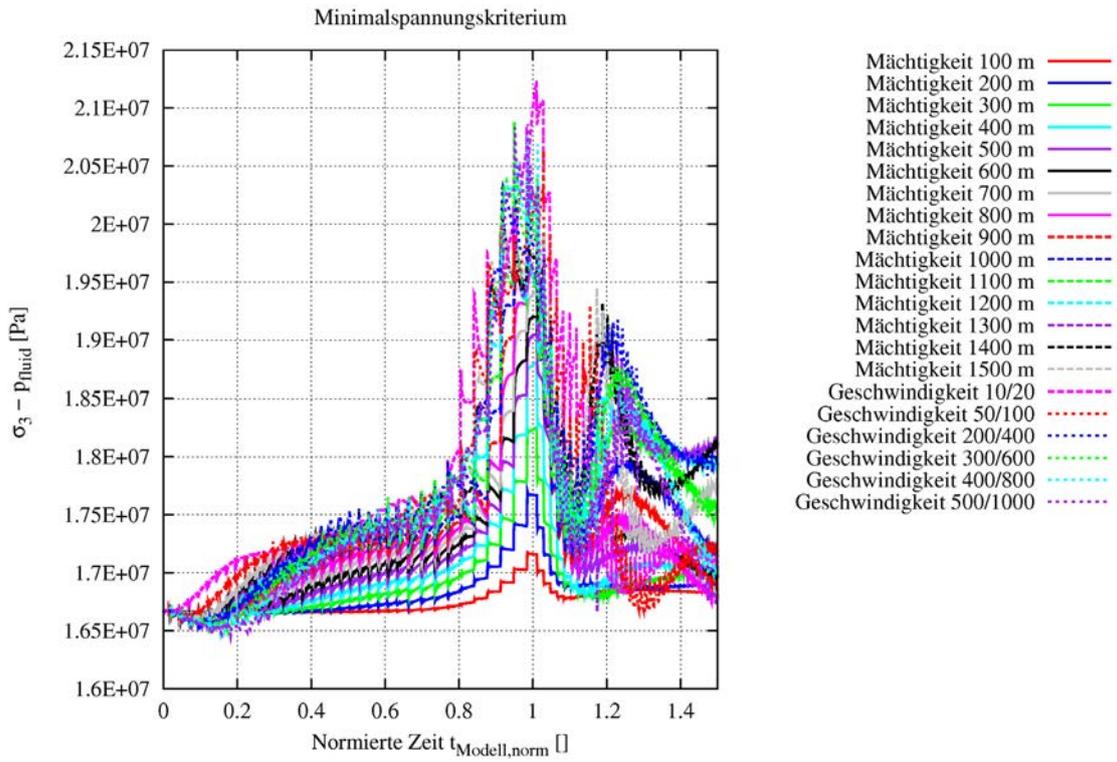


Abb. A.8 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 16

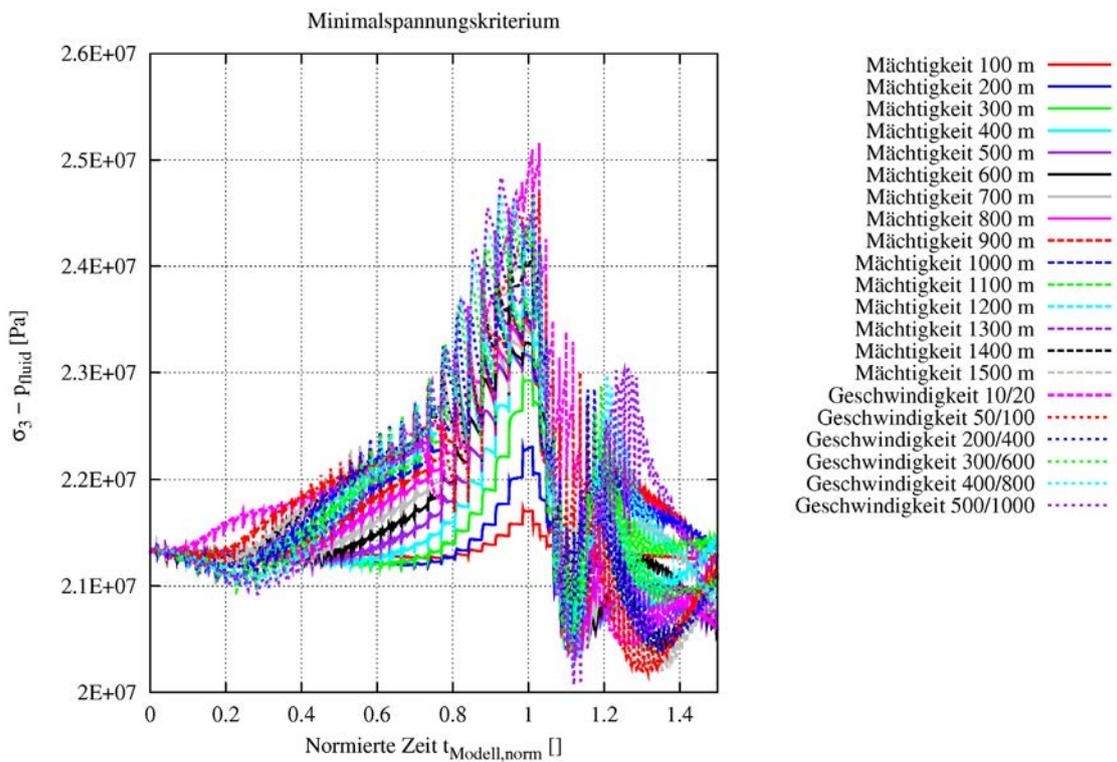


Abb. A.9 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 17

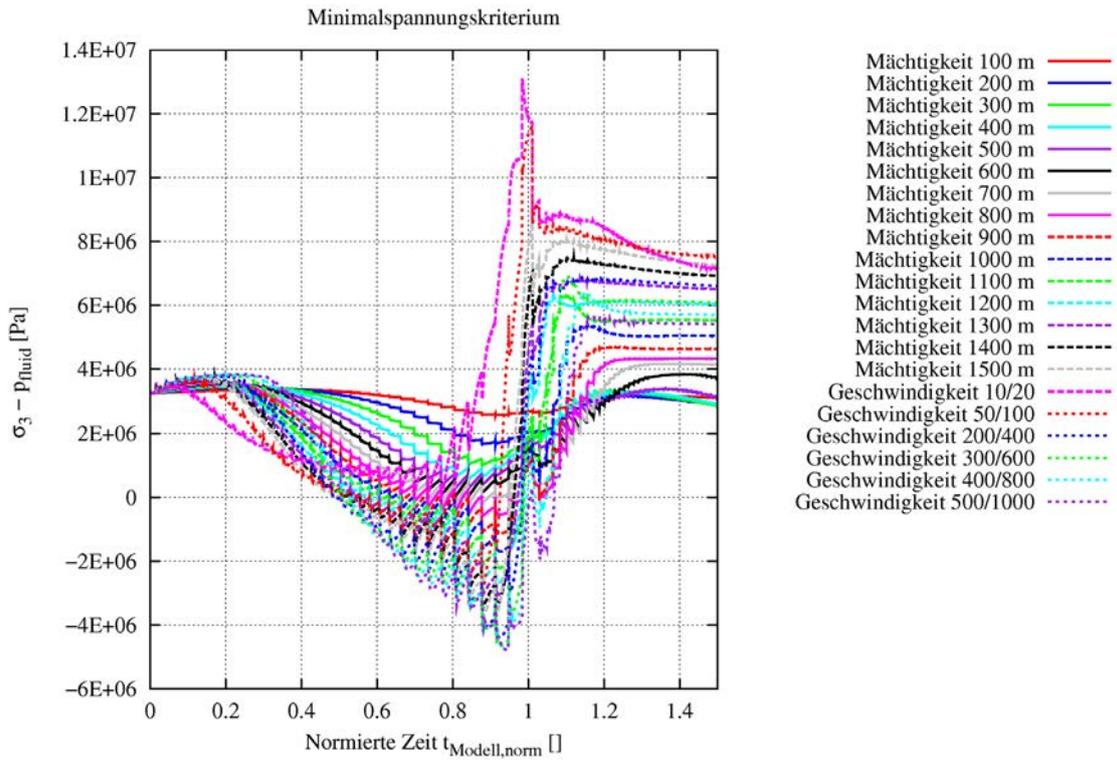


Abb. A.10 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 19

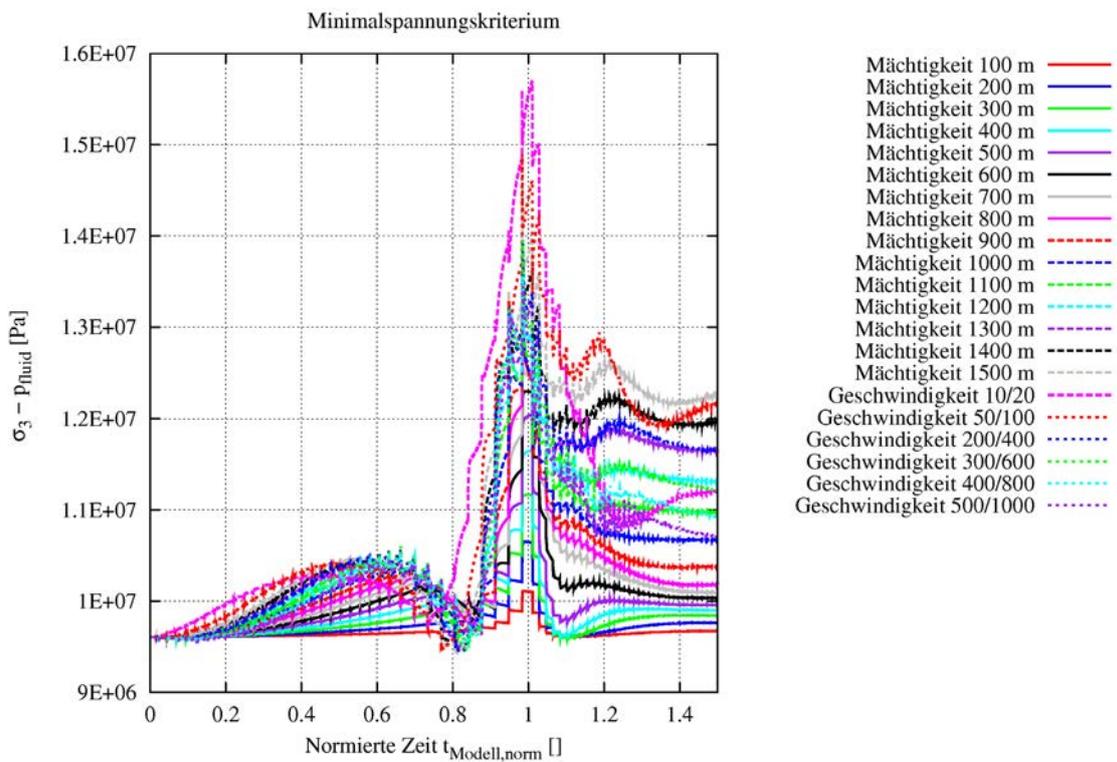


Abb. A.11 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 20

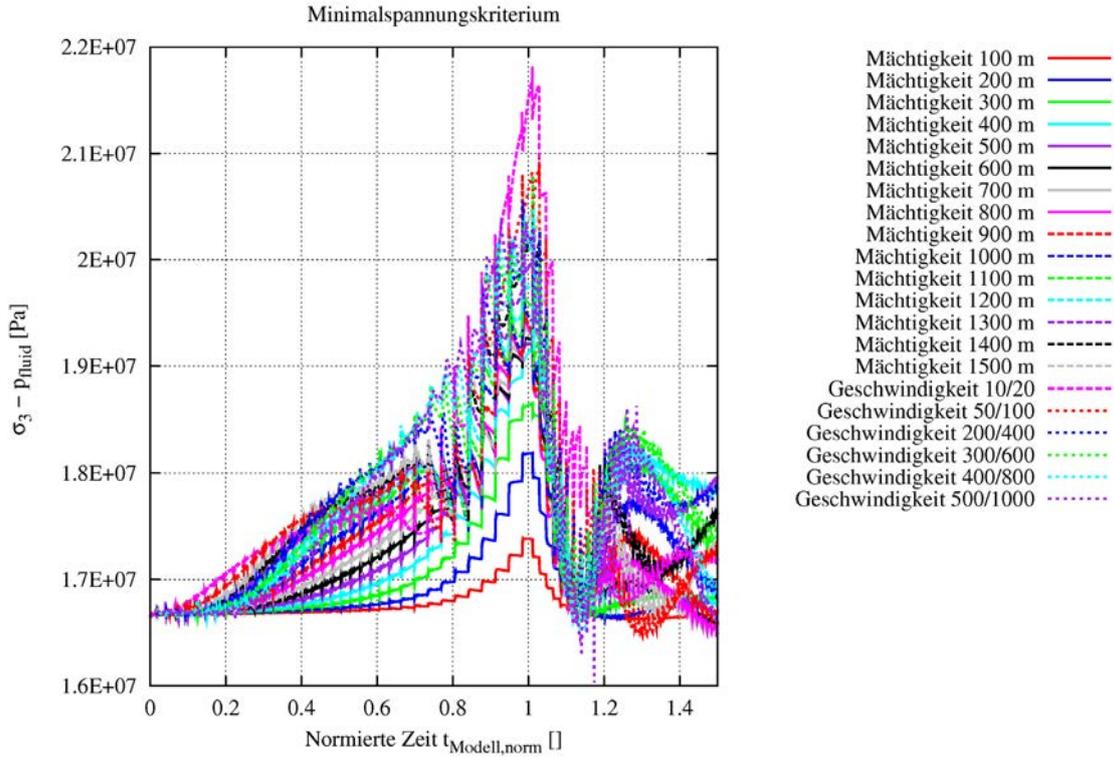


Abb. A.12 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 21

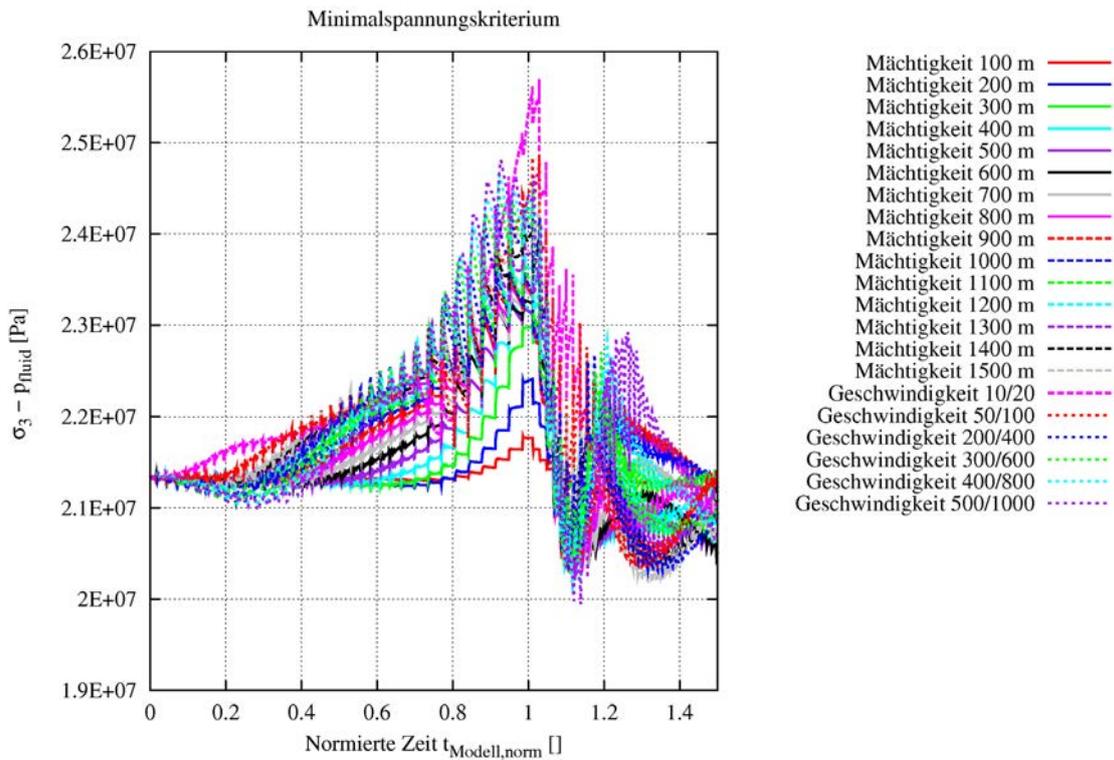


Abb. A.13 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 22

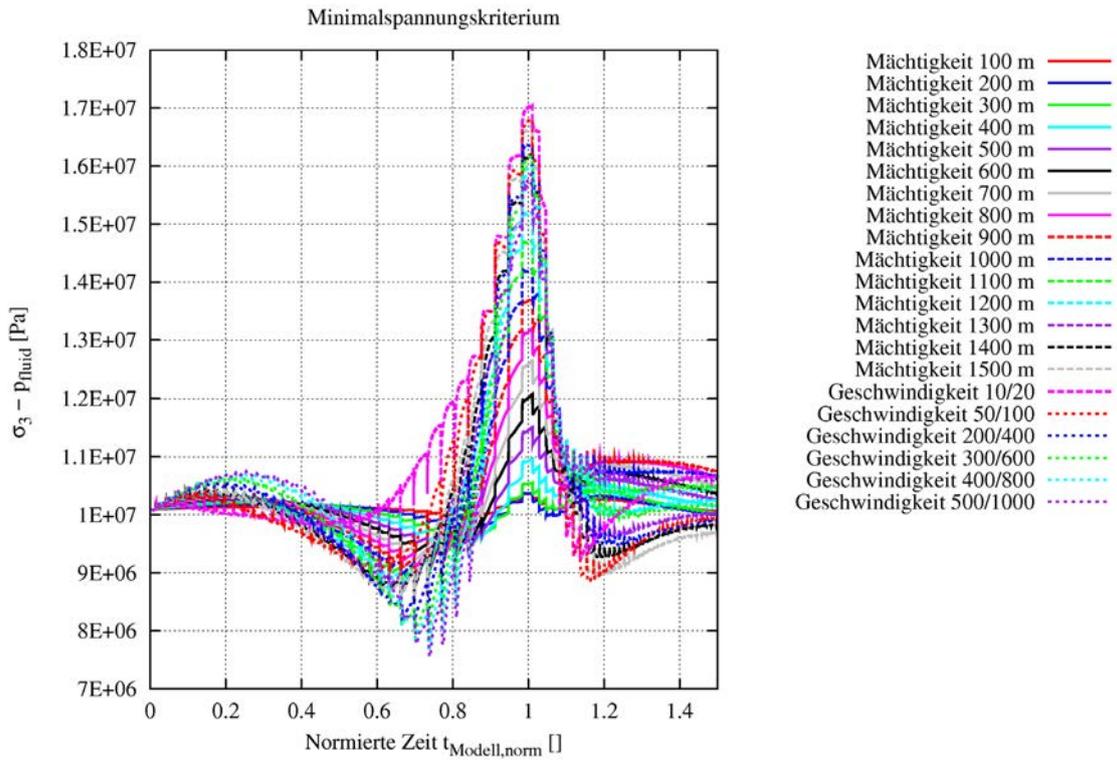


Abb. A.14 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 25

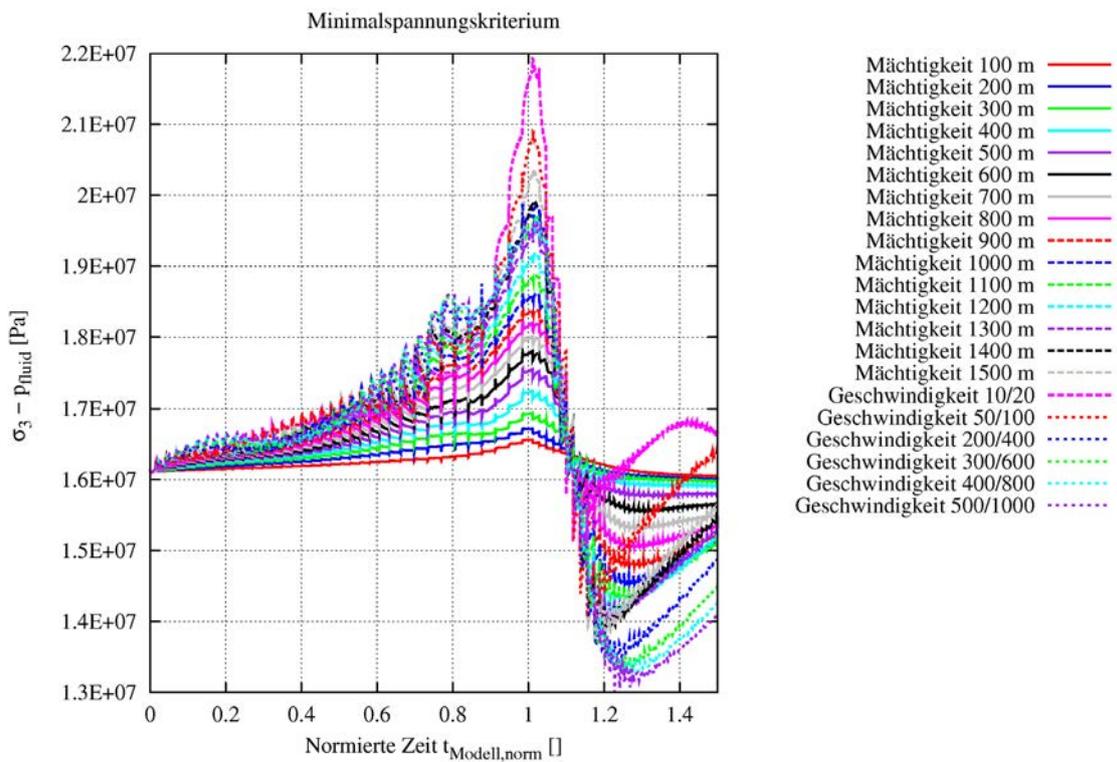


Abb. A.15 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 26

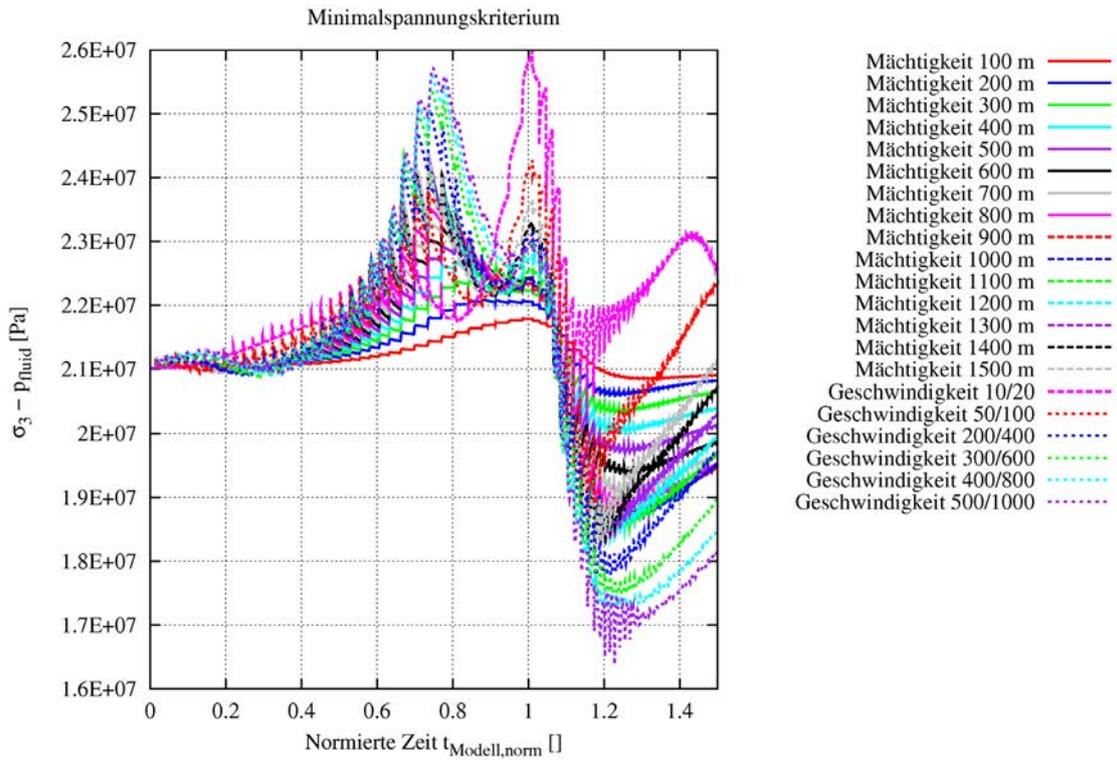


Abb. A.16 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 27

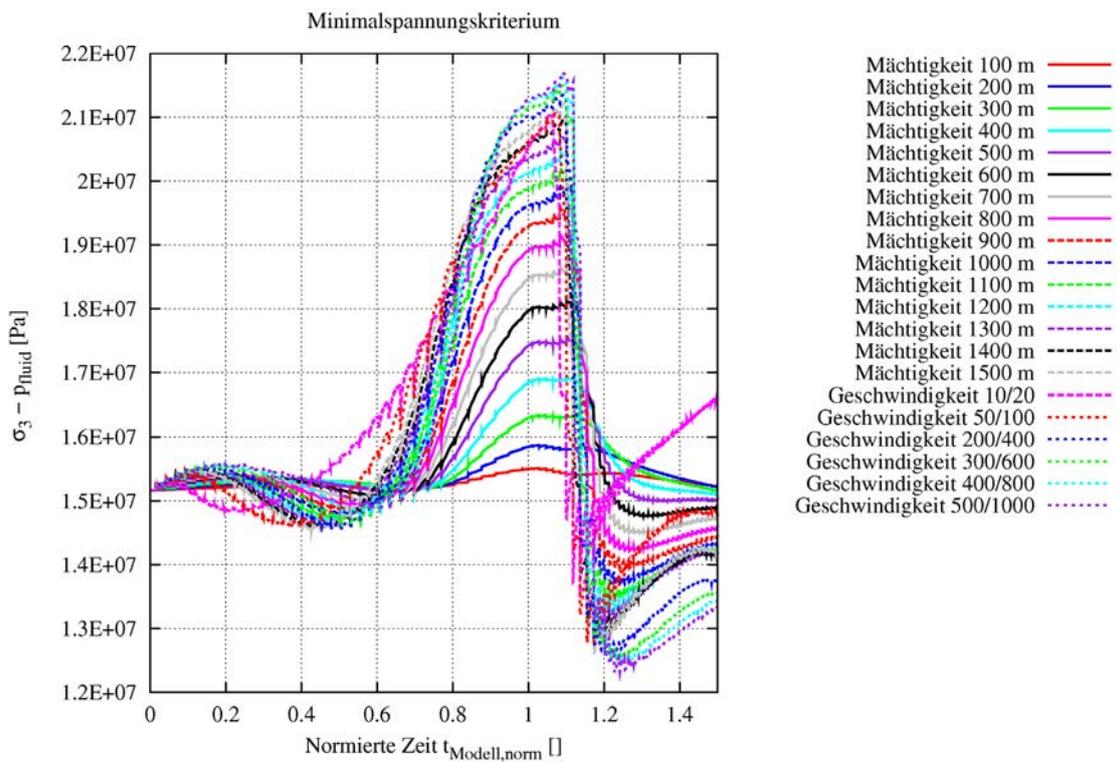


Abb. A.17 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 31

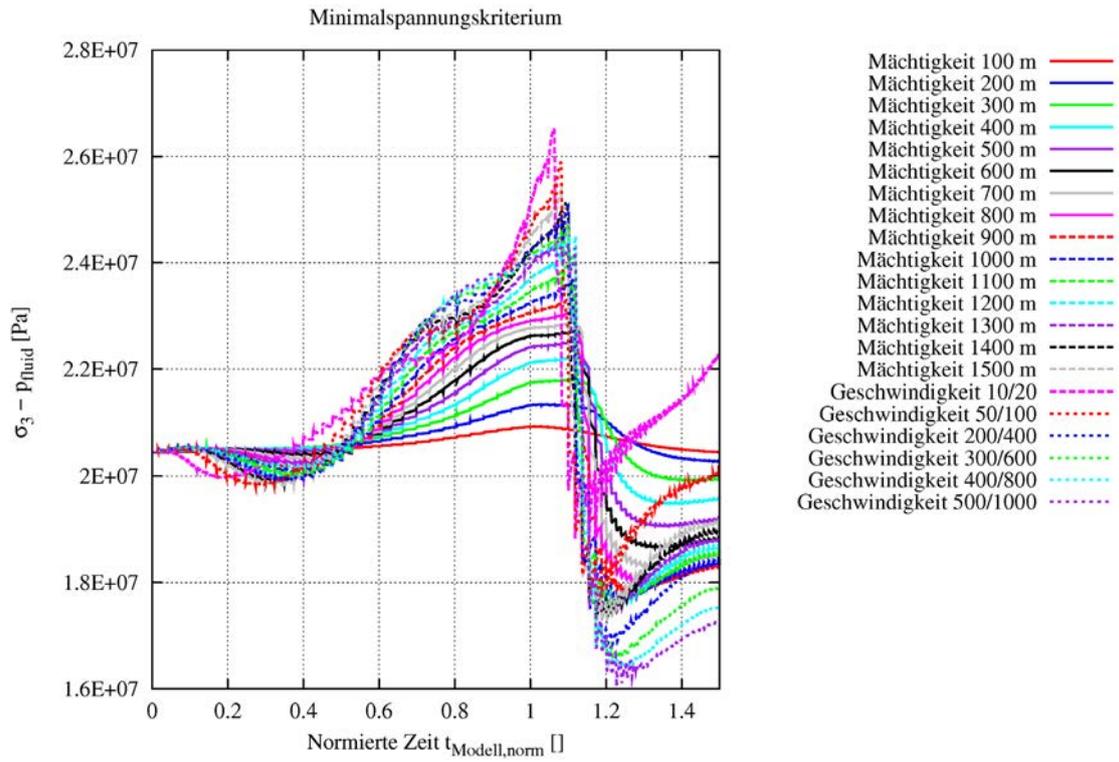


Abb. A.18 Verlauf der minimalen Hauptspannung σ_3 an Messpunkt 32

A.2 Dilatanzkriterium

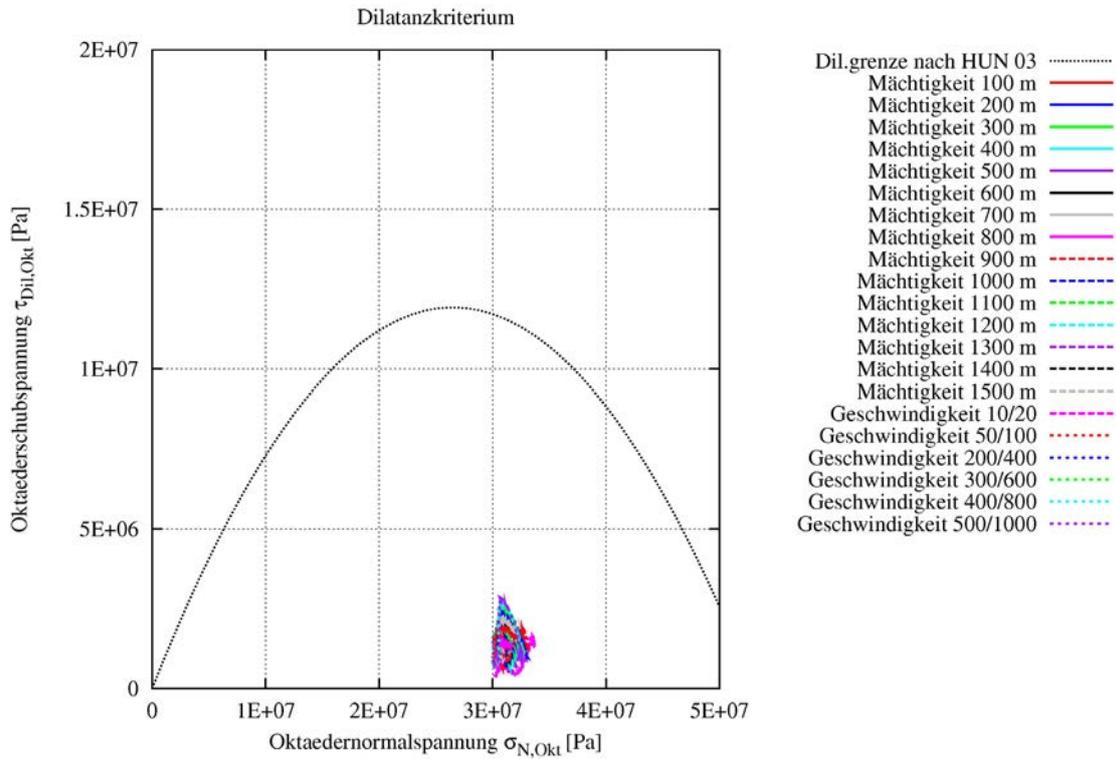


Abb. A.19 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 6

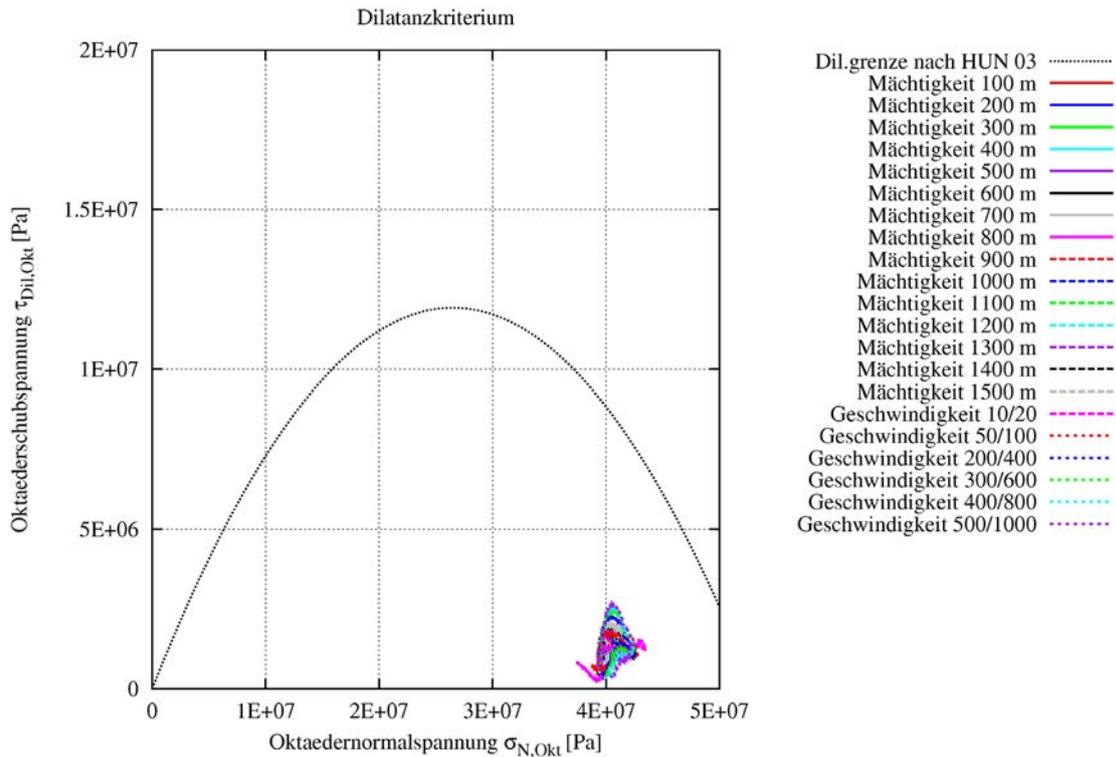


Abb. A.20 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 7

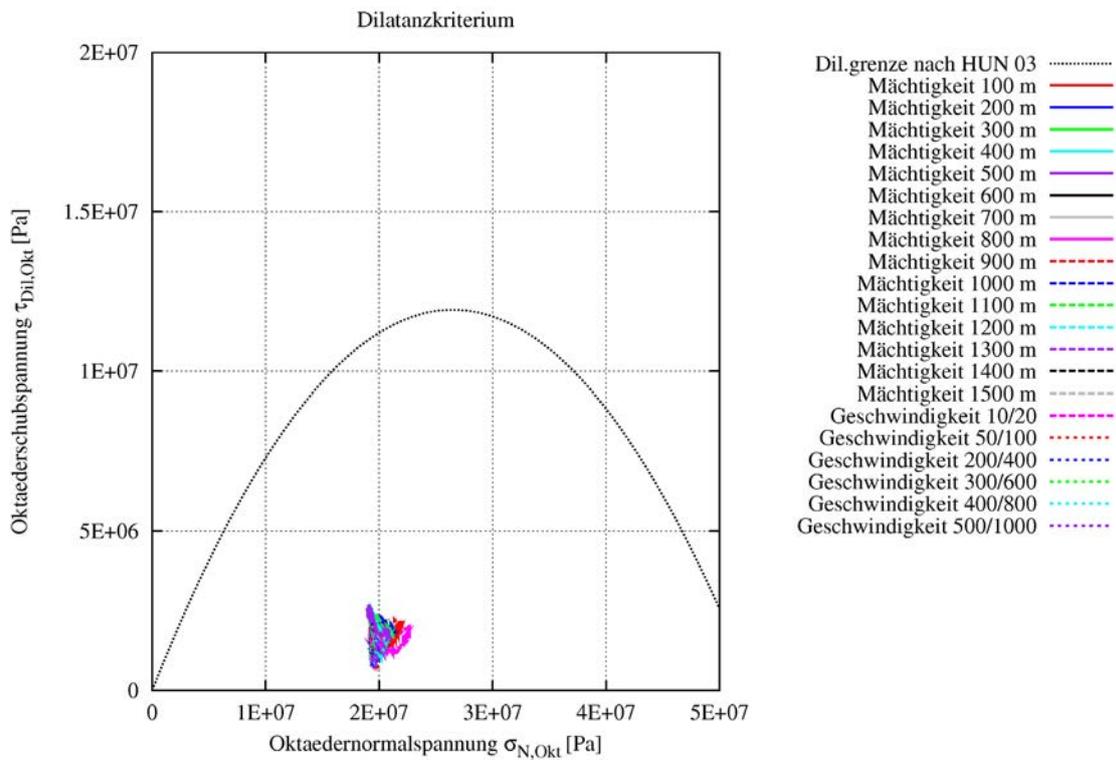


Abb. A.21 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 10

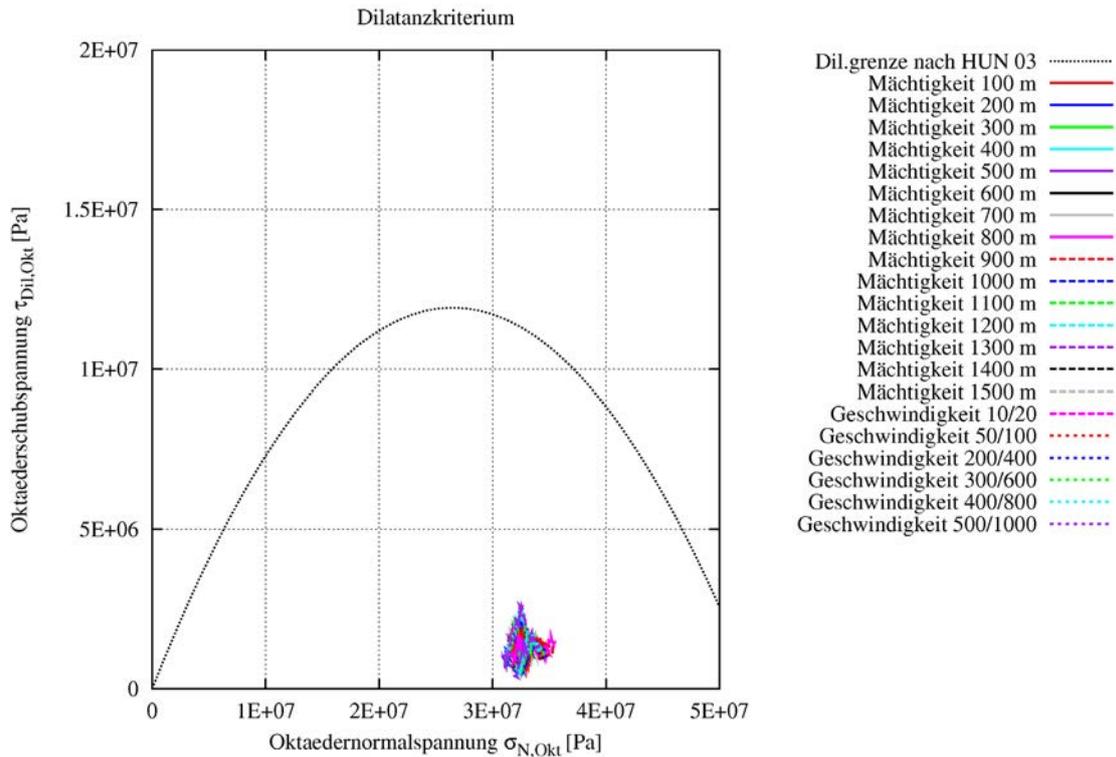


Abb. A.22 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 11

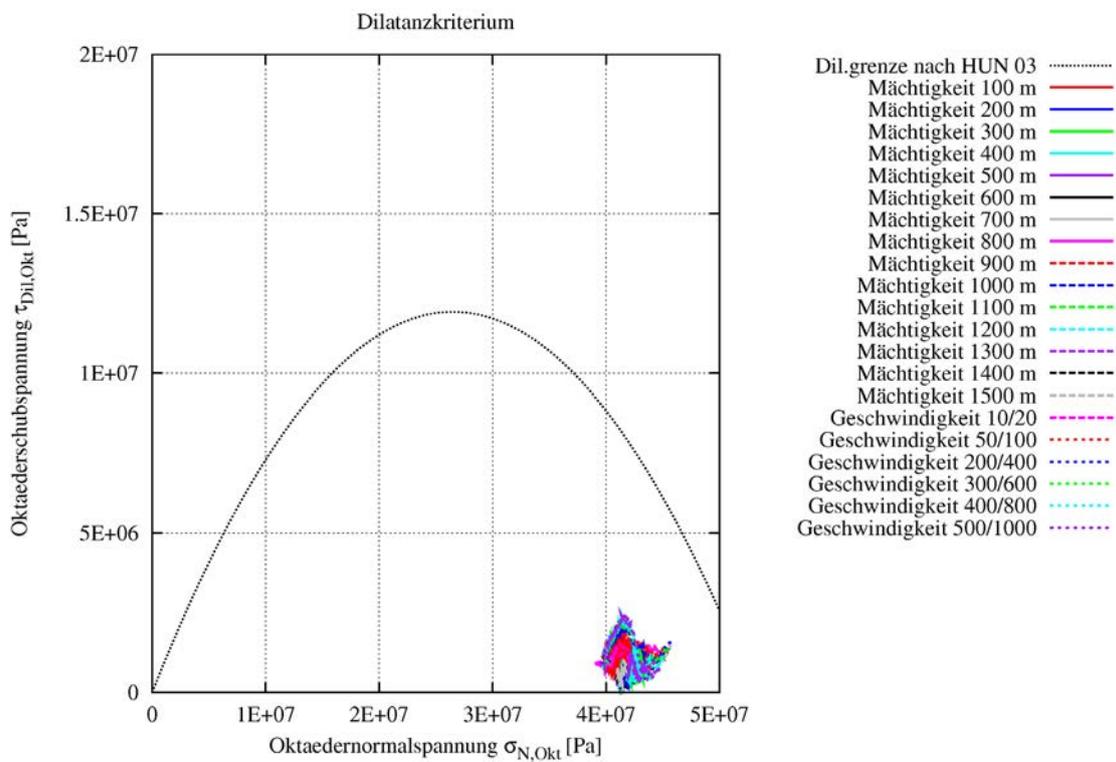


Abb. A.23 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 12

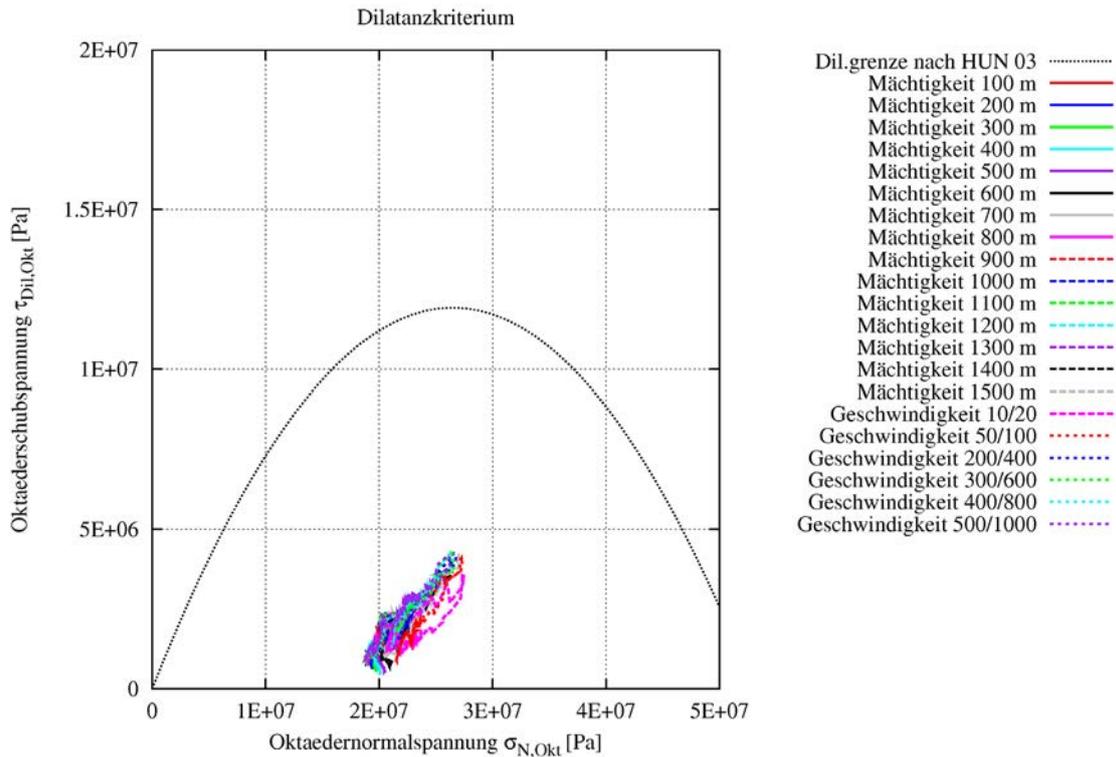


Abb. A.24 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 15

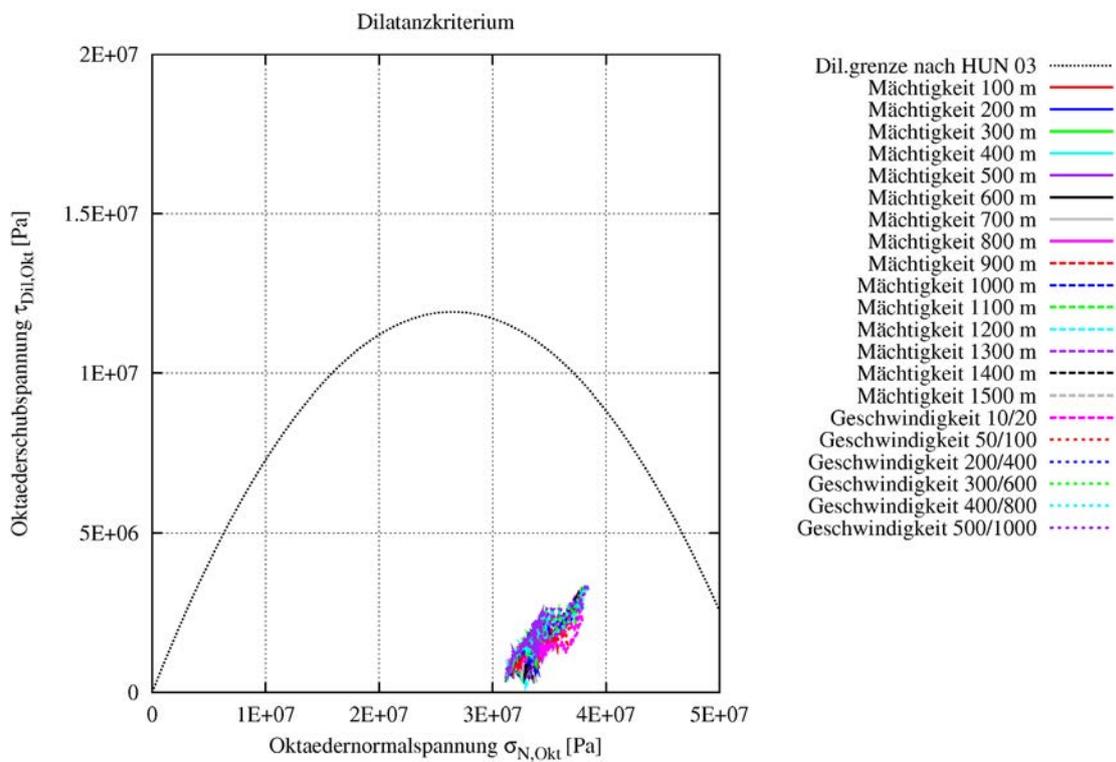


Abb. A.25 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 16

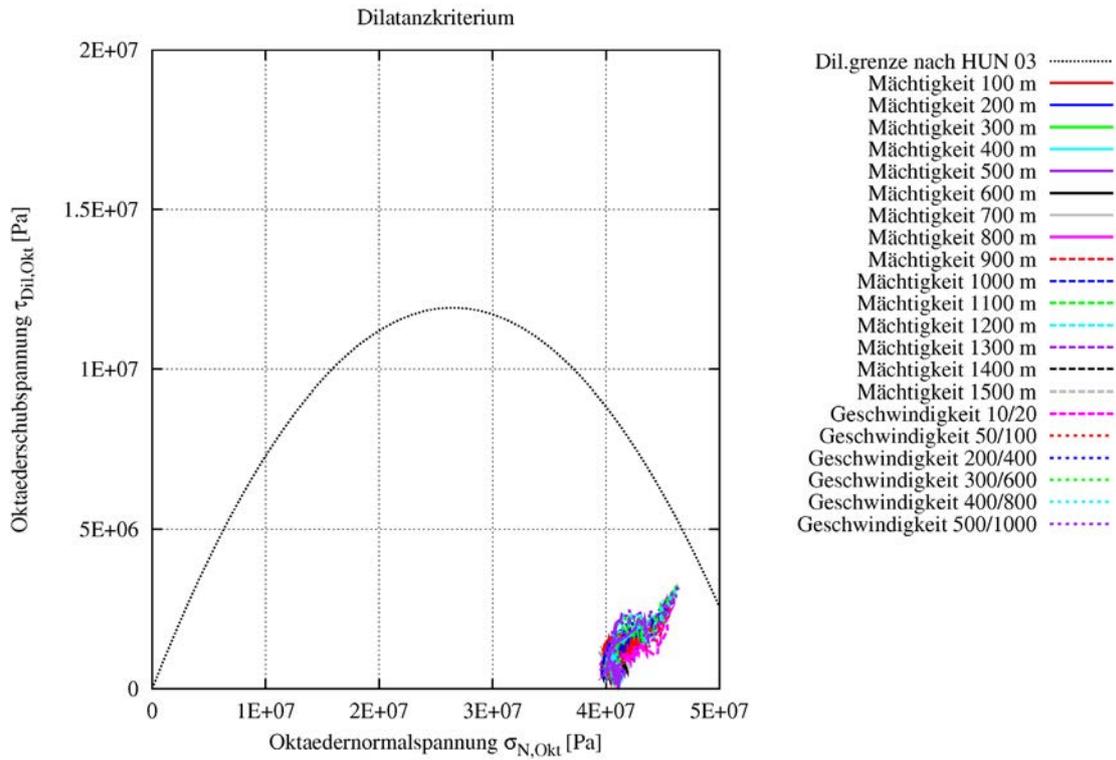


Abb. A.26 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 17

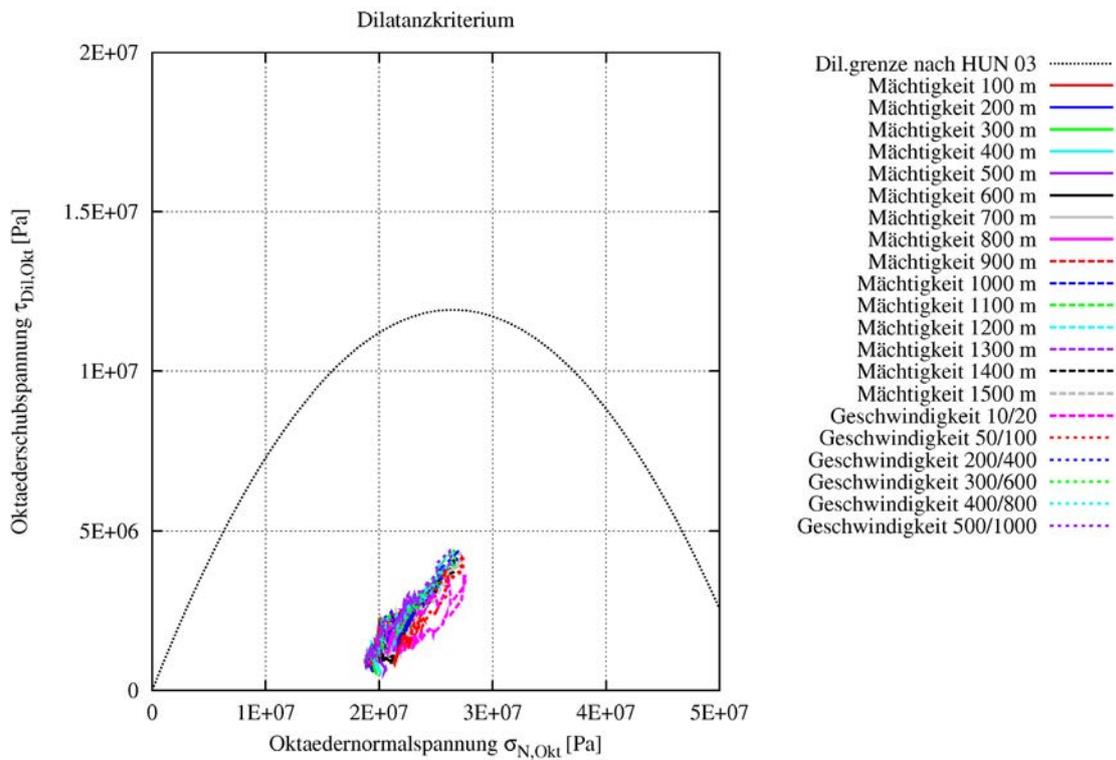


Abb. A.27 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 20

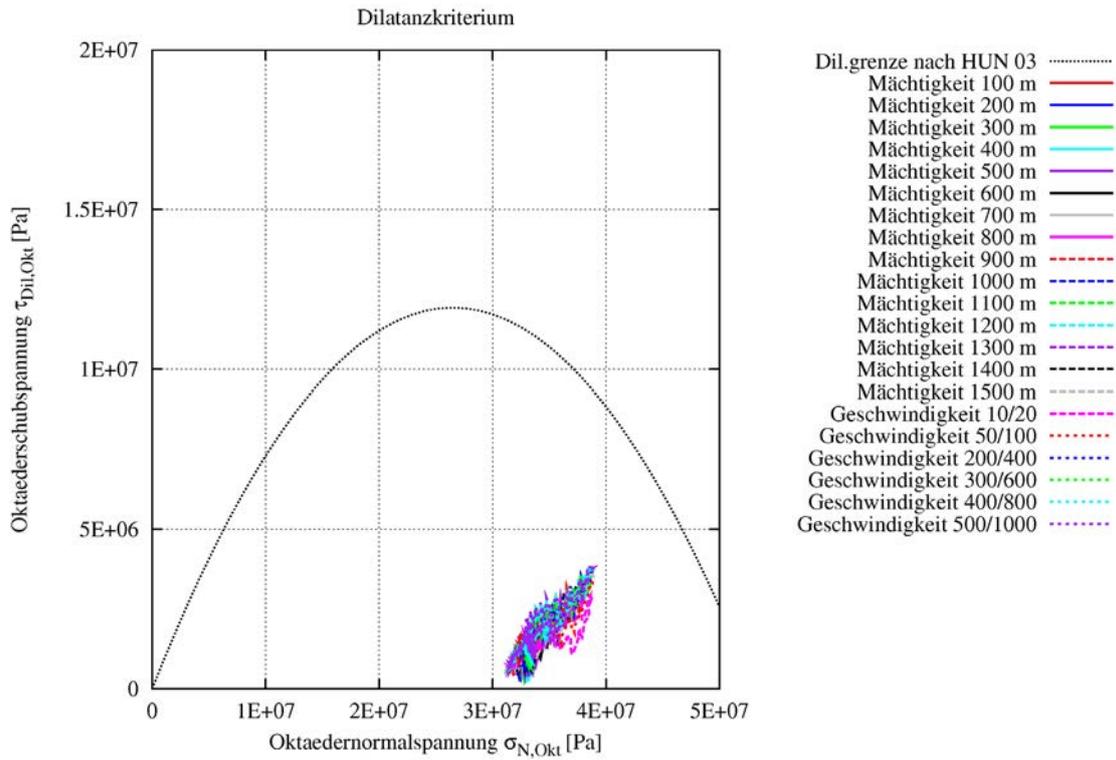


Abb. A.28 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 21

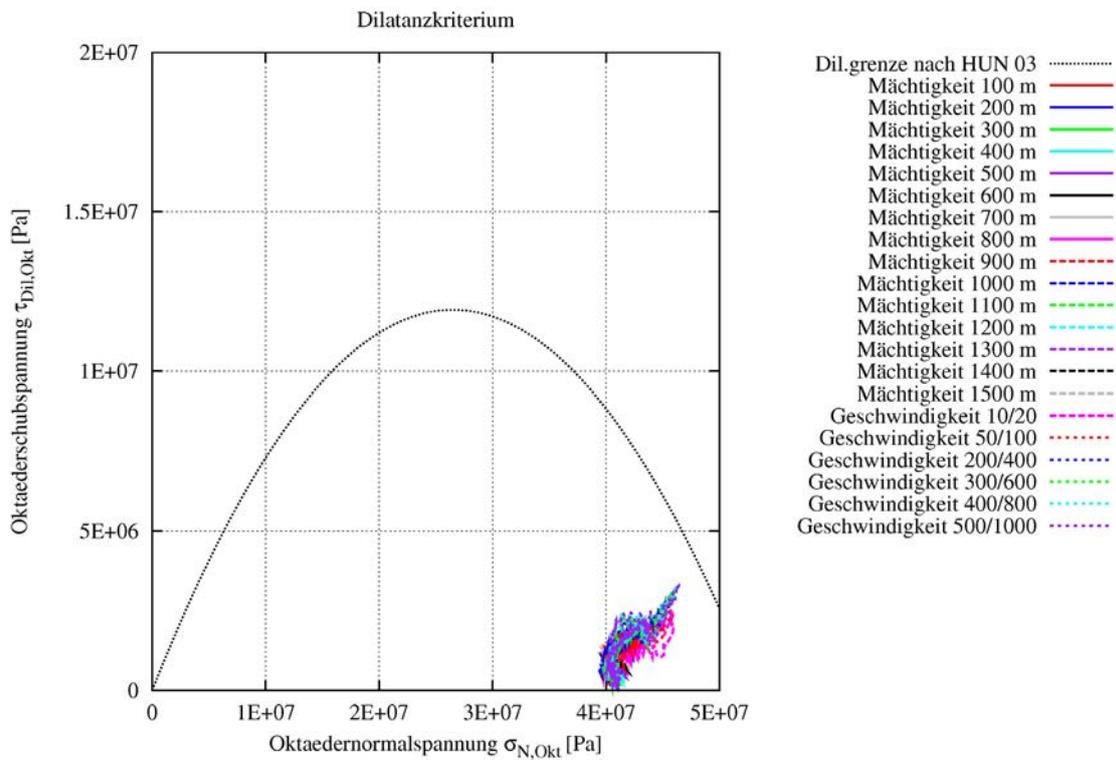


Abb. A.29 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 22

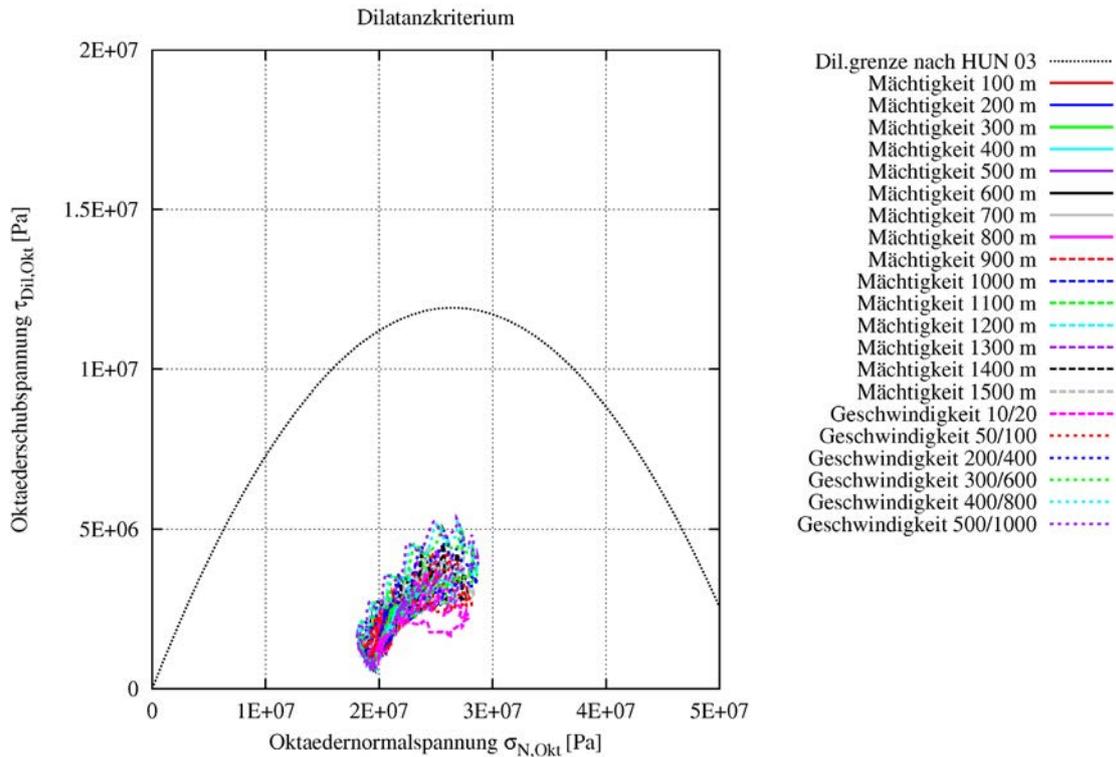


Abb. A.30 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 25

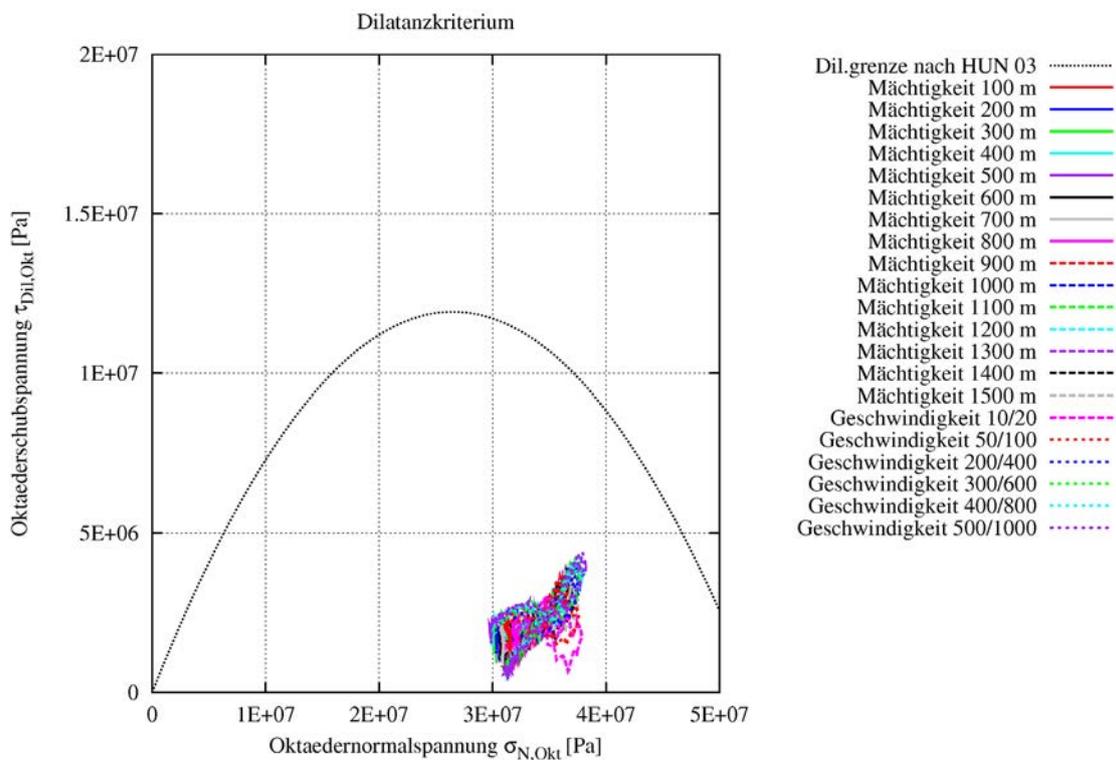


Abb. A.31 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 26

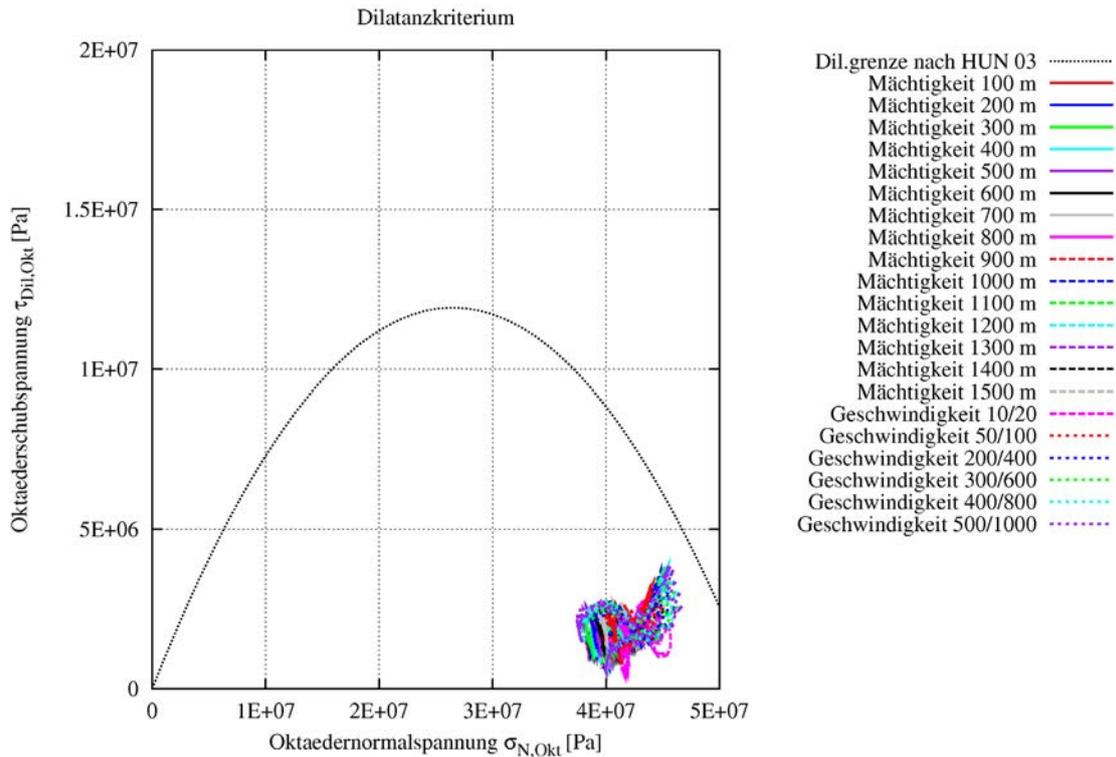


Abb. A.32 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 27

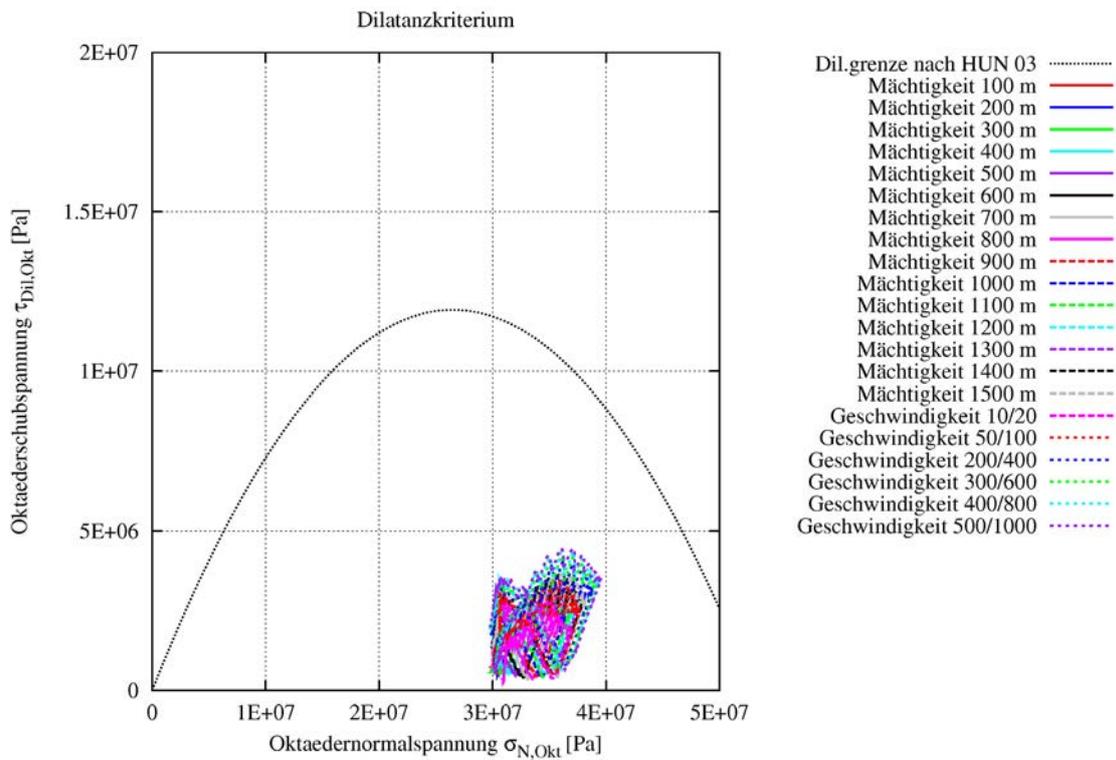


Abb. A.33 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 31

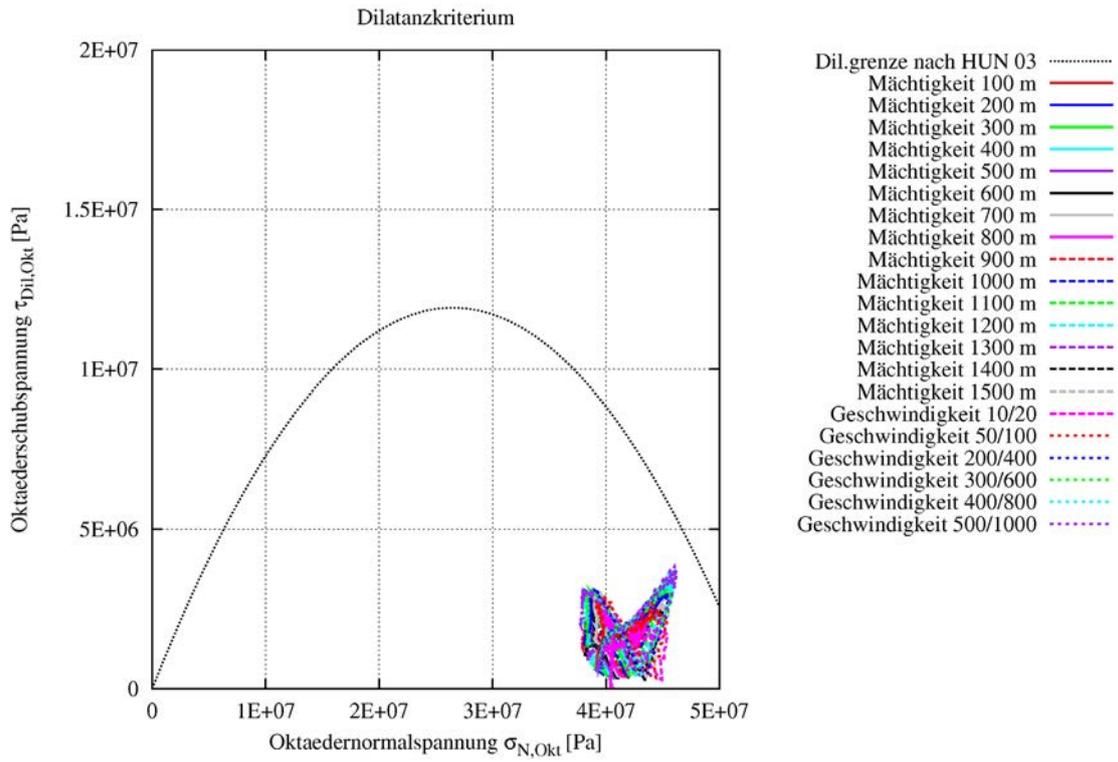


Abb. A.34 Spannungspfad $\tau_{okt}, \sigma_{N,okt}$ an Messpunkt 32

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de