

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN**

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau  
Professur für Straßenbau

**Mechanisches Verformungsverhalten von Tragschichten  
ohne Bindemittel unter besonderer Berücksichtigung des  
Temperatureinflusses**

Experimentelle Analyse am Beispiel einer Kiestragschicht

Mechanical deformation behavior of a base course material with  
particular effect of temperature

Experimental analysis using the example of a gravel base course

Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung  
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Jörg Patzak

geb. am 5. Juni 1975 in Werdau

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner  
Technische Universität Dresden
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel  
Universität Stuttgart

Tag der Verteidigung: 24. August 2015

Für Lena und Ellen die mir unendlich viel Kraft und Zuversicht geben.



Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau an der Technischen Universität Dresden. Schon bei der Bearbeitung des ersten Forschungsthemas am Institut reiften Fragen und Ideen, die im weiteren Verlauf zum Dissertationsthema führten.

Meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner danke ich ganz herzlich für die Inspiration zur Bearbeitung dieses Themas und die Betreuung. Des Weiteren möchte ich mich bei Ihm für die unzähligen Hinweise, Anregungen und Diskussionen, nicht nur im Hinblick auf die Promotion, sondern vielmehr im Rahmen der täglichen Arbeit am Lehrstuhl bedanken, bei denen ich stets viel lernen konnte und noch lerne.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel von der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens, das Interesse an dem bearbeiteten Thema und die Konsultation in Stuttgart.

Weiterhin danke ich Frau Dr.-Ing. habil. Sabine Leischner für die Anmerkungen zum Manuskript sowie Herrn Dipl.-Ing. Richard Milow und Herrn Philip Richter für die umfangreiche und stets sehr zuverlässige Hilfe bei der Herstellung der Probekörper.

Bedanken möchte ich mich sehr herzlich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern die mich in jeglicher Hinsicht unterstützen und bei meiner Schwiegermutter Anke Müller für die konsequente Korrektur des Manuskriptes.



## **Kurzfassung**

Im Straßenbau sind Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) die konstruktive Grundlage des frostsicheren Oberbaus unabhängig von der Bauweise oder der Belastungsklasse. Das mechanische Verformungsverhalten von ToB ist sowohl durch elastische als auch durch plastische Verzerrungen geprägt, wobei die Größe der jeweiligen Dehnungen/Stauchungen u. a. von der Art und Größe der Beanspruchung abhängt. Erschwerend kommt der Einfluss unterschiedlichster, derartige Gemische beeinflussender Randbedingungen hinzu. Verwiesen sei z. B. auf die Materialdichte, den Wassergehalt, Korngrößenverteilungen oder die Kornform.

Die thermische Beanspruchung ungebundener Gesteinskorngemische (ofentrockener Zustand) innerhalb des Gebrauchstemperaturbereiches ist für das elastische Materialverhalten als unbedeutende Einflussgröße einzustufen. Dies gilt nicht mehr wenn Wasser im Material vorhanden ist und Temperaturänderungen vom positiven in den negativen °C-Temperaturbereich (oder entgegengesetzt) vorliegen. Die klimatischen Randbedingungen in Deutschland bedingen jedoch sowohl positive als auch negative °C-Temperaturen in den ToB, welche sehr häufig wechseln können. Deshalb ist ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit die Untersuchung des elastischen Verformungsverhaltens von Gesteinskorngemischen unter triaxialen Bedingungen und zyklischer Beanspruchung sowie zusätzlicher thermischer Beeinflussung des Materials. Von besonderer Bedeutung hierbei ist die Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens während des Aggregatzustandswechsels des im Gesteinskorngemisch existenten Wassers von der fluiden in die kristalline Zustandsform im Zuge der Materialabkühlung bzw. von der kristallinen in die fluide Zustandsform im Zuge der Materialerwärmung.

Für die Analyse des spannungsabhängigen Materialverhaltens bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden und Wassergehalten sowohl mit als auch ohne zusätzliche thermische Beeinflussung des Materials, stellt die Erarbeitung einer geeigneten Prüfprozedur einen weiteren essentiell erforderlichen Bearbeitungsschwerpunkt im Rahmen des Untersuchungsprogramms dar.

Neben der bekannten Temperaturunabhängigkeit von ToB im positiven °C-Temperaturbereich (Gebrauchstemperaturbereich) kann im Ergebnis der vorliegenden Arbeit festgestellt werden, dass Gleiches gilt wenn das im Gesteinskorngemisch existente Wasser quasi-vollständig kristallisiert ist und dieser Zustand unverändert erhalten bleibt (bzw. eine weitere Abkühlung vorliegt), d. h. die Massenanteile von Wasser in fluider und kristalliner Form als

konstant angesehen werden können. Temperaturzustände, welche zwischen den beiden zuvor genannten Sachverhalten eingeordnet werden können (unabhängig davon, ob ein Abkühlungs- oder Erwärmungsprozess vorliegt), beeinflussen das mechanische Verformungsverhalten des Materials infolge des Aggregatzustandswechsels von Wasser im Gesteinskornmisch erheblich.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen kann u. a. herausgearbeitet werden das nicht nur ohne sondern auch bei thermischer Beeinflussung der Wassergehalt dominanten Charakter aufweist. Ein steigender Wassergehalt führt bei thermisch unbeeinflusstem Material zum bekannten Anstieg der elastischen Materialantwort. Bei thermischer Beeinflussung tritt ein gegenteiliges Phänomen auf. Die elastische Dehnung nimmt bei gleichen Beanspruchungsrandbedingungen und steigendem Wassergehalt (dränierter Bedingungen) erheblich ab und kann mit dem ansteigenden kristallinen Wasseranteil im Gesteinskornmisch begründet werden.

Die Spannungsabhängigkeit des Gesteinskornmisches, welche für den thermisch unbeeinflussten Zustand bekannt ist, kann hierbei resultierend aus dem vergleichsweise geringen Kristallisationsfortschritt von Wasser zum Betrachtungszeitpunkt auch für den thermisch beeinflussten Zustand zu Beginn der Abkühlphase bzw. am Ende der Erwärmungsphase festgestellt werden. Sowohl bei quasi-vollständigem Durchfrieren als auch bei fortschreitender Materialabkühlung und damit steigender kristalliner Wasseranteile im Gesteinskornmisch kann im Rahmen der festgelegten Prüfbedingungen, der festgelegten Prüfprozedur und der definierten Beanspruchungszustände linear elastisches Materialverhalten unterstellt werden.

## **Abstract**

Sub-base courses are the basis of constructive frost resistant pavement, regardless of the design or load class. The mechanical deformation behaviour of unbound granular materials (UGM) used in sub-base is characterized by both elastic and plastic distortions. Respective strains depends among others on the type and size of load. UGM are affected by different marginal conditions. It must be referred to the material density, water content, grain size distributions or the grain shape only some of these values at this point.

The thermal stress of UGM (oven-dry state) within the service temperature range is classified for the elastic material behaviour as insignificant effect size. This no longer valid when water is present in the material and temperature changes from positive to negative ° C Temperature range (or opposite) occur. The climatic conditions in Germany cause both positive and negative ° C temperatures in UGM, which can change frequently. Therefore, a focus of the present thesis is to study the elastic deformation behaviour of UGM under triaxial conditions and cyclic loading as well as additional thermal influence of the material. Of particular importance is the study of the mechanical deformation behaviour during the physical state change of existing water in UGM from the fluid to the crystalline state form during the cooling of the material or from the crystalline to the fluid state form during the heating of the material.

For the analysis of the stress-dependent material behaviour at different compaction degrees and water content both with and without additional thermal influence of the material, the development of a suitable test procedure is another essential key aspect in the context of the study program.

In addition to the known temperature dependence of UGM in the positive ° C temperature range (operating temperature range) it can be found in the results of the present thesis that the same is valid if the existent water in UGM is quasi-completely crystallized and this state remains unchanged (or further cooling is present ). This means the mass fractions can be considered as constant. Temperature conditions, which can be classified between the two before mentioned circumstances (regardless of whether a cool-down or heating process is present) affect the mechanical deformation behaviour of the material due to the physical state change of water in UGM significantly. Within the investigations it can be figured out that the dominant character of the water content not only occur without but also in thermal influence. Rising water content in thermally uninfluenced material lead to known increase in the elastic material response. During thermal influence occurs an opposite phenomenon. The

elastic strain decreases at the same stress conditions and increasing water content (drained conditions) significantly and can be justified by the increasing crystalline water content in the stone grain mixture. The stress dependence of UGM, which is known for the thermally influenced condition, may result from the relatively low crystallization progress of water at the time of observation and can also be observed for the thermally affected state at the beginning of the cooling phase or at the end of the heating phase. Both quasi-complete freezing as well as progressive cooling of the material and thus increasing crystalline water contents in UGM can be assumed under the specified test conditions, the specified test procedure and the defined stress states of linear elastic material behaviour.

---

# Gliederung der Arbeit

## Abkürzungsverzeichnis

## Ausgewählten Definitionen und Festlegungen

<b>1. Problemstellung.....</b>	<b>1-1</b>
1.1 Motivation und Vorgehensweise.....	1-1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	1-4
<b>2. Materialverhalten ungebundener Gesteinskornmische bei zyklischer Belastung.....</b>	<b>2-1</b>
2.1 Grundlagen und Begriffsbestimmungen.....	2-1
2.2 Elastisches Materialverhalten – Einflussgrößen.....	2-4
2.2.1 Spannungszustand.....	2-4
2.2.2 Constant confining pressure (CCP) vs. Various confining pressure (VCP).....	2-5
2.2.3 Dehnungsamplitude.....	2-6
2.2.4 Dichte.....	2-6
2.2.5 Lastwechselzahl.....	2-7
2.2.6 Wassergehalt/Sättigung.....	2-8
2.2.7 Frequenz.....	2-10
2.2.8 Weitere Einflussgrößen.....	2-11
2.3 Elastisches Materialverhalten - Ausgewählte Modellansätze.....	2-12
2.4 Plastisches Materialverhalten - Einflussgrößen.....	2-15
2.4.1 Spannungszustand.....	2-15
2.4.2 Lastwechselzahl.....	2-16
2.4.3 Belastungsgeschichte.....	2-21
2.4.4 Dichte.....	2-21
2.4.5 Wassergehalt.....	2-22
2.4.6 Frequenz.....	2-23
2.4.7 Weitere Einflussgrößen.....	2-24
2.5 Plastisches Materialverhalten - Ausgewählte Modellansätze.....	2-25
2.6 Grundlagen des Gefrier- und Tauprozesses von Wasser sowie Wasser in Gesteinskornmischen.....	2-29
2.6.1 Wasser in Straßenkonstruktionen.....	2-29
2.6.2 Wasser in Gesteinskornmischen.....	2-31
2.6.3 Phasenübergang von Wasser.....	2-32
2.6.4 Phasenübergang von Wasser in Gesteinskornmischen.....	2-34
<b>3. Der Triaxialversuch.....</b>	<b>3-1</b>
3.1 Theoretische Grundlagen zum Spannungszustand.....	3-1
3.2 Art der Beanspruchung und Spannungspfade.....	3-5
3.3 Bruchzustand granularer Materialien (Grenzbedingung).....	3-7
3.4 Festigkeitshypothesen.....	3-10
3.4.1 Gestaltänderungsenergie-Hypothese.....	3-11
3.4.2 Festigkeitshypothese nach Mohr-Couloumb.....	3-12
3.4.3 Drucker- Prager- Bedingung.....	3-13

---

<b>4. Durchführung der Versuche.....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Triaxialversuchsstand und Messdatenerfassung..... 4-1
4.2	Untersuchungsmaterial..... 4-3
4.3	Materialvorbereitung und Probekörperherstellung..... 4-3
4.4	Aufbereitung der Messdaten..... 4-6
<b>5. Berechnung charakteristischer Materialkennwerte.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	Grundlagen zum elastischen Materialverhalten..... 5-1
5.2	Berechnungsannahmen und Festlegungen..... 5-8
<b>6. Versuche ohne thermische Beeinflussung.....</b>	<b>6-1</b>
6.1	Vorbelastungsprozedur..... 6-1
6.2	Mechanisches Verformungsverhalten – Grundlagen..... 6-12
6.3	Begrenzung der Spannungspfade – theoretischer Ansatz..... 6-18
6.4	Begrenzung der Spannungspfade – Ergebnisse..... 6-22
6.5	Zusatzbetrachtungen – Lokalisierung entstehenden Porendrucks..... 6-24
<b>7. Ergebnisse – Versuche ohne thermische Beeinflussung.....</b>	<b>7-1</b>
7.1	Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten..... 7-1
7.2	Spannungs- und materialzustandsabhängiger Elastizitätsmodul..... 7-8
7.3	Spannungs- und materialzustandsabhängige Querdehnzahl..... 7-11
<b>8. Versuche mit thermische Beeinflussung.....</b>	<b>8-1</b>
8.1	Einleitung..... 8-1
8.2	Probekörperkerntemperatur – Einfluss des Wassergehaltes..... 8-4
8.3	Probekörperkerntemperatur – Einfluss des Temperaturgradienten..... 8-5
8.4	Entwicklung der Prüfprozedur..... 8-5
8.5	Approximation der Probekörperkerntemperatur..... 8-9
8.6	Festlegung der Prüfzeitpunkte..... 8-12
8.7	Diskussion der Prüfprozedur..... 8-13
<b>9. Ergebnisse – Versuche mit thermischer Beeinflussung (quasi-vollständiges Durchfrieren).....</b>	<b>9-1</b>
9.1	Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten..... 9-1
9.2	Elastizitätsmodul und Querdehnzahl..... 9-6
<b>10. Ergebnisse – Versuche mit thermischer Beeinflussung (Phasenübergang-Abkühlung/Erwärmung).....</b>	<b>10-1</b>
10.1	Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten..... 10-1
10.2	Elastizitätsmodul und Querdehnzahl..... 10-6
<b>11. Zusammenfassung.....</b>	<b>11-1</b>
<b>12. Ausblick.....</b>	<b>12-1</b>

---

**Literaturverzeichnis**

**Abbildungsverzeichnis**

**Tabellenverzeichnis**

**Anlagenverzeichnis**

**Anlagen**

## Griechische Groß-/Kleinbuchstaben

Symbol/Abkürzung	Begriff
$\alpha$	Neigung der Scherfuge zur Horizontalen
$\beta'$	Winkel der Bruchgeraden
$\beta'_{Grz}$	Grenzreibungswinkel
$\gamma$	Spannungspfadwinkel
$\varepsilon_{11\_el}$	elastische Dehnung (11-Richtung)
$\varepsilon_{22\_el}$	elastische Dehnung (22-Richtung)
$\varepsilon_{33\_el}$	elastische Dehnung (33-Richtung)
$\varepsilon_{11\_el\_50}$	elastische Axialdehnung (11-Richtung) bei 50 % Abnahme der Dehnungsdifferenz zwischen größter und kleinster Dehnung (long-term Versuche)
$\Delta\varepsilon_{11\_el}$	Änderung der elastischen Axialdehnung
$\varepsilon_{11\_el\_isotrop}$	isotrope elastische Axialdehnung
$\varepsilon_{11\_el\_dev}$	deviatorische elastische Axialdehnung
$\varepsilon_{11\_pl}$	plastische Axialdehnung
$\sum \varepsilon_{11\_pl}$	Akkumulierte plastische Axialdehnung
$\rho_{Pr}$	Proctordichte
$\sigma_f$	Normalspannung i. d. Scherfuge beim Versagen - Scherbruch (failure)
$\sigma_{Okt}$	Oktaedernormalspannung
$\tau_{Okt}$	Oktaederschubspannung
$\tau$	Schubspannung
$\tau_f$	Schubspannung i. d. Scherfuge beim Versagen - Scherbruch (failure)
$\varphi'$	Effektiver innerer Reibungswinkel
$\varphi$	Innerer Reibungswinkel

## Lateinische Groß-/Kleinbuchstaben

Symbol/Abkürzung	Begriff
<i>A</i>	Nr. Prüfzeitpunkt - (+10°C)
<i>ABiS</i>	Asphaltbinderschicht
<i>ADS</i>	Asphaltdeckschicht
<i>AMS</i>	Axial-Messsystem
<i>ATS</i>	Asphalttragschicht
$A_{S\_11}$	Amplitude der Axialverformung
<i>B</i>	Nr. Prüfzeitpunkt - (-10°C)
<i>CCP</i>	Constant Confining Pressure



## Abkürzungsverzeichnis

---

<i>c</i>	Kohäsion
<i>C</i>	Nr. Prüfzeitpunkt - (+3°C)
<i>D<sub>Pr</sub></i>	Verdichtungsgrad
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	Fehler
<i>FSS</i>	Frostschuttschicht
<i>GZ</i>	Grenzzustand
<i>f</i>	Frequenz
<i>k<sub>f</sub></i>	Materialfestigkeit
<i>I<sub>1</sub></i>	1. Invariante des Spannungstensors
<i>I<sub>2</sub></i>	2. Invariante des Spannungstensors
<i>I<sub>3</sub></i>	3. Invariante des Spannungstensors
<i>J<sub>1</sub></i>	1. Invariante des deviatorischen Spannungstensors
<i>J<sub>2</sub></i>	2. Invariante des deviatorischen Spannungstensors
<i>J<sub>3</sub></i>	3. Invariante des deviatorischen Spannungstensors
<i>k</i>	Abkühlrate
<i>KTS</i>	Kiestragschicht
<i>KTS 97-04</i>	Kiestragschicht Verdichtungsgrad -Wassergehalt (im Beispiel 97% Verdichtungsgrad und 4% Wassergehalt)
<i>L</i>	Spannungspfadlänge
<i>LW</i>	Lastwechsel
<i>LW<sub>50</sub></i>	Lastwechselzahl für das Erreichen von 50 % Dehnungsdifferenz der elastischen Axialdehnung
<i>MSP<sub>A</sub></i>	Anfang der Multi-Stage-Prozedur bei definierter Probekörperkerntemperatur (Prüfzyklus während des Phasenübergangs)
<i>MSP<sub>E</sub></i>	Ende der Multi-Stage-Prozedur bei definierter Probekörperkerntemperatur (Prüfzyklus während des Phasenübergangs)
$q = \frac{1}{3} \cdot I_1$	mittlere Spannung
$q = \sqrt{3 \cdot J_2}$	Deviator
$q' = \sigma_V - \sigma_H$	deviatorische Spannung (Kompression <sup>[+]</sup> /Extension <sup>[-]</sup> )
<i>RMS</i>	Radial-Messsystem
<i>SoB</i>	Schichten ohne Bindemittel
<i>STS</i>	Schottertragschicht
<i>S<sub>F</sub></i>	Fehlerquadratsumme
<i>s<sub>11</sub></i>	Axialverformung
<i>s<sub>11_max</sub></i>	Axialverformung-Maximalwert
<i>s<sub>11_min</sub></i>	Axialverformung-Minimalwert
<i>s<sub>11gl_MW</sub></i>	Gleitender Mittelwert der Axialverformung
<i>ToB</i>	Tragschichten ohne Bindemittel
<i>TP-Fi (mit i=1-10)</i>	Nr. Prüfpunkt - Abkühlphase
<i>TP-Ti (mit i=1-10)</i>	Nr. Prüfpunkt - Erwärmungsphase
<i>T</i>	Temperatur
<i>ΔT</i>	Temperaturdifferenz
<i>t</i>	Zeit

## Abkürzungsverzeichnis

---

$\Delta t_{MSP}$	Zeitspanne zwischen Anfang und Ende der Multi-Stage-Prozedur
$V_0$	Ausgangsvolumen
$V_i$	Volumen am Lastwechsel i
$\frac{V_i}{V_0}$	Volumenverhältnis
$VCP$	Various Confining Pressure
$w$	Wassergehalt
$w_{opt}$	optimaler Wassergehalt

### Materialzustandsabhängigkeit:

Änderungen der Materialantwort infolge Änderung der Gemischzusammensetzung oder der Struktur des Gesteinskorngemisches. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit implizieren Änderungen des Materialzustandes einen veränderten Verdichtungsgrad oder einen veränderten Wassergehalt.

### Versuche ohne thermische Beeinflussung:

Gilt für Versuche mit  $T > 0 \text{ °C}$ , da impliziert wird, dass thermische Veränderungen oberhalb dieser Temperaturgrenze (und innerhalb des Gebrauchstemperaturbereiches von SoB) zu keiner Veränderung des mechanischen Verformungsverhaltens führen.

### Versuche mit thermischer Beeinflussung:

Gilt für Versuche mit  $T \leq 0 \text{ °C}$ , da impliziert wird, dass thermische Veränderungen unterhalb dieser Temperaturgrenze zur Beeinflussung des mechanischen Verformungsverhaltens von SoB (unter der Voraussetzung der Existenz von Wasser im Gesteinskorngemisch) führen.

### Art der Beanspruchung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Gesteinskorngemische ausschließlich zyklisch unter triaxialen Bedingungen beansprucht (VCP Testprozedur).

### Spannungspfad/Spannungspfadlänge:

Die im Rahmen der Materialuntersuchung messtechnisch erfassten Verformungen und die daraus berechneten Dehnungen beziehen sich ausschließlich auf die Dehnungsamplituden, d. h. die Extremwerte pro Lastzyklus. Die Materialantwort während der Be- bzw. Entlastung bleibt hierbei unberücksichtigt. Folglich wird bei der Angabe von Dehnungen infolge definierter Spannungspfade oder Spannungspfadlängen ausschließlich die maximale Dehnung zwischen Spannungspfadanfang und -ende verstanden.

### Vorzeichenkonvention

Druckspannungen/Stauchungen (sowohl vertikal als auch radial) mit positiven Vorzeichen in Anlehnung an die Vorzeichenregel in der Bodenmechanik.

## 1. Problemstellung

### 1.1 Motivation und Vorgehensweise

Im Straßenbau sind Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) die konstruktive Grundlage des frostsicheren Oberbaus, unabhängig von der Bauweise oder der Belastungsklasse. Davon ausgenommen ist der sogenannte vollgebundene Oberbau, welcher jedoch nur bei besonderen Randbedingungen und deshalb sehr selten zur Anwendung kommt. Die Materialien, welche zum Einsatz kommen, sind sehr vielfältig und müssen den Anforderungen des gültigen Regelwerkes (TL SoB-StB) genügen. Die empirischen Schichtdickenfestlegungen bei konventioneller Dimensionierung (RStO) resultieren aus Anforderungen an die Tragfähigkeit und Frostsicherheit der Konstruktion. Unterschiedliches mechanisches Verformungsverhalten verschiedener Gesteinskorngemische bleibt hierbei genauso unberücksichtigt wie sich ändernde Materialzustände. Auch im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung (sowohl der RDO Asphalt als auch der RDO Beton) basieren die Festlegungen zur Schichtdickenwahl auf den zuvor genannten Überlegungen in Verbindung mit vereinfachten Ansätzen zur Berücksichtigung der elastischen Materialantwort.

Ungebundene Materialgemische werden nicht nur im Straßenbau bzw. dem Verkehrswegebau oder der Geotechnik, sondern in verschiedensten weiteren wissenschaftlichen Fachrichtungen untersucht. Beispielweise wird in der Verfahrenstechnik, aber auch im Bereich der Medizin je nach Dimension der einzelnen Bestandteile von Granulat, Pulver oder Schüttgut gesprochen. Ungebundene Materialgemische zeichnen sich durch ihr völlig eigenständiges Materialverhalten aus, welches je nach Randbedingung einem Festkörper oder einer Flüssigkeit ähneln kann. In Ruhe und bei statischer Belastung sind die Eigenschaften festkörperähnlich. In Bewegung oder bei deutlich dynamischer Belastung können Fluidisierungen festgestellt werden. Im Gebrauchsbeanspruchungsbereich einer Straßenverkehrsanlage liegt ein eigenständiges spannungs- und materialzustandsabhängiges Verhalten vor.

Das mechanische Verformungsverhalten von ToB ist sowohl durch elastische als auch durch plastische Verzerrungen geprägt, wobei die Größe der jeweiligen Dehnungen/Stauchungen u. a. von der Art und Größe der Beanspruchung abhängt. Erschwerend kommt der Einfluss unterschiedlichster, derartige Gemische beeinflussender Randbedingungen hinzu. Verwiesen sei an dieser Stelle auf die Materialdichte, den Wassergehalt, Korngrößenverteilungen oder die Kornform, um nur einige dieser Größen zu nennen. Die Kraftübertragung innerhalb ungebundener Gemische setzt grundsätzlich Korn-zu-Korn-

Berührungen voraus, weshalb auch Reibung ein Bestandteil dieser Interaktion ist. Deshalb werden solche „Systeme“ in der Physik oder der Verfahrenstechnik als dissipative Systeme eingestuft, da eingebrachte mechanische Energie zum Teil in Wärmeenergie umgewandelt wird.

Die vorliegende Arbeit schließt sich an die Forschungstradition der Professur für Straßenbau hinsichtlich der Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens von Gesteinskornmischungen (beispielsweise durch die Dissertationen von WELLNER, F. (1986), Queck, U. (1992), Gleitz, T. (1996), Werkmeister, S. (2003), Numrich, R. (2004) oder die Habilitationen von Wellner, F. (1993) und Werkmeister, S. (2007) sowie eine Vielzahl von Veröffentlichungen) an.

Die thermische Beanspruchung ungebundener Gesteinskornmischungen (ofentrockener Zustand) innerhalb des Gebrauchstemperaturbereiches ist für das Materialantwortverhalten als unbedeutende Einflussgröße einzustufen. Dies gilt jedoch nicht mehr, wenn Wasser im Material vorhanden ist und Temperaturänderungen vom positiven in den negativen °C-Temperaturbereich (oder entgegengesetzt) vorliegen. In situ ist Wasser grundsätzlich in unterschiedlichen Erscheinungsformen im Gesteinskornmisch existiert. Gleichermäßen resultiert aus den klimatischen Randbedingungen in Deutschland ein sehr häufiger Wechsel zwischen den genannten Temperaturbereichen in den ToB. Deshalb ist ein Schwerpunkt der Arbeit die Untersuchung der Änderung des mechanischen Verformungsverhaltens bei derartiger thermischer Beeinflussung des Gesteinskornmischungen.

Die grundsätzliche Notwendigkeit derartiger Untersuchungen soll nachfolgend vereinfacht verdeutlicht werden. Abbildung 1-1 zeigt beispielhaft die mittlere Tagestemperatur über einen definierten Betrachtungszeitraum. Dazu zeigt Abbildung 1-3 die numerisch simulierten 0 °C-Isothermenverläufe [Datengrundlage - FGSV (2010)]. Im Rahmen der im Straßenbau üblichen Betrachtungen zur Frostsicherheit sind ausschließlich die erreichten bzw. erreichbaren Tiefen der Frosteindringung von Bedeutung, um durch die Festlegung der Dicke des frostsicheren Oberbaus Schäden infolge der bekannten Schädigungsszenarien mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen zu können. Grundsätzlich jedoch führt die Existenz von 0 °C-Isothermen, welche selbst mehrfach innerhalb eines Tages auftreten können, unabhängig von der Tiefe innerhalb der ToB dazu, dass Subschichten mit erheblich unterschiedlichem mechanischen Verformungsverhalten vorliegen. Abbildung 1-2, Abbildung 1-4 und Abbildung 1-6 zeigen schematisch, welche möglichen grundsätzlichen Schichtungen auftreten können.

Szenario I und II (Abbildung 1-2, Abbildung 1-4) zeigen die stetige Durchfrierung, beginnend an der Fahrbahnoberfläche, gefolgt von stetiger Erwärmung, ebenfalls beginnend an

der Fahrbahnoberfläche, mit einem Isothermenschnittpunkt unterhalb des Planums. Durch den instationären Charakter der klimatischen Randbedingungen in situ existiert der Isothermenschnittpunkt grundsätzlich in beliebigen Konstruktionstiefen.

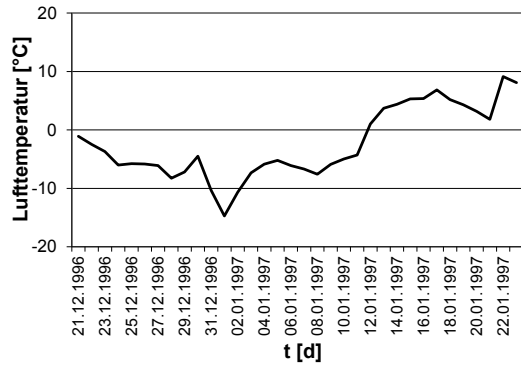


Abbildung 1-1: Tagesmitteltemperatur der Luft am Beispiel der Station Aachen im Zeitraum vom 21.12.1996 bis 22.01.1997

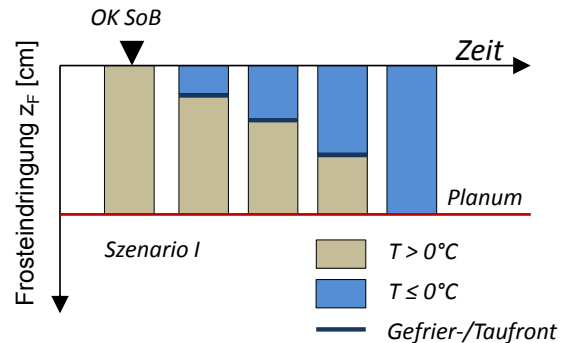


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des zeitabhängigen vollständigen Durchfrierens der ungebundenen Tragschicht (FSS)

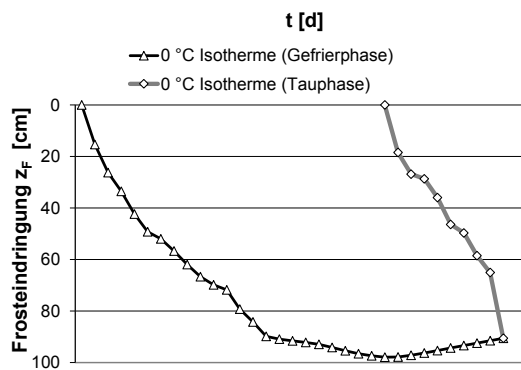


Abbildung 1-3: Numerisch simulierter Isothermenverlauf innerhalb des Betrachtungszeitraumes

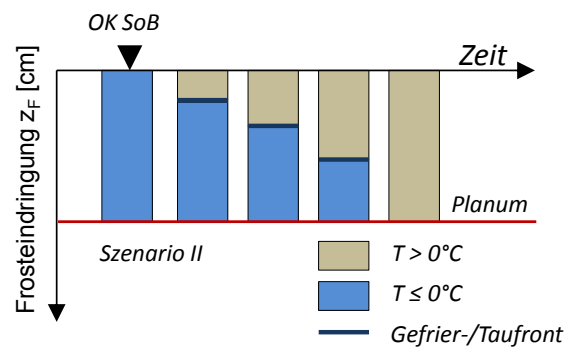


Abbildung 1-4: Schematische Darstellung des zeitabhängigen Auftauprozesses der ungebundenen Tragschicht (FSS) – Isothermenschnittpunkt unterhalb des Planums

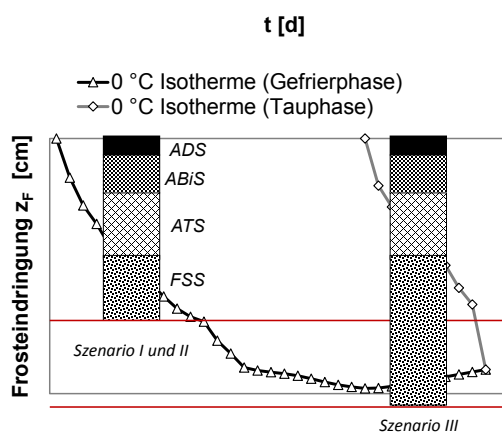


Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Isothermenverläufe mit Schnittpunkten innerhalb und unterhalb der FSS

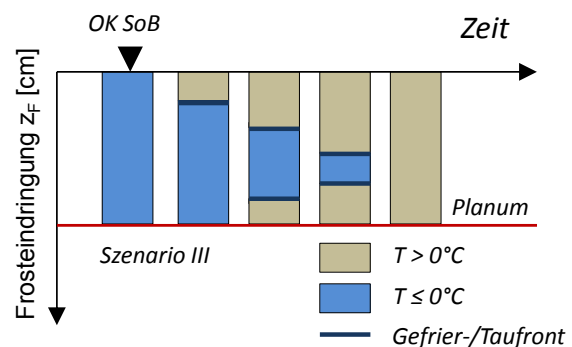


Abbildung 1-6: Schematische Darstellung des zeitabhängigen Auftauprozesses der ungebundenen Tragschicht (FSS) – Isothermenschnittpunkt innerhalb der FSS

Szenario III (Abbildung 1-6) zeigt die Schichtung bei einem Isothermenschnittpunkt innerhalb der FSS. Dabei bewegen sich gleichzeitig zwei Taufrenten innerhalb der SoB, welche bis zum vollständigen Auftauen gefrorene zwischen sich erwärmenden Schichten aufweist.

Hierbei zeigen die dargestellten Schichten, nur vereinfacht, die grundsätzlich existierenden Schichtungsmöglichkeiten. Die Schichten sind hierbei jedoch nicht als Schichten gleicher Materialeigenschaften zu verstehen, da infolge der Gefrier- oder Taubeanspruchung stets eine stetige Veränderung fluider und kristalliner Wasseranteile vorliegt. Infolgedessen unterliegt die mechanische Materialantwort in Abhängigkeit von den im Betrachtungselement existenten Bestandteilen sowie deren Aggregatzustand ebenfalls einer permanenten Veränderung.

Neben der Analyse des Materialverhaltens unter triaxialen Bedingungen und zyklischer Beanspruchung stellt die Erarbeitung einer geeigneten Prüfprozedur einen weiteren unerlässlichen Bearbeitungsschwerpunkt dieser Arbeit dar.

### 1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in vier wesentliche Bearbeitungsteile. Der erste Arbeitsteil gibt einen Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik und geht dabei auf Einflussfaktoren und Modellansätze ein (Kapitel 2).

Im zweiten Bearbeitungsteil werden die theoretischen Grundlagen zum Triaxialversuch erläutert, die Laboruntersuchungen vorgestellt und die Voraussetzungen für die Berechnung charakteristischer Materialkennwerte dargelegt (Kapitel 3, 4 und 5).

Im dritten Bearbeitungsteil werden die Vorbelastungsprozedur erarbeitet und die eigentliche Prüfprozedur für die durchzuführenden Versuchsreihen entwickelt (Kapitel 6).

Im vierten Arbeitsteil werden die Versuche und Versuchsergebnisse vorgestellt. Hierbei unterteilt sich die Struktur in thermisch unbeeinflusste und thermisch beeinflusste Versuche (Kapitel 7 bis 10). Abbildung 1-7 verdeutlicht die grundsätzliche Untersuchungssystematik.

Abgeschlossen wird die Arbeit durch eine Zusammenfassung sowie einen Ausblick über mögliche weitere, auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit beruhende, Untersuchungen (Kapitel 11 und 12).

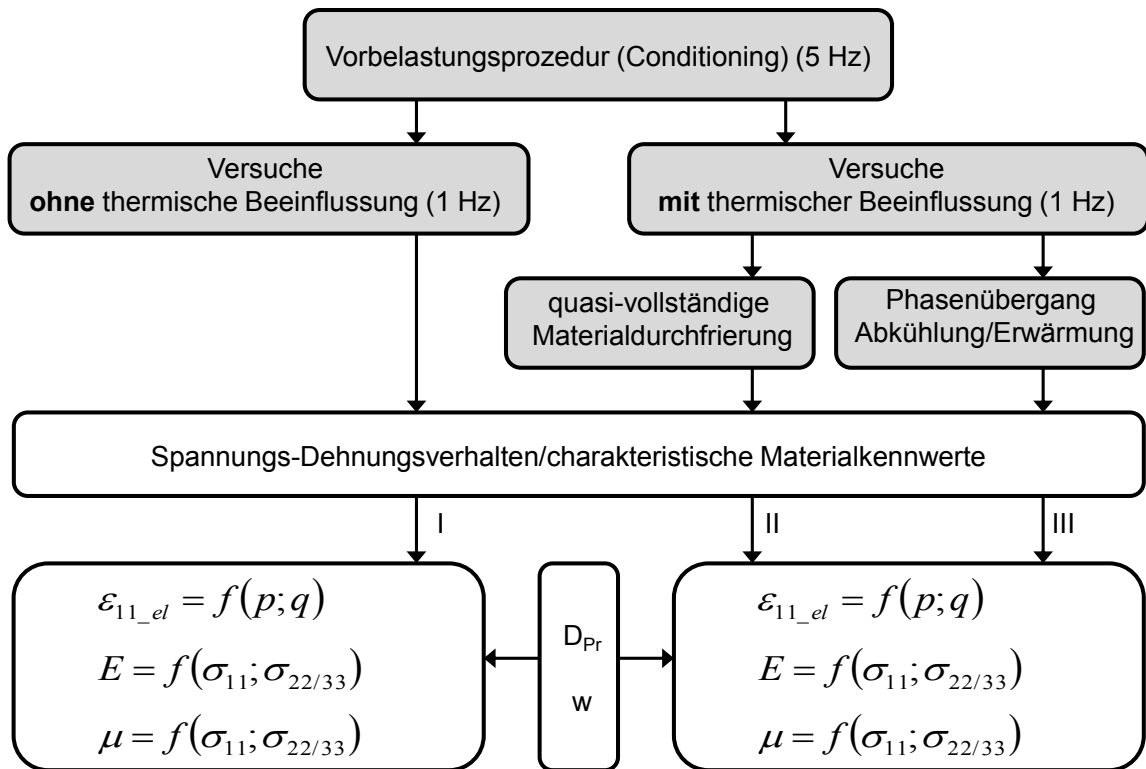


Abbildung 1-7: Prinzipielle Untersuchungssystematik



## **2 Materialverhalten ungebundener Gesteinskornmische bei zyklischer Belastung**

### 2.1 Grundlagen und Begriffsbestimmungen

Unterschiedliche Beanspruchungsarten von Materialien führen zu verschiedensten Effekten im Materialverhalten. Beispielsweise unterscheiden sich statische bzw. quasistatische Beanspruchungen im Materialantwortverhalten z. T. sehr deutlich vom Verhalten bei zyklischer Beanspruchung. Die eindeutige und fachübergreifend einvernehmliche Bezeichnung unterschiedlicher Beanspruchungsarten sowie der Abgrenzungen untereinander ist in der Literatur nicht eindeutig. Deshalb werden nachfolgend verschiedene Fachtermini vorgestellt und erläutert.

Beispielsweise findet man in Postulaten zur Festigkeitslehre sowie zur Technischen Mechanik die Unterscheidung zwischen statischer, dynamischer oder zyklischer Belastung. Zusätzlich wird hierbei die regelmäßige zyklische oder regellos stochastische Belastung als Teildisziplin der Festigkeitslehre – der Betriebsfestigkeitslehre definiert [KUNA, M. (2010)]. Hinsichtlich der Klassifikation der Bruchvorgänge werden hierbei die Beanspruchungsarten nach KUNA, M. (2010) wie folgt unterschieden:

- statisch      Gewaltbruch
- dynamisch    Schlagbruch
- zyklisch      Ermüdungsbruch/Schwingbruch
- chemisch      Spannungsrisskorrosion/Schwingungsrisskorrosion

Zudem ist nach RICHARD, H. A./SANDER, M. (2012) zwischen der Belastungsart wie beispielsweise Zug, Biegung oder Torsion sowie dem zeitlichen Verlauf – definiert als Belastungsfall – zu unterscheiden, welcher, nachfolgend dargestellt, differenziert werden kann:

- Statische Belastung
- Schwellbelastung
- Wechselbelastung
- Allg. periodische Belastung
- Belastung mit variabler Amplitude
- Stoßbelastung

Auch wird die schwingende Belastung unabhängig von Frequenz und Vorzeichen der Spannung (Druckschwell- und Zugschwellbelastung) unter dem Begriff „zyklische Belastung“ zusammengefasst [BÜRGELE, R. et al. (2014)].

Im Bereich der Bodenmechanik wird die auch in anderen Fachbereichen verwendete Bezeichnung für monotone Belastungen, wie in Abbildung 2-1 a) dargestellt, verwendet. Für Spannungs-Dehnungsbeziehungen nach Abbildung 2-1 b) wird nach STUDER, JOST A. et al. (2007) der Begriff dynamisch zyklisch verwendet.

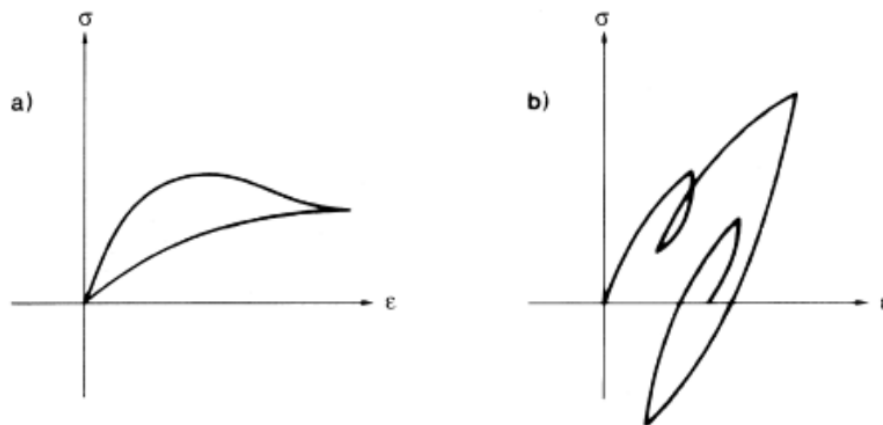


Abbildung 2-1: Schematisches Spannungs-Dehnungsdiagramm für: a monotone, b zyklische Belastungen [STUDER, JOST A. et al. (2007)]

Der Begriff zyklisch wird aber auch in der Literatur, welche sich mit ungebundenen Materialien beschäftigt, nicht eindeutig definiert bzw. abgegrenzt. Innerhalb der Bodenmechanik werden speziell im Zusammenhang mit Pfahlgründungen in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA-Pfähle) die Termini, wie nachfolgend erläutert, verwendet.

Zyklisch impliziert, dass das Material wiederholt beansprucht wird und Trägheitskräfte i. d. R. vernachlässigbar sind. Unter zyklischer Belastung (von Pfählen) werden niederfrequente Einwirkungen verstanden, welche bei Schwell- oder Wechselbelastung zu erhöhter Akkumulation (der Pfahlverschiebung) führen. Niederfrequent wird hierbei mit  $f \leq 1 - 2$  Hz definiert.

In Anlehnung an die Definition der zyklischen Belastung wird die dynamische Belastung als hochfrequente Belastung eingestuft, bei welcher die Trägheitskräfte das Systemverhalten maßgebend mitbestimmen können.

Als stoßartige Belastungen werden jene Belastungen eingestuft, welche von sehr kurzer Dauer sind und deren Einwirkdauer von Millisekunden bis zu einigen Sekunden betragen

kann. Die Begrenzung nach „oben“ ist hierbei nicht eindeutig festgelegt. Trägheitskräfte sind wirksam und führen zur Erhöhung des Bodenwiderstandes.

GOTSCHOL, A. (2002) versucht die unterschiedlichen Belastungsarten detaillierter abzugrenzen und postuliert die Unterscheidung nach Abbildung 2-2. Die Einstufung sollte hierbei als Orientierung für nichtruhende Beanspruchungen dienen.

zyklisch	zyklisch-dynamisch	dynamisch
$0 < f \leq 1,0 \text{ Hz}$	$1,0 < f \leq 10,0 \text{ Hz}$	$f > 10,0 \text{ Hz}$

Abbildung 2-2: Näherungsweise Einstufung der Beanspruchungsarten nach dem Frequenzbereich [GOTSCHOL, A. (2002)]

Nach GOTSCHOL, A. (2002) liegen dynamische Beanspruchungen vor, wenn eine zeitlich veränderliche Belastung von begrenzter Dauer mit dominierend elastischem Bodenverhalten vorliegt. Trägheitskräfte sind zu berücksichtigen, plastische Dehnungsanteile können vernachlässigt werden. Dies können beispielweise Belastungen infolge von Maschinen mit Unwucht, Erdbeben oder Sprengungen sein.

Zyklische Beanspruchungen werden nach GOTSCHOL, A. (2002) als langanhaltende Belastungswechsel mit elastischen und plastischen Dehnungsanteilen definiert. Des Weiteren postuliert genannter Autor, dass Trägheitskräfte aufgrund der geringen Frequenz vernachlässigbar sind. Als Beispiel hierfür wird Wellenschlag auf Off-shore Bauwerke genannt.

Da die Bauwerk-Bodenreaktion sehr komplex sein kann, postuliert GOTSCHOL, A. (2002), dass sich verschiedene Anregungen nicht eindeutig als dynamische oder zyklische Beanspruchung einordnen lassen. Deshalb führt GOTSCHOL, A. (2002) den Begriff der zyklisch-dynamischen Belastung ein. Entscheidend bei derartigen Belastungen ist die Größe des betrachteten Zeitfensters. Als Beispiel wird das transiente Ereignis einer Zugüberfahrt angeführt. Die Belastung währt hier sehr kurz, so dass auch die plastischen Dehnungsanteile vergleichsweise gering sind. Vergrößert man jedoch das Zeitfenster, ist dies als periodisch, zyklisch-dynamische Anregung mit akkumulierten plastischen Dehnungen einzustufen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden nach den o. g. Definitionen maßgeblich niederfrequente Belastungen mit einer Belastungsfrequenz von 1 Hz durchgeführt. Für Vorbelastungsprozeduren sowie Versuche zur Untersuchung des Langzeitverhaltens wurde die Belastungsfrequenz aus Zeitgründen auf 5 Hz erhöht. Für die Auswertung der Ver-

suche wurde unterstellt, dass Trägheitskräfte keine oder nur untergeordnete (vernachlässigbare) Bedeutung haben.

*Für alle in der Arbeit durchgeführten Versuche wird ausschließlich der Begriff zyklischer Versuch/zyklische Versuche verwendet.*

## 2.2 Elastisches Materialverhalten - Einflussgrößen

### 2.2.1 Spannungszustand

In der Literatur sind verschiedenste Postulate zum Einfluss des Spannungszustandes auf die elastische Materialantwort zu finden. In LEKARP et al. (2000/1) wurde der Stand des Wissens zum elastischen Materialverhalten ungebundener Gesteinskorngemische sehr umfassend zusammengefasst und unter anderem der Einfluss des Spannungszustandes auf die elastische Materialantwort ausgewertet. Dies wird nachfolgend auszugsweise wiedergegeben.

Anmerkung:

Auf die in LEKARP et al. (2000/1) verwendeten Quellen wird zur Vollständigkeit ebenfalls verwiesen. Da hierzu nicht alle Quellen Gegenstand eigener Literaturrecherche waren, sind die aus LEKARP entnommenen Literaturquellen mit [in LEKARP et al. (2000/1) aus Urquellenangabe] gekennzeichnet.

Bereits mehrfach wurde der Einfluss der Radialspannung bzw. des Zelldruckes oder mittleren Hauptspannungssumme auf den Elastizitätsmodul nachgewiesen [in LEKARP et al. (2000/1) aus HICKS (1970), aus SMITH/NAIR (1973), aus UZAN (1985)]. Dabei konnte der Anstieg des Elastizitätsmoduls bei ansteigender Zellspannung oder größer werdender Hauptspannungssumme gezeigt werden. Des Weiteren wird postuliert, dass der Elastizitätsmodul nur unwesentlich von der Größe der Deviatorspannung beeinflusst wird [in LEKARP et al. (2000/1) aus HICKS (1970)]. Auch wurde berichtet, dass eine geringfügige Abnahme der Steifigkeit bei kleinen deviatorischen Beanspruchungszuständen vorliegt, während aus größeren deviatorischen Beanspruchungszuständen größere Steifigkeiten resultieren. Festgestellt wurde auch, dass der Elastizitätsmodul bei wiederholter deviatorischer Beanspruchung und konstanter Zellspannung geringfügig abnimmt [in LEKARP et al. (2000/1) aus MORGAN (1996)].

Grundsätzlich sei an dieser Stelle bereits darauf verwiesen, dass das spannungsabhängige Materialverhalten in der Geotechnik üblicherweise als Barotropie bezeichnet wird und zusammen mit der Pyknotropie, der Dichteabhängigkeit, insbesondere bei zyklischen Beanspruchungen, von wesentlicher Bedeutung für die Beschreibung des Materialverhaltens ist.

### 2.2.2 Constant confining pressure vs. Various confining pressure

Wird im Rahmen von Triaxialversuchen das Materialverhalten untersucht, ist grundsätzlich zwischen Versuchen mit konstantem Stützdruck und zyklischem Stützdruck zu unterscheiden. Diese sehr spezifische Problematik hinsichtlich der Art der Versuchsdurchführung ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, weshalb an dieser Stelle auf unterschiedliche Postulate der Geotechnik zu dieser Thematik verwiesen wird.

Prinzipiell bekannt ist jedoch, dass das Spannungs-Verformungsverhalten pfadabhängig ist. Das bedeutet, dass ein identischer Spannungspunkt durch unterschiedliche Spannungspfade angesteuert werden kann und daraus unterschiedliche Materialantworten resultieren [MÜLLERSCHÖN (2000)]. Folglich unterscheiden sich auch die charakteristischen Materialkennwerte Elastizitätsmodul und Querdehnzahl (Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4) in Abhängigkeit von der Art der Versuchsdurchführung [LEKARP et al. (2000)]. Sowohl bei der Vorstellung des Triaxialversuches (Kapitel 3) als auch der Berechnung charakteristischer Materialkennwerte (Kapitel 5) wird diese Problematik nochmals diskutiert.

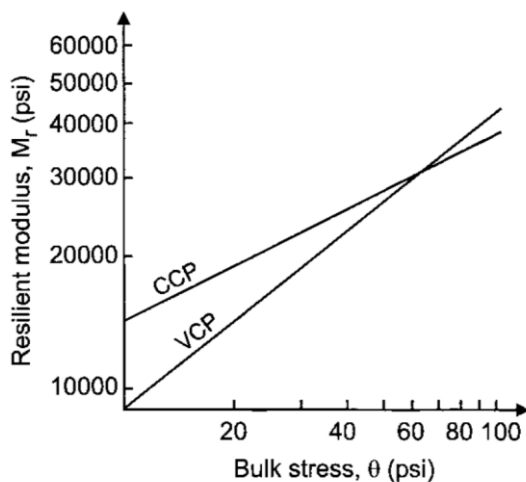


Abbildung 2-3: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der mittleren Spannung sowie der Versuchsdurchführung [LEKARP et al. (2000)]

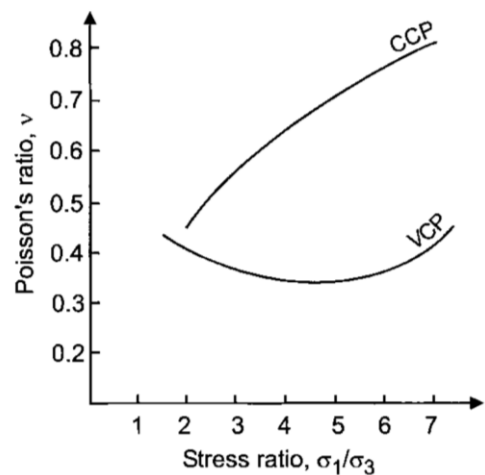


Abbildung 2-4: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis sowie der Versuchsdurchführung [LEKARP et al. (2000)]

2.2.3 Dehnungsamplitude

In der Bodenmechanik wird grundsätzlich hinsichtlich der Belastungsart zwischen statischen und dynamischen Steifigkeiten unterschieden.

Bekannt ist, dass Bodenmaterial bei sehr kleinen Scherdehnungen vergleichsweise sehr steif reagiert und das zunehmende Dehnungsamplituden zu einer nichtlinearen Reduzierung der Steifigkeit führen. Mit weiter steigender Dehnungsamplitude und überwiegend plastischer Dehnungsreaktion erreicht das Schubmodul (bzw. das Schubmodulverhältnis) den Restwert [MEY, A./VON WOLFFERSDORF, P.A. (2008)]. Abbildung 2-5 verdeutlicht die Abnahme des Schubmodulverhältnisses in Abhängigkeit von der Scherdehnung.

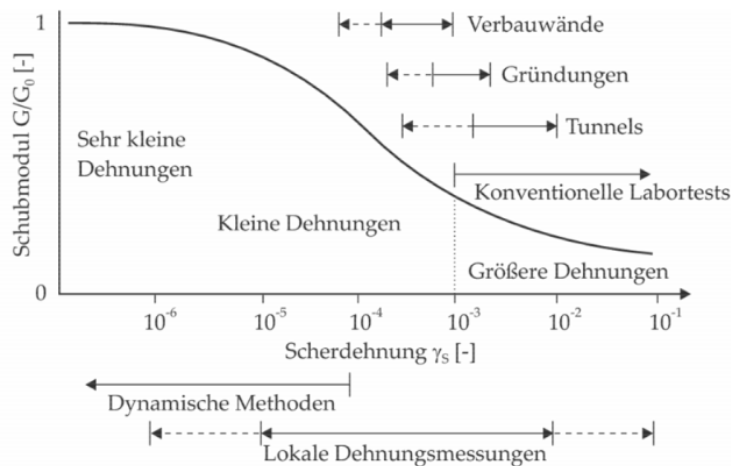


Abbildung 2-5: Schubmodul in Abhängigkeit von der Scherdehnung [MEY, A./VON WOLFFERSDORF, P.A. (2008)]

2.2.4 Dichte

Bekannt ist, dass die Dichte des ungebundenen Materials einen sehr charakteristischen Einfluss sowohl auf das elastische als auch auf das plastische Materialverhalten hat. Für die Beschreibung der Dichte des Materials werden unterschiedliche Ausdrücke, wie beispielsweise der Verdichtungsgrad ( $D_{Pr}$ ), die Porenzahl ( $e$ ) oder die Lagerungsdichte ( $D$ ) herangezogen, welche wie folgt definiert werden:

$$D_{Pr} = \frac{\rho}{\rho_{Pr}} \qquad e = \frac{V_0}{V_k} = \frac{n}{1-n} \qquad D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$

$\rho$ = Trockendichte (Einbauzustand)	$V_0$ = Hohlraumvolumen $V_k$ = Feststoffvolumen $n$ = Porenanteil	$n$ = Porenanteil $n_{max}$ = Porenanteil (lockerste Lagerung) $n_{min}$ = Porenanteil
$\rho_{Pr}$ = Trockendichte (Proctordichte)		

Die Pyknotropie wird häufig an Hand der Volumendehnungskurven dargestellt (Abbildung 2-6, Abbildung 2-7). Auf der vertikalen Achse wird hierbei die Volumendehnung, auf der horizontalen Achse die Vertikaldehnung aufgetragen. Erkennbar ist die Auflockerung einer dichten Sandprobe während des Triaxialversuchs (statisch) bis zum Erreichen der kritischen Dichte [KOLYMBAS (2011)]. Hierbei wird grundsätzlich eine Volumenvergrößerung als Dilatanz und eine Volumenverringerng Kontraktanz genannt. Volumenverringerng bedeutet eine Reduzierung des Porenraums und in der Folge eine Zunahme der Kornkontakte, was sich bekanntermaßen steifigkeitserhöhend auswirkt. Dilatantes Verhalten führt zum gegenteiligen Effekt.

Gleichermaßen deutlich wird der Einfluss der Pyknometrie am Beispiel der Spannungs-Dehnungslinie. Eine fortschreitende Verformung bei monotoner Belastung führt zu einem Peak, gefolgt von einem Abfall des Spannungsverhältnisses (softening). Mit dem Erreichen des Maximalwertes des Spannungsverhältnisses ist das Tragvermögen der Probe ausgeschöpft, d. h. der maximal mobilisierbare Reibungswinkel ist erreicht [KOLYMBAS (2011)].

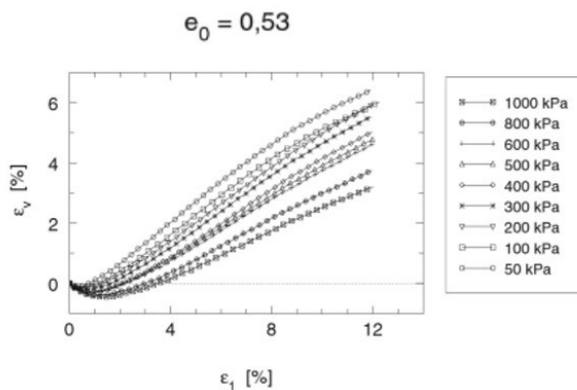


Abbildung 2-6: Beispielfhafte Darstellung der Volumendehnungskurven einer dichten Sandprobe [KOLYMBAS (2011)]

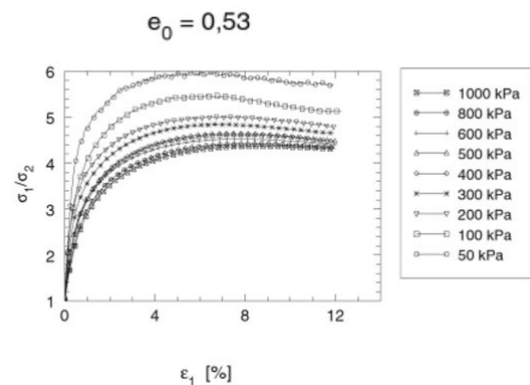


Abbildung 2-7: Beispielfhafte Darstellung der Spannungs-Dehnungslinie einer dichten Sandprobe [KOLYMBAS (2011)]

Der Einfluss der Porenzahl auf das elastische Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung kann beispielsweise durch die Änderung des Schubmoduls nachgewiesen werden. Eine Zunahme der Porenzahl führt hierbei zu einer Reduzierung (hyperbolische Abnahme) des Schubmoduls [RACKWITZ (2005)].

### 2.2.5 Lastwechselzahl

Die Lastwechselzahl wird überwiegend als Einflussgröße auf irreversible Materialverformungen herangezogen. Die elastische Materialantwort wird in der Literatur weniger

erschöpfend diskutiert. Zu dieser Thematik werden häufig die Ausführungen von HETTLER (1987) oder GÜTTLER (1984) verwendet. HETTLER postulierte nach seinen Untersuchungen eine Zyklenabhängigkeit des E-Moduls bzw. des Schubmoduls. GÜTTLER untersuchte u. a. Kiesmaterial und formulierte den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl, dem Schubspannungsverhältnis und der Seitenspannung. MOORE et al. (1970) untersuchten den Einfluss der Anzahl der Lastwechsel auf das Verhalten von Gesteinskornmischen. Dabei wurde unter anderem postuliert, dass sich der Elastizitätsmodul mit zunehmender Anzahl von Lastwechseln vergrößert, resultierend aus dem Wasserverlust während der Versuche.

Wichtig bei derartigen Betrachtungen ist, dass eine veränderte elastische Materialantwort infolge von Pyknotropie nicht mit dem Einfluss der Lastwechselzahl bei zyklischer Beanspruchung zu verwechseln ist.

### 2.2.6 Wassergehalt/Sättigung

Dass der Wassergehalt in einem Gesteinskornmischmaßgebenden Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften (reversibel als auch irreversibel) hat, ist vielfach nachgewiesen worden. Beispielsweise postulierten HAYNES, J. G./YODER, E. J. (1963) oder DAWSON, A. R. et al. (1993) eine Reduzierung des Elastizitätsmoduls bei zunehmender Sättigung des Materials. In DAWSON, A. R. (2008) wird der Einfluss des Wassergehaltes unterhalb des optimalen Wassergehaltes auf den Elastizitätsmodul des Gesteinskornmischungs unterschiedlicher Granulate dargestellt.

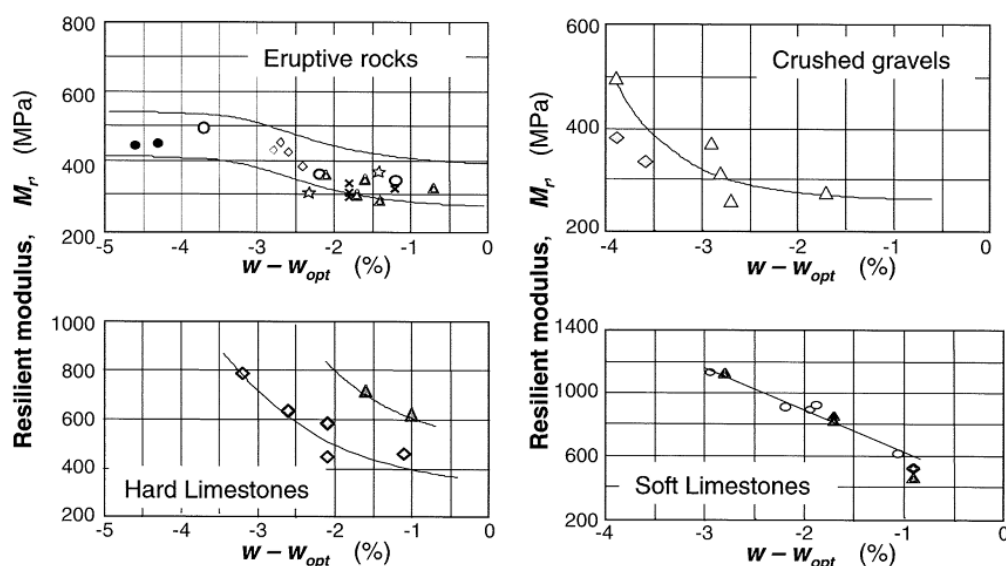


Abbildung 2-8: Einfluss des Wassergehaltes auf ungebundene granulare Materialien unterschiedlicher Herkunft [DAWSON, A. R. (2008) mit Verweis auf HORNYCH et al. (1998)]



Hierbei zeigen Gesteine vulkanischen Ursprungs vergleichsweise geringe Elastizitätsmoduln und gleichzeitig einen vergleichsweise geringen Einfluss des Wassergehaltes. Kalkstein zeigt deutlich größere Elastizitätsmoduln, jedoch eine starke Abnahme dieser bei ansteigenden Wassergehalten (Abbildung 2-8).

In Abbildung 2-9 ist die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der mittleren Spannung und verschiedenen Wassergehalten dargestellt. Der Wassergehalt wurde im Rahmen dieser Versuche gesteigert, von einem Initialwassergehalt bis zur vollständigen Sättigung, mit anschließender Dränierung der Probe.

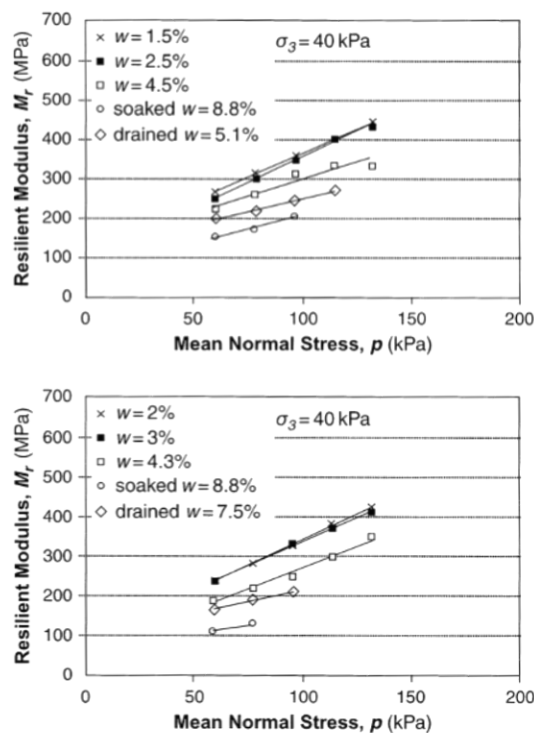


Abbildung 2-9: Elastische Materialantwort bei unterschiedlichen Wassergehalten, Einfluss des Wassergehaltes auf ungebundene granulare Materialien [DAWSON, A. R. (2008) mit Verweis auf EKBLAD/ISACSSON (2006)]

Bekannt ist, dass gesättigte Materialien Porenwasserdrücke ausbilden. Wenn Porendruck existent ist, reduziert sich die effektive Spannung des Materials. Daraus resultiert eine Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit. LEKARP et al. 2000 argumentieren, dass nicht alleinig der Sättigungsgrad das Materialverhalten beeinflusst, sondern eher das Ansprechen des Porendrucks das Verformungsverhalten kontrolliert. Weiterhin postulieren die genannten Autoren mit Bezug auf THOM, N. H./BROWN, S. F. (1987), dass die Anwesenheit von Wasser im Gesteinskornmisch einen „Schmiereffekt“ zur Folge hat, durch welchen die Deformation erhöht und der Elastizitätsmodul verringert wird, auch ohne die Entstehung von Porenwasserdrücken. Diese Ausführungen basieren auf dränierten zyklischen

Triaxialversuchen (zwischen 0,1 Hz und 3 Hz) mit Brechkorngemischen bis zu einer Sättigung von 85 % ohne feststellbaren Porenwasserdruck. Eine Erklärung des Phänomens führen LEKARP et al. 2000 darauf zurück, dass die lokal begrenzte Sauspannung mit steigendem Wassergehalt abnimmt. LEKARP et al. 2000 verweisen hierbei auf die Untersuchungen von RAAD et al. (1992), in welchen ebenfalls der Einfluss des Wassergehaltes auf das elastische Verhalten von ungebundenen Materialien untersucht wurde, mit einem im Ergebnis stehenden signifikant hohen Einfluss des Wassergehaltes in gut abgestuften Materialien mit einem hohen Feinkornanteil. Begründet wird dies dadurch, dass das Wasser besser in den Poren gehalten wird, wohingegen gleichmäßig gestufte Gemische eine freiere Dränage des Wassers erlauben.

Auch in MAGNUSDOTTIR/ERLINGSSON (2002) wurde u. a. der Einfluss des Wassergehaltes auf den Elastizitätsmodul untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die nach dem  $k-\theta$  – Modell (Gomes-Correia et al. 1999) berechneten Elastizitätsmoduln eines frostsicheren Gesteinskorngemisches ( $p=250$  kPa) mit zunehmender Sättigung erst einen Anstieg und nach dem Erreichen eines Peak Points einen Abfall erfahren. Eine detaillierte Beschreibung dieses konträren Phänomens erfolgt jedoch nicht. Der Einfluss sich aufbauender Porendrücke wird zwar vermutet, jedoch nicht gemessen.

Bezüglich der Querdehnzahl berichten LEKARP et al. 2000 mit Bezug auf HICKS (1970) und HICKS/MONISMITH (1971) über deren Reduzierung, wenn die Sättigung ansteigt. Die zur Erklärung angeführte „schmierende“ Wirkung ist jedoch zu hinterfragen [LEKARP et al. 2000].

### 2.2.7 Frequenz

Im Rahmen der Literaturstudie zum mechanischen Verformungsverhalten ungebundener Gesteinskorngemische liegen viele Postulate vor, welche hauptsächlich keine Frequenzabhängigkeit auf die elastische Materialantwort beschreiben.

Beispielsweise berichten HICKS (1970) oder THOM, N. H./BROWN, S. F. (1987) dass keine Frequenzabhängigkeit vorliegt. Zur gleichen Aussage kam NUMRICH, R. (2003) bei der Untersuchung von ungebunden Tragschichtmaterial bei Belastungsfrequenzen von 0,5 Hz bis 5 Hz.

Zu auffallend anderen Aussagen kommen SHIBUYA et al. (1995), welche das elastische Materialverhalten unter zyklischer Scherbeanspruchung in drei Frequenzbereiche einteilen und dabei eine Abhängigkeit der elastischen Scherdehnung von der Frequenz feststellen. Hierbei antwortet der Boden, ausgehend von statischer Beanspruchung bis zu einer Be-

lastungsfrequenz von 0,1 Hz, zunehmend weicher. Aus einer weiteren Vergrößerung der Frequenz bis 10 Hz resultieren keine signifikanten Unterschiede. Weiter ansteigende Frequenzen > 10 Hz beantwortet das Material mit abnehmenden Scherdehnungen und folglich zunehmender Steifigkeit.

### 2.2.8 Weitere Einflussgrößen

#### *Korngrößenverteilung (KGV), Korngröße u. a. Einflussgrößen*

Die hier behandelten Einflussgrößen können in Hinblick ihres Einflusses auf das mechanische Verformungsverhalten als untergeordnet eingestuft werden. Unterschiedlichste Postulate sind in der Literatur hierzu zu finden. In GUDENFELS, R. (1996) wurde ein sehr umfangreicher Überblick zu dieser Thematik erarbeitet, welcher hier partiell wiedergegeben wird.

Auf die in GUDENFELS, R. (1996) verwendeten Quellen wird, zur Vollständigkeit, ebenfalls verwiesen. Da hierzu nicht alle Quellen Gegenstand eigener Literaturrecherche waren, sind die aus GUDENFELS entnommenen Literaturquellen mit [in GUDENFELS, R. (1996) aus Urquellenangabe] gekennzeichnet.

Es ist davon auszugehen, dass Rund- und Brechkorn nachgewiesenermaßen zu unterschiedlichem Scherfestigkeit führen. In Triaxialversuchen wurde bereits sehr früh bestätigt, dass kantige Materialien, d. h. gebrochenes Material, größere Scherfestigkeiten erreicht als Rundkornmaterial [in GUDENFELS, R. (1996) aus HOLTZ/GIBBS (1956)]. Bestätigt wurde dieser signifikante Unterschied (bei gleicher Porenzahl) durch Versuche von VALLEGRA et al. (1956), welche zudem von Versuchen mit unterschiedlich stark geätzten Glasperlen berichten, bei welchen beobachtet werden konnte, dass eine zunehmende Oberflächenrauigkeit zur Zunahme der Scherfestigkeit führte [in GUDENFELS, R. (1996) aus VALLEGRA et al. (1956)]. Weitere Postulate, wie z. B. von BARKSDALE, R. D./ITANI, S. Y. (1989) bestätigen einen Anstieg des Elastizitätsmoduls bei rauen, kantigen, gebrochenen Gesteinskornmischen im Vergleich zu unebrochenem Kies. Unter Bezug auf die genannten Quellen sowie auf verschiedene weitere Fachliteratur, welche hier nicht explizit dargestellt und zitiert wird, ist von einer einheitlichen Tendenz auszugehen, bei welcher eine Vergrößerung des Verformungswiderstandes durch die Verwendung von Brechkorn und/oder zunehmende Oberflächenrauigkeit erreicht wird.

Zum Einfluss der Korngröße auf die mechanischen Materialeigenschaften liegen gegensätzliche Aussagen vor. Es wird sowohl von einer Abnahme der Scherfestigkeit bei einer Erhöhung der Korngröße berichtet [in GUDENFELS, R. (1996) aus LESLIE (1963) und

KOERNER (1970)], als auch vom Fehlen eines signifikant feststellbaren Einflusses auf die Scherfestigkeit [in GUDENFELS, R. (1996) aus SEELIG/RONER (1987)].

Über den Einfluss der Korngrößenverteilung wird berichtet, dass eine steigende Ungleichförmigkeit bei konstantem Größtkorn zur Zunahme der Scherfestigkeit führt [in GUDENFELS, R. (1996) aus MARSAL (1967)]. Gleichmaßen wird postuliert, dass die Scherfestigkeit durch eine Vergrößerung der Ungleichförmigkeit bei gleicher Materialdichte ansteigt [in GUDENFELS, R. (1996) aus KOERNER (1970)].

Eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls stellen HICKS, R. G./MONISMITH, C. L. (19971) bei gebrochenen Gesteinskornmischen fest, wenn der Feinkornanteil erhöht wird. Desweiteren stellen genannte Autoren eine Verringerung des Elastizitätsmoduls fest, wenn der Feinkornanteil erhöht, jedoch nur teilweise gebrochenes Gesteinskornmaterial verwendet wird. Einen nur sehr geringfügigen Unterschied hinsichtlich der Stufung postulieren THOM, N. H./BROWN, S. F. (1988) infolge der Untersuchungen an gebrochenem Kalkstein. Zu dem Ergebnis, dass weitgestufte Gesteinskornmische größere Steifigkeiten aufweisen als enggestufte Gemische, kamen VAN NIEKERK et al. (1998).

Auf Grund der teilweise konträren Aussagen ist keine einheitliche Einflusstendenz erkennbar.

### 2.3 Elastisches Materialverhalten – Ausgewählte Modellansätze

In diesem Kapitel werden Modelle zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens ungebundener Tragschichtmaterialien vorgestellt. Exemplarische Beispiele repräsentieren die typischen Ansätze für Materialmodelle zur Berechnung des Elastizitätsmoduls  $M_R$  (resilient modulus). Einer der bekanntesten Ansätze ist das sogenannte K-  $\theta$  Modell, bei welchem sich der Elastizitätsmodul proportional zur mittleren Spannung verhält. Dieser Ansatz ist im „*AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures*“ verankert (basierend auf den Arbeiten von HICKS/MONISMITH (1971)). Der allgemeine Ansatz hierfür lautet

$$M_R(\theta) = K \cdot \theta^n \quad (2-1)$$

mit:

$\theta$                     Summe d. Hauptspannungen  
 K; n                Regressionskonstanten

Gleichmaßen bekannt ist der Ansatz nach UZAN (1985), welcher eine Erweiterung des K-  $\theta$  Modell darstellt.

$$M_R = K \cdot \theta^n \cdot \sigma_d^m \quad (2-2)$$

mit:

$\sigma_d$	Deviator Spannung
$\theta$	Summe d. Hauptspannungen
$K; n; m$	Regressionskonstanten

Ausgangspunkt für die Modellerweiterung ist die Überlegung, dass das Ursprungsmodell den Einfluss auftretender Scherspannungen auf das Elastizitätsmodul nicht ausreichend berücksichtigt CAR (2001).

In Zusammenarbeit mit Witczak wurde der Ansatz weiterentwickelt [in CAR (2001) aus UZAN/WITCZAK (1988)] und im Ergebnis zu nachfolgender Formulierung entwickelt.

$$M_R = k_1 \cdot Pa \cdot \left(\frac{I_1}{Pa}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} \quad (2-3)$$

mit:

$I_1$	1. Spannungsinvariante des Spannungstensors (Summe d. Hauptspannungen)
$\tau_{oct}$	Octaederscherspannung
$Pa$	Athmosphärendruck
$K_1; K_2; K_3$	Regressionskonstanten

An der Professur für Straßenbau der TU Dresden wurde ein Stoffmodell entwickelt, das die bekannten Nichtlinearitäten des E-Moduls und der Querdehnzahl berücksichtigt [WELLNER/QUEECK (1992)]. Der Modellentwicklung liegen unterschiedliche theoretische Annahmen zu Grunde. Im Rahmen der Versuchsauswertung wird auf die theoretischen Überlegungen und Formulierungen zur Elastizitätstheorie von LANDGRAF, G. (1963) zurückgegriffen. Auf Basis dieser allgemeinen kontaktmechanischen Formulierungen mit

$$\varepsilon_1 = L \cdot \sigma_1^{\frac{2}{3}} - M \cdot \sigma_3 \quad (2-4)$$

$$\varepsilon_3 = F \cdot \sigma_1 - G \cdot \sigma_3^{\frac{2}{3}} \quad (2-5)$$

sowie der Versuchsergebnisse aus Triaxialversuchen können die Koeffizienten L und M sowie F und G als materialabhängige Parameter berechnet werden. Die in der Formulierung festgelegten Spannungsexponenten resultieren aus der Ursprungsform der Exponentendarstellung mit  $1-\omega$  sowie der Annahme von  $\omega = 1/3$  basierend auf dem Spannungsexponent nach HERTZ (1882). Die Koeffizientenbestimmung wird dann eindeutig lösbar, wenn mindestens zwei Gleichungssysteme für jede Betrachtungsrichtung (axial bzw. radial) aufgestellt und gelöst werden. Zur Berechnung charakteristischer Materialkenngrö-

ben wird der Bezug zur Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Hook'schen Gesetzes hergestellt.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} \cdot (\sigma_1 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_3) \quad (2-6)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_3} \cdot (\sigma_3 - \mu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)) \quad (2-7)$$

Die strukturelle funktionale Gleichheit der Spannungs-Dehnungs-Ansätze wird zum Gleichsetzen und Auswerten der Versuchsergebnisse genutzt. Im Ergebnis dieser Betrachtung ergeben sich die Beziehungen zur Berechnung von Elastizitätsmodul und Querdehnzahl wie in Queck, U. (1992) ausführlich dargestellt.

$$E_R = \frac{\sigma_1^{\frac{1}{3}}}{L} \quad (2-8)$$

$$\mu_R = \frac{M \cdot \sigma_1^{\frac{1}{3}}}{2 \cdot L} \quad (2-9)$$

Für die einzelnen untersuchten Zellspannungen ergeben sich im Weiteren zugehörige Werte der Koeffizienten. Diese von der Radialspannung abhängigen Koeffizientenwerte können ebenfalls funktional beschrieben werden, wie bereits in den Arbeiten von Queck, U. (1992) und Gleitz, T. (1996) postuliert.

Der grundlegende Modellansatz für die spannungsabhängige Formulierung der Materialkennwerte geht auf die Überlegungen von EHLER, C. (1978) zurück. Hinsichtlich des Anspruches der Anwendbarkeit des Stoffgesetzes führt Queck, U. (1992) aus, dass  $E_0$  keine konstante Größe ist, sondern von der kleinen Hauptspannung abhängt.  $E_K$  wird in Anlehnung an die Annahmen von EHLER, C. (1978) zu kohäsiven Lockergesteinen als konstante Größe verwendet.

$$E_R = E_0 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{100}\right)^{0,33} + E_K \quad (2-10)$$

Die Spannungsabhängigkeit von  $E_0$  kann auf Grundlage der Versuchsergebnisse ebenfalls in einen funktionalen Zusammenhang gebracht werden. Im Ergebnis dieser Herangehensweise [Queck, U. (1992)] stellt sich der Berechnungsansatz für das Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl wie folgt dar:

$$E_R = (Q + C \cdot \sigma_3^{Q_1}) \cdot \sigma_1^{Q_2} + D \quad (2-11)$$

$$\mu_R = R \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_3} + A \cdot \sigma_3 + B \quad (2-12)$$

mit:

$E_R$	[kN/m <sup>2</sup> ]	E-Modul
$\mu_R$	[-]	Querdehnzahl (Indizierung „R“ für rechnerisch)
$\sigma_1$	[kN/m <sup>2</sup> ]	große Hauptspannung
$\sigma_3$	[kN/m <sup>2</sup> ]	kleine Hauptspannung
$Q$	[kN/m <sup>2</sup> ]	konstanter E-Modul Anteil $E_0$ -Funktion
$Q_1$	[-]	Exponent der kleinen Hauptspannung in der $E_0$ -Funktion
$Q_2$	[-]	Exponent der großen Hauptspannung in der E-Modulfunktion
$D$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Konstante Anteil in der E-Modulfunktion
$C$	[-]	Variable in der $E_0$ -Funktion)
$A$	[m <sup>2</sup> /kN]	Variable der Poissonzahlfunktion
$B$	[-]	Variable der Poissonzahlfunktion
$R$	[-]	Variable der Poissonzahlfunktion

Weitere Modelle zur Berechnung charakteristischer Materialkennwerte infolge der elastischen Materialantwort (vorrangig im Straßenbau verwendet) sind LEKARP et al. (2000/1) aufgeführt.

## 2.4 Plastisches Materialverhalten - Einflussgrößen

### 2.4.1 Spannungszustand

Unumstritten ist, dass der Spannungszustand einer der wesentlichsten Einflussgrößen auf das irreversible (und, wie bereits erläutert, auch auf das reversible) Verformungsverhalten ungebundener Gesteinskorngemische ist. Wie bereits in der Literaturrecherche zum elastischen Materialverhalten dargestellt, sind unterschiedlichste Postulate zum Einfluss des Spannungszustandes auf die plastische Materialantwort bereits in LEKARP et al. (2000/2) ausgewertet worden. Diese Auswertung wird nachfolgend auszugsweise wiedergegeben.

Anmerkung:

Ausführungen, welche aus LEKARP et al. (2000/2) entnommen wurden (ohne Auswertung der eigentlichen Ursprungsquelle), werden derart gekennzeichnet, dass zur Vollständigkeit auch die in LEKARP et al. (2000/2) verwendete Ursprungsquelle mit benannt wird. Bsp.: [in LEKARP et al. (2000/2) aus Ursprungsquellenangabe]

Schon in sehr frühen Postulaten wurde der Einfluss der Deviatorspannung auf die akkumulierten plastischen Dehnungen dargestellt, welche im direkten Zusammenhang stehen. Die Zellspannung steht hingegen im indirekten Zusammenhang zur akkumulierten Dehnung [in LEKARP et al. (2000/2) aus MORGAN (1996)]. Unterschiede zeigen sich

hinsichtlich der für die funktionalen Ansätze verwendeten Spannungskomponenten. Beispielsweise wird sowohl das Spannungsverhältnis aus Deviator- und Zellspannung [in LEKARP et al. (2000/2) aus Lashine et al. (1971)] als auch das Spannungsverhältnis der Invarianten  $q$  und  $p$  [PAPPIN, J. W. (1979)] verwendet. Postuliert wird auch von der Verwendung der Scherfestigkeit zur Beschreibung bleibender Dehnungen [in LEKARP et al. (2000/2) aus Raymond and Williams (1978); Pappin (1979); Thom (1988); Paute et al. (1996)]. Hierbei wird nach LEKARP et al. (2000/2) die statische Scherfestigkeit als Grenze der plastischen Dehnungen angesehen. Da der Versagensprozess von Gesteinskornmischen schrittweise und nicht „sofort“ eintritt, sind Scherfestigkeiten und Spannungsverhältnisse von untergeordnetem Interesse [in LEKARP et al. (2000/2) aus LEKARP/DAWSON (1998)].

### 2.4.2 Lastwechselzahl

Die Einflussgröße Lastwechselzahl kann ebenfalls als wesentliche Größe angesehen werden. Prinzipiell einheitlich ist der Kenntnisstand darüber, dass eine plastische Dehnungsakkumulation bei wiederholter Belastung vorliegt. Zum Verlauf der plastischen Dehnungsakkumulation existieren äußerst viele Postulate. Beispielhaft wird in Abbildung 2-10 unter Bezug auf BARKSDALE (1972) gezeigt, wie der irreversible Dehnungszuwachs (in halblogarithmischer Darstellung) verläuft. BARKSDALE (1972) postulierte lineare

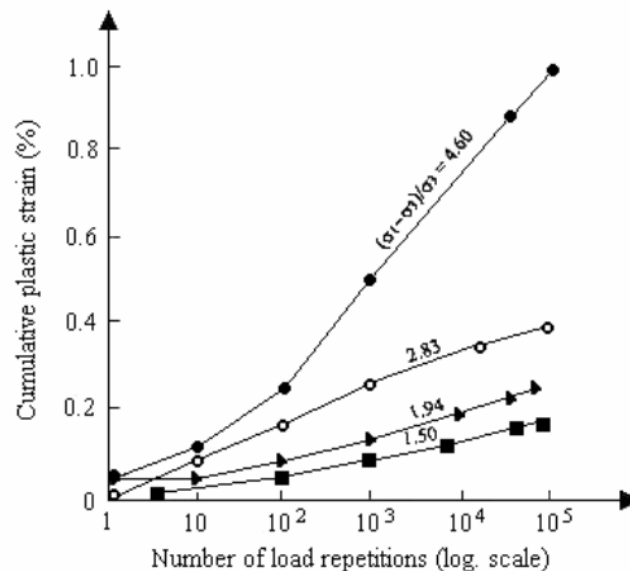


Abbildung 2-10: Einfluss der Lastwechselzahl und des Spannungsverhältnisses auf die plastische Dehnung [BARKSDALE (1972)]

Akkumulation bei logarithmisch zunehmender Zyklenzahl. Gleichermäßen wurde ausgeführt, dass für sehr kleine Deviatorspannungen die plastische Dehnungsrate mit



steigender Lastwechselzahl abnimmt. Beim Überschreiten einer bestimmten Schwelle der Deviatorspannung, erfährt die plastische Dehnungsrate einen progressiven Zuwachs.

PAUTE et al. (1993) folgern nach Ihren Untersuchungen, dass die plastische Dehnungsrate bei wiederholter Belastung konstant zunimmt, wenn es möglich ist ein Beanspruchungslimit für die Akkumulation zu definieren. Sehr ähnlich ist die Argumentation in den Ausführungen von LEKARP/DAWSON (1998). KOLISOJA (1998) postulierte nach seinen Untersuchungen, dass Materialproben, die sich bei zu 80.000 Lastwiederholungen stabilisiert haben, bei weiterer zyklischer Beanspruchung einen progressiven Dehnungszuwachs aufwiesen.

Werden Gesteinskornmische zyklisch beansprucht, wird zur Beschreibung des Langzeitverhaltens häufig Bezug auf die sogenannte „*Shakedown Theorie*“ genommen, welche nachfolgend kurz erläutert wird.

Die Shakedown Theorie war bereits in den Werkstoffwissenschaften bekannt und angewandt, als diese Anwendung im konstruktiven Straßenbau, insbesondere bei der Beschreibung des Materialverhaltens ungebundener Baustoffe, fand. Die ersten Postulate hierzu gehen auf die Arbeiten von SHARP, R. W./BOOKER, J. R. (1984) zurück.

In COLLINS, I. F. et al. (2000) wird das mögliche Materialantverhalten elastisch-plastischer Strukturen bei wiederholter Beanspruchung erläutert. Hierbei wird ausgeführt, dass aus einer ausreichend kleinen Beanspruchung des Materials „reine“ Elastizität (ohne irreversibles Dehnungsverhalten) resultiert. Folglich kehrt das Material nach der Belastung vollständig in die Ursprungskonfiguration zurück. Wird ein elastisches Limit überschritten, treten bei jedem Belastungszyklus sowohl elastische als auch plastische Dehnungsanteile auf, und die Materialantwort ändert sich fortlaufend. Nach COLLINS, I. F. et al. (2000) existieren drei Gründe für diesen Effekt:

- Infolge der Belastung einer Struktur werden Eigenspannungen induziert, so dass das induzierte Gesamtspannungsfeld infolge einer Zweitbelastung die Summe der Eigenspannungen und der aufgebrachten Last ist.
- Wechselnde Materialeigenschaften (Verfestigung/Entfestigung)
- Änderungen der Geometrie der Oberfläche, resultierend aus den irreversiblen Dehnungen. Die Belastungsverteilung unterscheidet sich bei einer zweiten Belastung, was für Straßenbefestigungen üblich ist, beispielsweise dann, wenn sich eine Spurrinne ausbildet.

Bei Überschreitung des elastischen Limits kann das Material drei unterschiedliche Materialantworten hinsichtlich des Langzeitverhaltens in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand geben COLLINS, I. F. et al. (2000). Nach einer endlichen Anzahl von Belastungen sind der Aufbau der Eigenspannungen sowie die Änderung des Materialverhaltens abgeschlossen. Folglich ist die Materialantwort „rein elastisch“. Tritt dieser Fall ein, spricht man von einem „Shakedown“. Liegen größere Materialbeanspruchungen vor, wird ein Shakedown nicht mehr erreicht, so dass entweder die irreversiblen Dehnungen in einen geschlossenen Zyklus („zyklische oder alternierende Plastizität genannt“) übergehen oder unbestimmt ansteigen (bezeichnet als „ratchetting“). Werden die beiden letztgenannten Phänomene erreicht, versagt die Struktur (Abbildung 2-1). Für Straßenkonstruktionen werden nach COLLINS, I. F. et al. (2000) der Zustand „elastisch“ und „elastischer Shakedown“ als sehr wichtig erachtet, während die restlichen Zustände sekundären Charakter aufweisen und vernachlässigbar sind.

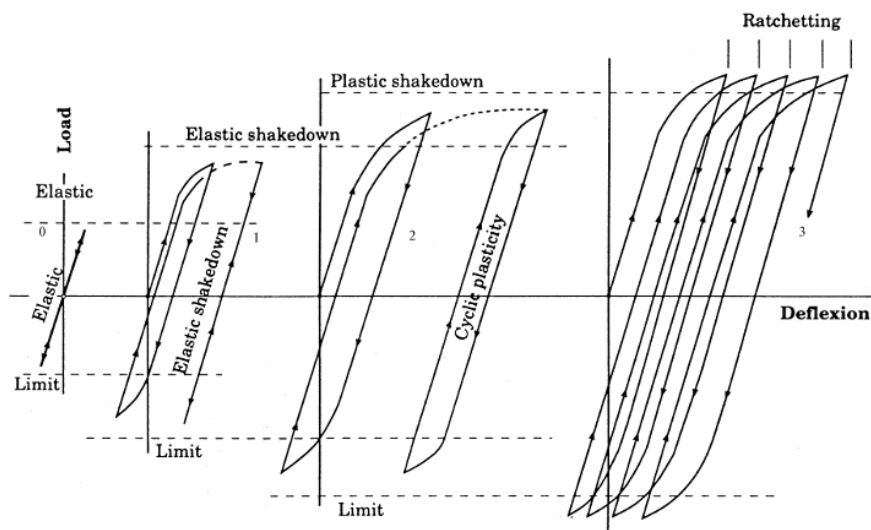


Abbildung 2-11: Materialantwortverhalten elastisch-plastischer Strukturen infolge zyklischer Belastung [Collins, I. F. (2000)]

In der Bodenmechanik wird das „ratcheting“ als zyklisches Kriechen bezeichnet. Grundsätzlich wird hierbei unter Ratcheting die Akkumulation plastischer Dehnungen unter zyklischer Belastung verstanden [LESNY, K./RICHWIEN, W. (2004)]. Da die Akkumulationsausprägung unterschiedlich ist, wird zwischen dem sogenannten „schrittweisen Versagen“ und der „Beruhigung“ differenziert. Schrittweises Versagen führt zur proportionalen oder überproportionalen Zunahme der plastischen Dehnungen mit zunehmender Lastwechselzahl, woraus ein Versagen der Struktur resultiert [LESNY, K./RICHWIEN, W. (2004)]. Unter „Beruhigung“ wird die unterproportionale plastische Dehnungszunahme verstanden, bei welcher ebenfalls Versagen auftreten kann – durch Verlust der Gebrauchstauglichkeit. Der „Shakedown“ tritt ein, wenn die plastische Formänderung nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln nicht weiter ansteigt. Nach LESNY, K./

RICHWIEN, W. (2004) ist dieses Phänomen weniger bei Böden und eher bei Metallen vorzufinden. Die daraus resultierende Materialantwort ist, wie bereits erläutert, eine rein elastische oder alternierend plastische, woraus Ermüdung des Materials resultieren kann [LESNY, K./RICHWIEN, W. (2004)].

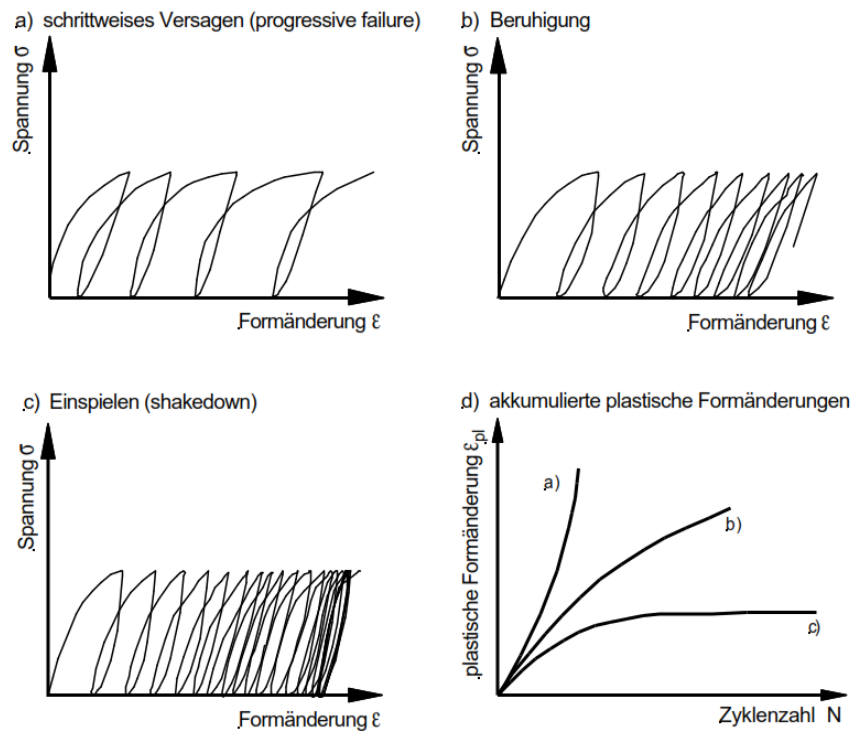


Abbildung 2-12: Formen des „ratchetings“ [LESNY, K./RICHWIEN, W. (2004)]

Bleibt bei zunehmender Lastwechselzahl die plastische Dehnungsrate nahezu konstant bzw. steigt weiter an, nehmen zwangsläufig die kumulierten Dehnungen stetig zu. Dieser Zustand wird auch als zyklisch instabil definiert [GOTSCHOL, A. (2002)].

Dass bei degressiver Akkumulation plastischer Dehnungen und einer hinreichend großer Lastwechselzahl keine plastischen Dehnungszinkremente mehr hinzukommen, ist nach GOTSCHOL, A. (2002) allerdings als theoretisches Szenario zu bewerten, da in zyklisch beanspruchten Gesteinskörnungsmischen ein vollständiges Abklingen plastischer Dehnungsanteile sowohl im Versuch als auch in situ nicht stattfindet.

*Aus diesem Teil der Literaturrecherche kann geschlossen werden, dass zyklisches Versagen bei Verkehrsanlagen grundsätzlich zu vermeiden ist. Zyklisches Kriechen (unabhängig davon, ob alternierend plastisch oder überproportional plastisch) ist im Hinblick auf den Konstruktionsaufbau und die Materialeigenschaften (beispielsweise Schichtenaufbau, Schichtdicken, Schichtsteifigkeiten) sowie gegebene Randbedingungen (Temperaturverteilung in der Konstruktion oder Belastungssituation) nicht grundsätzlich*

*auszuschließen, jedoch im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit innerhalb des geplanten Nutzungszeitraumes zu begrenzen.*

Zur Abgrenzung und Modellierung der unterschiedlichen Akkumulationsverläufe sind in der Literatur verschiedene Ansätze zu finden. An dieser Stelle werden nur exemplarische einzelne Arbeiten genannt, um die möglichen Herangehensweisen aufzuzeigen.

Aus dem vielfach postulierten Zusammenhang zwischen akkumulierter plastischer Dehnung und Beanspruchungszustand konnte die Existenz eines kritischen Spannungsniveaus vermutet werden, welches stabile von instabilen Materialzuständen abgrenzt, spricht von einer Beruhigung oder einem möglichen Versagen [in LEKARP, F./DAWSON, A. (1998) aus CHAN, F. W. K. (1990); MORGAN, J. R. (1966); DUNLAP, W. A. (1966); SHARP, R. W./BOOKER, J. R. (1984) und andere]. WERKMEISTER (2003) wählte in ihren Untersuchungen einen Potenzansatz, bei dem zur Abgrenzung der Akkumulationsverläufe die zulässige Axialspannung als Funktion des Spannungsverhältnisses (aus Axial- und Radialspannung) verwendet wird. Des Weiteren wird vorgeschlagen, dass durch derartige Spannungsbegrenzungen die Spurrinnenbildung in den ungebundenen Tragschichten begrenzt wird oder Materialien hinsichtlich ihrer lastwechselzahlabhängigen Akkumulationsverläufe vergleichend bewertet werden.

Durchaus üblich zur Beschreibung von elastisch-plastischem Materialverhalten sind Modellvorstellungen, durch welche elastische Verformungen von plastischen Verformungen getrennt werden. Im Hauptspannungsraum werden zur Abgrenzung der jeweiligen Beanspruchungszustände Fließflächen verwendet (vgl. Kapitel 3).

Nach COLLINS, I. F. et al. (2000) können die Grenztheoreme so verstanden werden, dass ein unteres und ein oberes Grenztheorem existiert. Das untere Grenztheorem besagt, dass die Bedingungen für Shakedown dann vorliegen, wenn ein zeitunabhängiges, ausgewogenes Eigenspannungsfeld vorliegt bzw. begründet werden kann, das zusammen mit dem elastischen Spannungsfeld ein kombiniertes Spannungsfeld ergibt, welches an keiner Stelle und zu keiner Zeit die Fließfläche verletzt. Das obere Grenztheorem für Shakedown kann durch ein virtuelles Geschwindigkeitsfeld erreicht werden, welches das Feld der Dehnungsraten mit dem Spannungsfeld verknüpft.

Charakteristische, für ungebundene Materialien verwendete Fließflächenformen können beispielsweise das Drucker-Prager Model (in FUSAO, O./SAYURI, K. (2012) mit Verweis auf DI MAGGIO/SANDLER (1970)) oder das Mohr-Coulomb-Kriterium (Shakedown-Theorie mit integriertem Mohr-Coulomb-Kriterium) GHADIMI et al. (2014) sein.

### 2.4.3 Belastungsgeschichte

Zur Belastungsgeschichte sind in der Literatur vergleichsweise wenige Postulate zu finden. HICKS (1970) berichtete, dass der Einfluss der Spannungsgeschichte meist beseitigt ist und eine stabile, elastische Materialantwort nach etwa 100 Lastwechseln bei gleicher Spannungsamplitude vorliegt. ALLEN (1973) empfiehlt eine Probenkonditionierung von etwa 1.000 Lastwechseln für die Untersuchung des elastischen Materialverhaltens. In Labortests zur Untersuchung des irreversiblen Verformungsverhaltens ist der Effekt der Spannungsgeschichte üblicherweise damit ausgeschlossen, indem für jeden Spannungspfad eine neue Probe verwendet wird [LEKARP et al. (2000/2)].

Die Belastungsgeschichte für Straßenbaumaterialien ist aus verschiedenen Gründen schwierig einzuschätzen. Die Laborproben sollen üblicherweise den Einbauzustand repräsentieren. Dieser muss den geltenden Vorschriften der ZTV Sob-STB entsprechen und wird nach der Herstellung der jeweiligen Schichten in situ geprüft. Bis zur fertig hergestellten Verkehrsanlage unterliegen das ungebundene Material bzw. die ungebundenen Konstruktionsschichten unterschiedlichsten Beanspruchungen, deren Größe und Auftrenshäufigkeit nahezu unbekannt sind, so dass der tatsächliche Materialzustand zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe nicht bekannt ist. Auf diese Problematik wird im späteren Untersuchungsprogramm noch näher eingegangen.

### 2.4.4 Dichte

Der Einfluss der Dichte auf das Langzeitverhalten ungebundener Gesteinskornmische wurde vielfach postuliert. Hierbei wurde der Widerstand gegen bleibende Verformungen mit einem Anstieg der Dichte (Lagerungsdichte) festgestellt in LEKARP et al. (2000/2 aus BARSDALE (1972)/ALLEN (1973)]. Unter Bezug auf ALLEN (1973) wird von einer Reduzierung der plastischen Gesamtdehnung um 80 % bei gebrochenem Kalkstein und um 22 % bei Kies berichtet, bei einer Dichteabnahme von der Proctordichte auf die modifizierte Proctordichte. Auch wurde berichtet, dass die Verringerung der plastischen Dehnung aufgrund erhöhter Dichte bei kantigen Gesteinen besonders groß ist; vorausgesetzt, Porenwasserdrücke existieren nicht bzw. vergrößern sich nicht infolge wiederholter Belastung. Bei Rundkornmischen jedoch ist die Abnahme der plastischen Dehnung mit zunehmender Dichte nicht signifikant, da diese Materialien eine höhere relative Dichte (Ausgangsdichte) als kantige Materialien bei gleicher Verdichtungsleistung besitzen [in LEKARP et al. (2000/2 aus HOLUBEC (1969)].

In der Bodenmechanik wird die Porenzahl bzw. die Porosität als wichtigster Materialparameter nichtbindiger Böden und Schotter angesehen [GOTSCHOL, A./KEMPFERT,

H. G. (2004)]. Genannte Autoren führen weiter an, dass mit abnehmender Porenzahl, d. h. mit zunehmender Lagerungsdichte, die plastischen Dehnungen unter gleichen Randbedingungen abnehmen. Weiter berichten die Autoren von einem lastwechselzahlabhängigen Verlauf der Porenzahl. Unabhängig von der Einbaudichte wurde zuerst eine Zunahme der Porenzahl, d. h. dilatantes Materialverhalten beobachtet.  $N_{\text{Krit}}$  lag hierbei zwischen 1 und 100. Nach dem Erreichen der kritischen Lastwechselzahl folgte bei zyklisch-dynamischer Beanspruchung eine Verdichtung der Probe, d. h. Kontraktanz (Abbildung 2-13). Die maximale Porenzahl bei  $N_{\text{Krit}}$  wurde hierbei mit Bezug auf den statischen Triaxialversuch als Pseudokritische Porenzahl  $e_{\text{ps,krit}}$  bezeichnet.

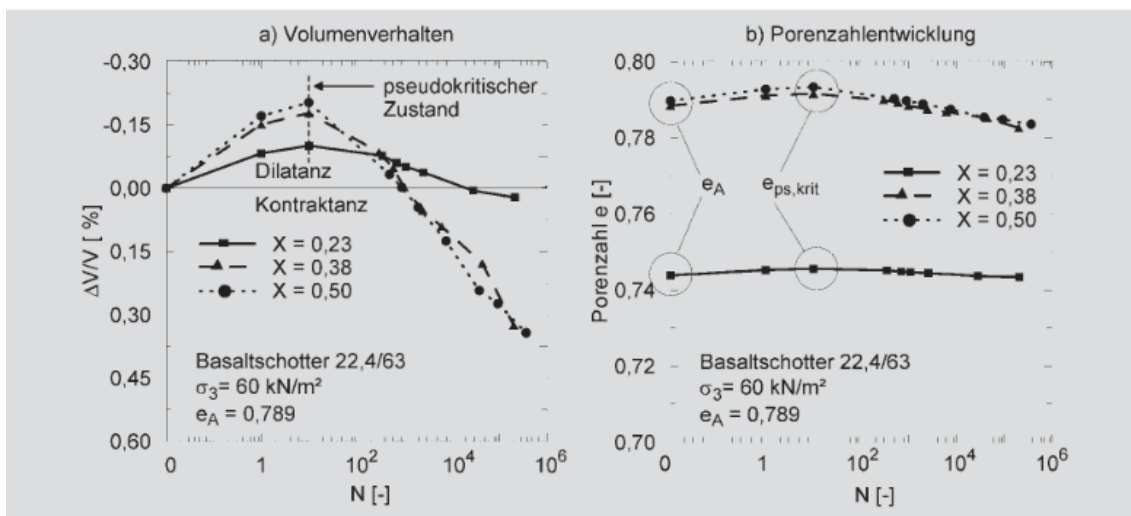


Abbildung 2-13: Volumen und Porenzahlentwicklung zyklisch-dynamisch beanspruchter Gleisschotterproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen [GOTSCHOL, A./KEMPFERT, H. G. (2004)]

#### 2.4.5 Wassergehalt

Der Wassergehalt im Gesteinskornmisch kann das plastische Verformungsverhalten erheblich beeinflussen. Hohe Sättigungsgrade und eingeschränkte Drainage führen zu hohem Porendruck, geringer effektiver Spannung und infolgedessen zu geringer Steifigkeit und zu einem geringen Verformungswiderstand [in LEKARP et al. (2000/2 aus HAYNER/YODER (1963); BARKSDALE (1972); MAREE et al. (1982); THOM/BROWN (1987); DAWSON et al. 1996)]. Postuliert wird desweiteren, dass bereits geringfügige Erhöhungen des Wassergehaltes deutlich erhöhte plastische Dehnungen mit sich bringen können. Eine deutliche Zunahme der plastischen Dehnungen kann selbst dann auftreten, wenn keine maßgebliche Entwicklung von Porendrücken existent ist, ursächlich begründet durch den zu vermutenden „Schmierwirkungseffekt“ von Wasser im Gemisch [in LEKARP et al. (2000/2 aus THOM/BROWN (1987)].

Nach KOLISOJA (1997) kann die Entwicklung von Porenwasserüberdruck in granularen Materialien durch Verformungen und Umlagerungen des Gesteinskornskelettes erklärt

werden, wenn es äußeren Kräften ausgesetzt ist. Im Ergebnis dessen nimmt das Porenvolumen ab. Geringe Permeabilität des Materials und eine große Belastungsgeschwindigkeit führen dazu, dass das Porenwasser nicht schnell genug entweichen kann und dass, daraus resultierend, große Porendrücke entstehen können. Beispielhaft für den Einfluss der Dränagefähigkeit sei an dieser Stelle auf Abbildung 2-14 verwiesen.

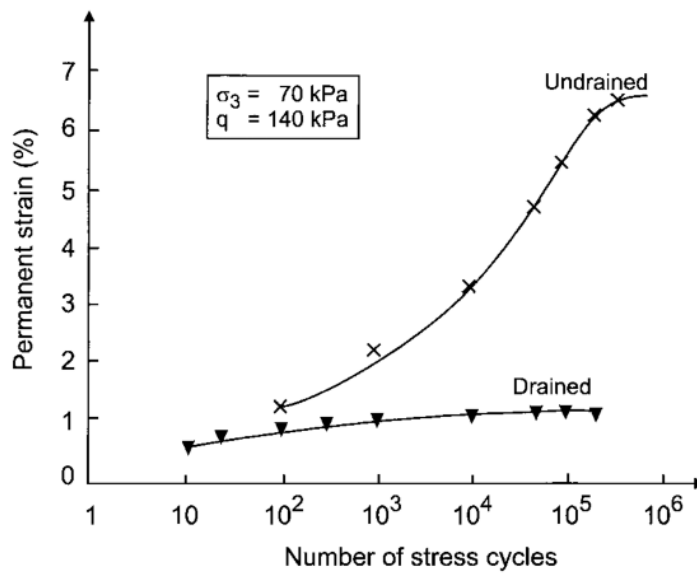


Abbildung 2-14: Einfluss der Dränagewirkung auf die bleibende Dehnungsentwicklung [DAWSON (1990)]

#### 2.4.6 Frequenz

Zum Einfluss einer möglichen Abhängigkeit der plastischen Deformationen von der Belastungsfrequenz liegen vergleichsweise wenige Veröffentlichungen vor. Beispielsweise untersuchte YOUNG (1992) Sandproben zyklisch am Schergerät und stellte im Ergebnis keinen Einfluss der Frequenz im Bereich zwischen 0,3 Hz und 2 Hz auf die bleibenden Dehnungen fest (Abbildung 2-15).

In GOTSCHOL (2002) wird im Rahmen der durchgeführten Literaturstudie auf die Arbeiten von SHENTON, M. J. (1978) und KEMPFERT, H. G. et al. (2000) verwiesen. Während SHENTON, M. J. (1978), welche die Belastungsfrequenz zwischen 0,1 Hz und 30 Hz variierte, keinen Einfluss der Frequenz auf die Verformungsentwicklung nachweisen konnte, kamen KEMPFERT, H. G. et al. (2000) zu dem Ergebnis, dass die Frequenz für das plastische Langzeitverhalten von nicht zu vernachlässigender Bedeutung ist [in GOTSCHOL (2002) aus SHENTON, M. J. (1978); KEMPFERT, H. G. et al. (2000)].

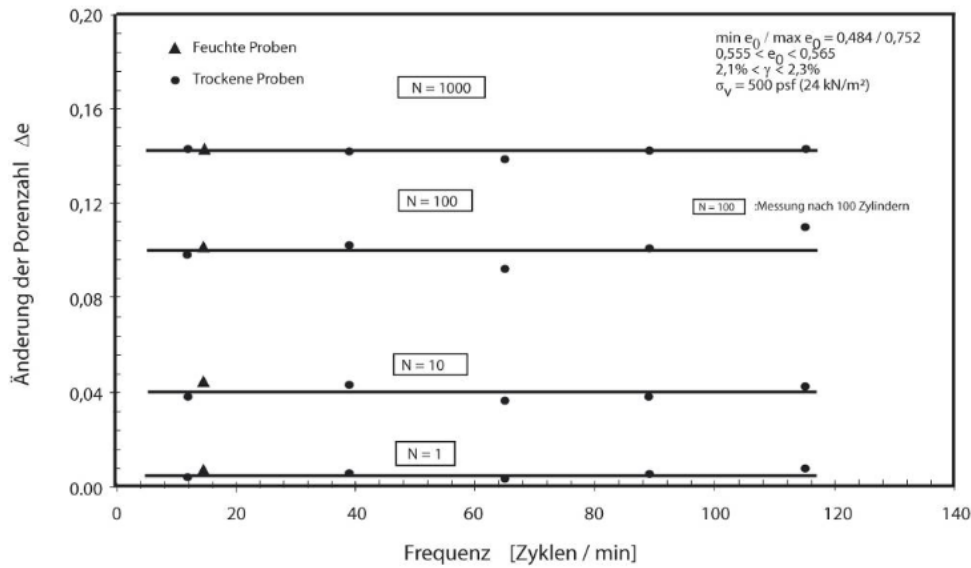


Abbildung 2-15: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Dehnungsakkumulation [YOUD (1992)]

Im Ergebnis seiner eigenen Untersuchungen kommt GOTSCHOL (2002) zu dem Ergebnis, dass eine von der Frequenz abhängige Dehnungsakkumulation existiert. GOTSCHOL (2002) zeigt, dass bei steigender Frequenz und sonst identischen Versuchsrandbedingungen ein Anstieg der bleibenden Dehnungsanteile vorliegt. Begründet wird dies mit der Herabsetzung der Reibungskräfte zwischen den Schotterkörnern (Abbildung 2-16). Mit zunehmender Lastwechselzahl flacht der Kurvenanstieg ab (Abbildung 2-17), d. h. die plastischen Dehnungsinkremente sind bei größeren Frequenzen geringer.

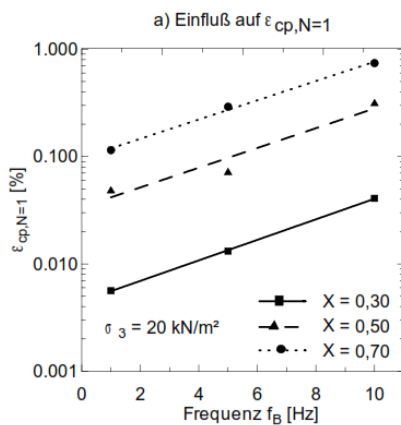


Abbildung 2-16: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die die bleibende Dehnungsanteile [GOTSCHOL(2002)]

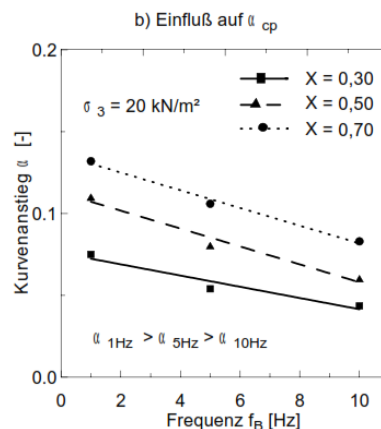


Abbildung 2-17: Einfluss der Belastungsfrequenz auf den Kurvenanstieg [GOTSCHOL (2002)]

#### 2.4.7 Weitere Einflussgrößen



Unterschiedlich abgestufte Gesteinskorngemische (gebrochener Kalkstein) untersuchten beispielsweise Thom und Brown (1988) mittels triaxialen Dauerbelastungsversuchen [in LEKARP et al. (2000/2 aus THOM/BROWN (1987)]. Sie postulierten, dass bei unverdichteten Proben eine gleichmäßige Sieblinie im Ergebnis zu den geringsten plastischen Dehnungen führt. Andere Forscher berichten davon, dass die Sieblinie von größerer Bedeutung auf die bleibenden Verformungen ist als der Verdichtungsgrad [in LEKARP et al. (2000/2 aus DAWSON et al. (1996)]. Mehrfach wird berichtet, dass ein Anstieg des Feinkornanteils zur Zunahme der plastischen Deformationen in Triaxialversuchen führt [in ARNOLD et al. (2007) aus BARKSDALE (1972)/(1991); THOM/BROWN (1988)]. DODDS et al. (1999) postulierten maximale Deformationen bei einem Feinkornanteil von 10 %. Hierbei wurde beobachtet, dass sich Porendrücke entwickelten und dadurch die effektive Spannung reduziert wurde [in ARNOLD et al. (2007) aus DODDS et al. (1999)].

## 2.5 Plastisches Materialverhalten – Ausgewählte Modellansätze

Gesteinskorngemische antworten auf mechanische Beanspruchung mit Dehnungsreaktionen, welche reversible (elastische) und gleichermaßen irreversible (plastische) Inkremente beinhalten. Dies führt dazu, dass wiederholte mechanische Beanspruchung zur Akkumulation plastischer Dehnungsinkremente führt. Deshalb muss das hierbei im Vordergrund stehende Langzeitverhalten erfasst und beschrieben werden, um mögliche zu erwartende Gesamtverformungen innerhalb der Straßenbefestigung und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem prognostizieren zu können. Untersuchungen zum plastischen Verformungsverhalten sind in der Literatur sehr umfangreich vorzufinden. An dieser Stelle werden ausgewählte Untersuchungen bzw. Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Explizit wird hierbei Bezug auf Untersuchungen genommen, bei welchen nichtbindige Böden oder Gesteinskorngemische für Straßen oder Bahnbau analysiert wurden.

Sehr häufig wird in der Fachliteratur auf typische Ansätze verwiesen, welche die akkumulierten plastischen Dehnungen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl beschreiben. Ein typisches Beispiel hierfür ist der Modellansatz von BARKSDALE, R.D. (1972).

$$\varepsilon_{1,p} = a + b \cdot \log(N) \quad (2-13)$$

mit:

$\varepsilon_{1,p}$	plastische Gesamtdehnung in axialer Richtung
N	Lastwechselzahl
A; b	Konstanten

Ähnliche Ansätze sind in folgender Form zu finden [in LEKARP, F./DAWSON, A. (1998) aus PAUTE et al. (1988)].

$$\varepsilon_{1,p}^* = \frac{A \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{N} \cdot D} \quad (2-14)$$

mit:

$\varepsilon_{1,p}^*$             plastische Gesamtdehnung in axialer Richtung  
 (nach den ersten 100 Lastwechsel)  
 N                 Lastwechselzahl  
 A; D             Konstanten (Regressionsparameter)

Ein zweiter Ansatz von PAUTE et al. (1988) im Ergebnis einer zusätzlichen Studie zum Verformungsverhalten ungebundener Materialien stellt sich in nachfolgender Form dar [in LEKARP, F./DAWSON, A. (1998) aus PAUTE et al. (1996)].

$$\varepsilon_{1,p}^* = A \cdot \left( 1 - \left( \frac{N}{100} \right)^{-B} \right) \quad (2-15)$$

mit:

$\varepsilon_{1,p}^*$             plastische Gesamtdehnung in axialer Richtung  
 (nach den ersten 100 Lastwechsel)  
 N                 Lastwechselzahl  
 A; B             Konstanten (Regressionsparameter)

Neben den Ansätzen, welche die Lastwechselzahl als variable Eingangsgröße verwenden, existieren gleichermaßen verschiedenen Modellansätze zur Berücksichtigung der Spannungsbedingungen.

WERKMEISTER (2003) untersuchte unter anderem Charakterisierungsmöglichkeiten zur Beschreibung des plastischen Langzeitverhaltens. Hierbei wird die plastische axiale Verformungsakkumulation unter „stabilen“ Verformungsbedingungen beschrieben. Die Spannungsabhängigkeit des Verformungsverhaltens ist in den Materialparametern A und B berücksichtigt.

$$\varepsilon_p(N) = A \cdot \left( \frac{N}{1000} \right)^B \quad (2-16)$$

mit:

$\varepsilon_p(N)$             akkumulierte plastische Dehnung nach N Lastwechseln  
 A, B             Materialparameter

N Lastwechselzahl

Ein sehr vereinfachter Ansatz wird in LEKARP et al. (2000/2) aus LASHINE (1971) vorgestellt, welcher davon ausgeht, dass die plastischen Axialdehnungen nach 20.000 Lastwechseln eine konstante Größe erreicht haben, woraus folgende Formulierung resultiert:

$$\varepsilon_{1,p} = 0,9 \cdot \frac{q}{\sigma_3} \quad (2-17)$$

mit:

$\varepsilon_{1,p}$  plastische Gesamtdehnung in axialer Richtung  
 $q$  Deviatorspannung  
 $\sigma_3$  Zellspannung

In BRECCIAROLI/KOLISOJA (2006) werden umfangreich Beispiele für die Modellierung der akkumulierten irreversiblen Dehnungsverläufe vorgestellt. Unter anderem wird der Einfluss des Beanspruchungszustandes auf das plastische Verformungsverhalten durch BARKSDALE, R. D. (1972) vorgestellt. Hierzu wird berichtet, dass der hyperbolische Ansatz auf der Arbeit von DUNCAN/CHANG (1970) basiert, welche statische Triaxialtests durchgeführt haben, der für zyklische Versuche angepasst wurde.

$$\varepsilon_a = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) / (K \cdot \sigma_3^n)}{1 - \left[ \frac{R_f \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \cdot (C \cdot \cos \varphi + \sigma_3 \cdot \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \right]} \quad (2-18)$$

mit:

$\varepsilon_a$  plastische Gesamtdehnung in axialer Richtung  
 $K; n$  Parameter (funkt. Zusammenhang zur Formulierung des Tangentenmoduls als Funktion der kleinen Hauptspannung)  
 $\sigma_1$  große Hauptspannung  
 $\sigma_3$  kleine Hauptspannung  
 $\sigma_1 - \sigma_3$  Deviatorspannung  
 $C$  Kohäsion  
 $\varphi$  innerer Reibungswinkel  
 $R_f$  Konstante (im Zusammenhang der Druckfestigkeit und einer asymptotischen Spannungsdifferenz)

Die Funktionsverläufe sind für unterschiedliche kleine Hauptspannungen in Abbildung 2-18 dargestellt.

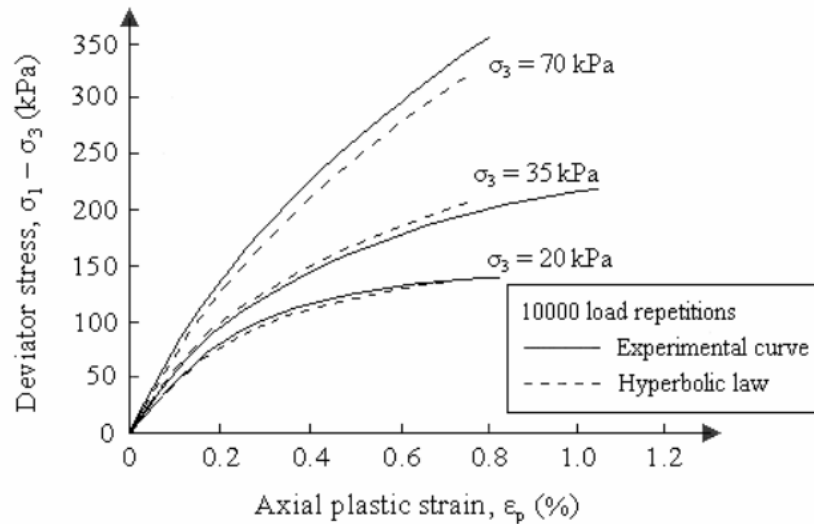


Abbildung 2-18: Vergleich zwischen den berechneten hyperbolischen plastischen Dehnungs-Spannungskurven und den Versuchsdaten [aus BRECCIAROLI/KOLISOJA (2006) in BARKSDALE, R. D. (1972)]

Bekannt sind auch theoretische Ansätze, bei welchen elastische und plastische Dehnungen funktional miteinander verknüpft wurden. Nachfolgend beispielhaft dargestellt [aus WANG/MASAD (2007) in TSENG/LYTTON (1989)].

$$\frac{\epsilon_p(N)}{\epsilon_r} = \beta_{r1} \cdot \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad (2-19)$$

mit:

$\epsilon_r$             elastische Dehnung  
 $\beta_{r1}$             Kalibrierfaktor  
 $\epsilon_0$ ;  $\beta$ ;  $\rho$     Materialparameter

LEKARP, F./DAWSON, A. (1998) postulieren einen möglichen Zusammenhang zwischen den akkumulierten plastischen Dehnungen, der Spannungspfadlänge und dem maximalen Scherspannungsverhältnis, ausgedrückt in der Form:

$$\frac{\epsilon_{1,p}(N_{ref})}{\frac{L}{p_0}} = a \cdot \left( \frac{q}{p} \right)_{\max}^b \quad (2-20)$$

mit:

$\epsilon_{1,p}(N_{ref})$     akkumulierte plastische Axialdehnung zur Lastwechselzahl  $N_{ref}$   
 ( $N_{ref} > 100$ )  
 L                Spannungspfadlänge  
 q                Deviatorspannung  
 p                mittlere Normalspannung

$p_0$	Referenzspannung (1kPa)
$(q/p)_{\max}$	maximales Spannungsverhältnis
a; b	Regressionsparameter

In den Untersuchungen war deutlich festzustellen, dass die plastischen Dehnungen mit steigendem Scherspannungsverhältnis ansteigen. Argumentiert wurde, dass bei einem konstantes Scherspannungsverhältnis und zunehmender Spannungspfadlänge die plastischen Dehnungen ansteigen, da mehr Energie infolge der Be- und Entlastungszyklen dissipiert wird.

### 2.6 Grundlagen der Phänomene des Gefrier- und Tauprozesses von Wasser sowie Wasser in Gesteinskornmischungen

Wird ausschließlich das Gesteinskorn (ofentrockener Zustand) betrachtet, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Temperatur, speziell im Gebrauchstemperaturbereich einer Straßenkonstruktion, vernachlässigbar ist. Folglich kann von Temperaturunabhängigkeit ausgegangen werden.

In Schichten ohne Bindemittel in Straßenverkehrsanlagen existiert auch bei darüber angeordneten wasserdichten Decken und fachgerechten Entwässerungsmaßnahmen grundsätzlich Wasser im Gefüge. Temperaturunabhängigkeit ist dann jedoch nicht mehr gegeben, da sich sowohl das mechanische als auch das thermische Materialverhalten bei Temperaturen  $> 0^\circ\text{C}$  und  $\leq 0^\circ\text{C}$  unterscheiden.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Einfluss von Wasser in SoB auf das mechanische Verformungsverhalten erläutert. In den nachfolgenden Kapiteln wird nochmals auf das Wasser in der Straßenkonstruktion eingegangen, um grundlegende chemisch-physikalische Zusammenhänge näher zu beleuchten.

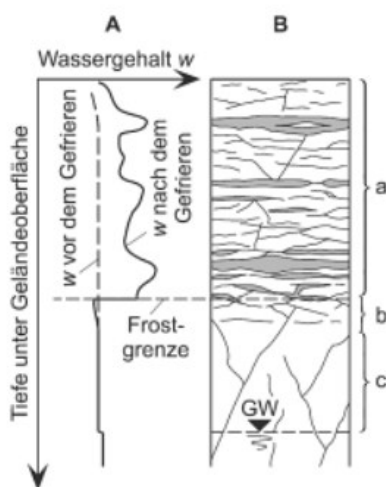
#### 2.6.1 Wasser in Straßenkonstruktionen

Aus der Perspektive des konstruktiven Straßenbaus ist Wasser in SoB nach verschiedenen Gesichtspunkten zu beurteilen. Ein vergleichsweise hoher Wassergehalt wird gezielt beim Einbau des Materials angestrebt, um bei optimalem Wassergehalt (Proctorwassergehalt) eine möglichst maximale Lagerungsdichte zu erhalten. Aufgrund der Anforderungen an das Material (TL SoB-StB) sowie die Herstellung der Schichten nach den anerkannten Regeln der Technik (ZTV SoB-StB) sollte grundsätzlich eine ausreichende und dauerhafte Dränage erreicht werden. Der Wassergehalt in Straßenkonstruktionen ist keine konstante

Größe, sondern unterliegt aus verschiedensten Gründen unterschiedlich starken Schwankungen. Änderungen des Wassergehaltes verändern bekanntermaßen (vgl. Kapitel 2.2 und 2.4) das mechanische Verformungsverhalten der Gesteinskornmische. Dieser Effekt findet derzeit weder im Rahmen der konventionellen Schichtdickenfestlegung von Straßenkonstruktionen nach den RStO noch bei der rechnerischen Dimensionierung von Straßenkonstruktionen nach den RDO Berücksichtigung.

Schädigende Wirkungen können bei hohen Wassergehalten (Wassergehalt oberhalb des Proctorwassergehaltes) erwartet werden, infolge lokaler Porenwasserdrücke und daraus resultierender Instabilität des Korngerüsts. Auch können Schädigungen der Straßenkonstruktion dann erwartet werden, wenn Frost- und Tauprozesse vorherrschen und keine ausreichende Frostsicherheit vorliegt.

Bodenfrost bei bindigen Böden und damit großer Kapillarwirkung führt dazu, dass Wasser aus der Umgebung (Grundwasser bzw. versickerndes Oberflächenwasser) angesaugt wird. Durch das Ansaugen des Wassers in die Frostzone können Eislinsen oder Eisbänder entstehen, wobei deren Größe vom Wassernachschub abhängig ist. Die Konsequenz dessen können Hebungen sein, welche Schäden an Baukonstruktionen verursachen können. Bei Böden mit geringer Kapillarwirkung bleibt der Wassergehalt in der Frostzone konstant. Die Oberflächenwasserschicht der Körner gefriert und dehnt sich bei absinkenden Temperaturen in den Porenraum aus [MÖLLER, G. (2013)]. Da SoB in Straßenkonstruktionen eine abgestufte KGV sowie einen begrenzten Feinkornanteil und definierte Ungleichförmigkeit aufweisen, entstehen derartige Effekte innerhalb dieser Schichten nicht. Um den erläuterten Bodenfrost, d. h. das Gefrieren von Schichten unterhalb des Planums zu verhindern bzw. zu begrenzen ist der frostsichere Oberbau von Verkehrsflächen ausreichend stark zu dimensionieren.



A Linie des Wassergehaltes der Schichten a, b, c vor und nach dem Gefrieren

B Querschnitt durch den Frostboden (von Rissen durchzogener Ton)

a Boden oberhalb der Frostgrenze (mit Eislinsen und Eisbändern)

b Übergangsbereich mit reduziertem Wassergehalt unterhalb der Frosttiefe

c Boden mit unverändertem Wassergehalt unterhalb der Frosttiefe

Abbildung 2-19: Wassergehalt w bei nichtthomogenen Bodenfrost [MÖLLER, G. (2013)]

Die Folge der Gefrier- und Tauprozesse kann ebenfalls zu kritischen Zuständen führen, wenn bereits gefrorener Boden (und damit Eislinsen und Bänder) schmilzt und dadurch die Tragfähigkeit stark herabgesetzt ist. Gleichmaßen existieren während des Tauprozesses bereits aufgetaute Bodenschichten über noch gefrorenen Bodenschichten, weshalb die damit einhergehende Wasseranreicherung infolge ungenügender Drainagefähigkeit ebenfalls zum Tragfähigkeitsverlust des Untergrundes führt.

Zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials beim Auftreten von Frost werden Böden gemäß ZTV E-StB, abhängig von ihrer Korngröße und Korngrößenverteilung, in die charakteristischen Frostempfindlichkeitsklassen F1 - F3 untergliedert.

### 2.6.2 Wasser in Gesteinskornmischungen

Wenn von Wasser im Untergrund bzw. Unterbau oder Boden gesprochen wird, können darunter unterschiedliche Erscheinungsformen verstanden werden. Allgemein kann unter „Bodenwasser“ das gesamte im Boden existente Wasser angesehen werden. Dabei ausgeschlossen ist das Kristallwasser der Bodenminerale.

Unterschieden wird allgemein zwischen frei beweglichem und gebundenem Wasser im Boden. Frei bewegliches Wasser unterliegt den Gesetzmäßigkeiten der Schwerkraft oder den Strömungskräften. Der Begriff „Sickerwasser“ ist charakteristisch für sich unter Einwirkung der Schwerkraft in Richtung Grundwasser bewegendes Wasser. Im Boden bzw. Gesteinskornmisch gebundenes Wasser wird als Kapillar- oder Adsorptionswasser bezeichnet [HÖLTING, B./COLDEWEY, W. G. (2013)]. Bei unterirdischem Porenwasser (bei Poren, welche nicht vollständig mit Grundwasser gefüllt sind) treten Oberflächenspannungen zwischen Bodenteilchen und Wasser auf, welche Kapillarkräfte bewirken und sich beispielsweise durch das Anheben von Grundwasser manifestieren. Die Kapillarkräfte nehmen hierbei mit abnehmender Porengröße zu [MÖLLER, G. (2013)].

Im unmittelbaren Kontaktbereich der Bodenteilchen nichtbindiger Böden wird vom sogenannten Porenwinkelwasser gesprochen (Abbildung 2-20). Die hierbei existenten Kapillarkräfte ziehen die Teilchen gegeneinander, wodurch ein Hafteffekt entsteht. Dieser Effekt wird als Kapillarkohäsion oder auch als „scheinbare Kohäsion“ bezeichnet [MÖLLER, G. (2013)]. Durch die Oberflächenspannung krümmt sich das Wasser an der Grenzfläche zur Bodenluft, weshalb der Dampfdruck abnimmt. Steigt der Wassergehalt, reduziert sich die Krümmung und die Oberflächenspannung nimmt ab. Abnehmender Wassergehalt führt zum gegenteiligen Effekt. Durch die umschlossenen Hohlräume in der Bodenstruktur erfüllt das Porenwinkelwasser den Porenraum als Kapillar- bzw. Poren-

saugwasser [JÜTTNER, M. (2011)]. Zudem kann die Kapillarkohäsion Auswirkungen auf die Scherfestigkeit nichtbindiger Böden haben, welche jedoch vergleichsweise gering sind, und die im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Auswertung der Versuche vernachlässigt werden. Adsorptionswasser, auch hygroskopisches Wasser genannt, basiert auf den Dipoleigenschaften der Wassermoleküle, welche sich an negativ geladene mineralische Oberflächen der Bodenteilchen anlagern. Durch Adsorptionswasser werden die Bodenteilchen mit einer Wasserhülle umgeben, welche als „diffuse Hülle“ bezeichnet wird und deren Dicke vom Elektrolytgehalt des Wassers abhängt [MÖLLER, G. (2013)]. Die elektrostatischen Wechselwirkungsprozesse sind je nach Abstand von der Oberfläche unterschiedlich stark, vergrößern sich jedoch mit abnehmendem Abstand von der Teilchenoberfläche (Abbildung 2-21). Zusätzlich kann je nach Bindungsstärke das Adsorptionswasser in definierte Schichten eingeteilt bzw. unterteilt werden.

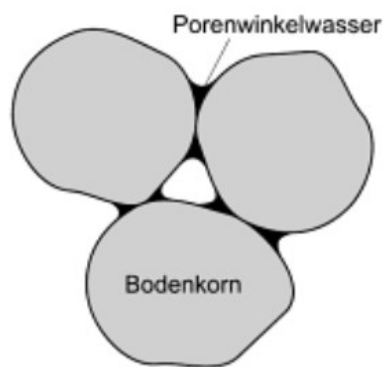


Abbildung 2-20: Bodenkörner mit Porenwinkelwasser [MÖLLER, G. (2013)]

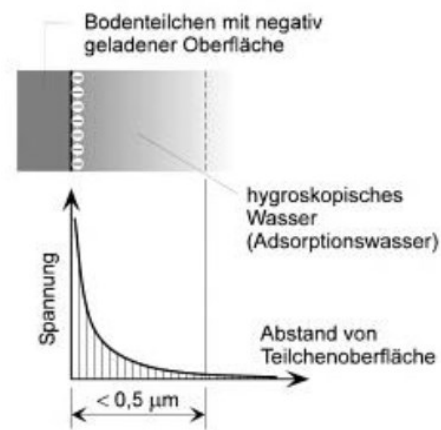


Abbildung 2-21: Verlauf der Anziehungsspannungen in der diffusen Hülle [MÖLLER, G. (2013)]

### 2.6.3 Phasenübergang von Wasser

Wasser ist ein anorganischer Stoff, bestehend aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff. Bekannt ist, dass Wasser in drei Zustandsformen existieren kann, nämlich im festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand. In der festen Form nehmen die Wassermoleküle eine geordnete Struktur ein. Durch die dabei entstehenden Brückenbindungen entstehen offene Hohlräume, womit die Dichteabnahme von Eis im Vergleich zu Wasser erklärt werden kann [BURSTEN, B. E. et al. (2011)]. Die Struktur von Eis ist druckabhängig, weshalb sogenannte Hochdruckmodifikationen unterschieden werden, auf welche an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird [SZEWZYK, U. et al. (2011)].

Wird Eis Energie zugeführt, indem es erwärmt wird, entspricht dies einer thermischen Anregung der Wassermoleküle auf ihren Gitterplätzen. In Folge fortschreitender Energie-



zufuhr verliert der Festkörper Eis seine Fernordnung. Die reguläre Anordnung kollabiert, und die Hohlräume der Struktur werden gefüllt. Im Ergebnis dessen liegen eine weniger einheitliche, aber dichtere Molekülpackung und gleichermaßen eine größere Dichte vor, verglichen mit dem festen Zustand. Diese Dichtezunahme setzt sich bis zu einer Temperatur von 3,98 °C fort, dem Dichtemaximum. Mit weiterer Erwärmung ist eine erneute Zunahme der Molekülbewegungen und damit Volumenzunahme verbunden [SZEWZYK, U. et al. (2011)]. Wird Wasser auf 0°C bei Atmosphärendruck abgekühlt, sind einzelne Moleküle derart energiearm, dass durch die zwischenmolekularen Kräfte ein regelmäßiger Festkörper (Eiskristall) gebildet wird. An diesen lagern sich weitere energiearme Moleküle an, woraus Kristallwachstum resultiert. Für den Fortgang des Gefrierprozesses wird dem noch im flüssigen Zustand existenten Wasser Wärme entzogen. Dieser Prozess dauert an, bis alle Moleküle im Feststoffgitter eingefügt sind. Während dieses Vorgangs bleibt die Temperatur des Systems (Wasser-Eis) konstant [SZEWZYK, U. et al. (2011)].

Abbildung 2-22 zeigt den qualitativen Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der zugeführten Wärmeenergie. Nach Erreichen des materialspezifischen Schmelzpunktes  $T_s$  bleibt die Temperatur trotz weiterer Energiezuführung konstant. Erst, wenn (wie bereits erläutert) das Gitter vollständig aufgelöst ist, führt eine weitere Wärmeenergiezufuhr zum erneuten Temperaturanstieg. Die zur Änderung des Aggregatzustandes notwendige bzw. freiwerdende Energie (Wärmeenergie  $Q_s$ ) wird als latente Wärme bezeichnet. Der Übergangsprozess zwischen den Einzelzuständen wird hierbei wie folgt unterschieden:

- Schmelzen/Gefrieren (Übergang flüssig – fest bzw. umgekehrt)
- Kondensieren/Verdunsten (Übergang flüssig – gasförmig bei  $T < 100$  °C bzw. umgekehrt)
- Kondensieren/Verdampfen (Übergang flüssig – gasförmig bei  $T > 100$  °C bzw. umgekehrt)
- Sublimation (Übergang fest – gasförmig bzw. umgekehrt)

Beim umgekehrten Vorgang, dem Gefrierprozess, wird gemäß der Energieerhaltung die gleiche Wärmeenergie freigesetzt, welche für das Schmelzen aufgebracht werden musste (Schmelzenergie = Gefrierenergie). Der gleiche physikalische Zusammenhang gilt für den Kondensations- bzw. Verdunstungs-/Verdampfungsprozess mit ( $T_v$  sowie  $Q_v$ ). Die spezifischen Energiemengen, welche benötigt bzw. freigesetzt werden, zeigt Abbildung 2-23. Zu erkennen ist, wie bei 100 °C (Siedetemperatur) der Übergang von der gasförmigen in die flüssige Phase stattfindet. Der Kondensationsprozess setzt dabei eine Verdampfungswärme von 2256 kJ/kg frei. Bei 0°C (Schmelztemperatur) setzt der Übergang in die feste Phase ein, wobei rd. 334 kJ/kg Schmelzwärme frei werden.

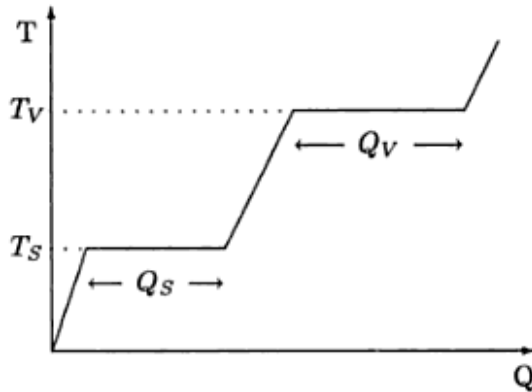


Abbildung 2-22: Qualitativer Temperaturverlauf eines Stoffes in Abhängigkeit von der ihm zugeführten Wärmeenergie [STROPPE, H. (2008)]

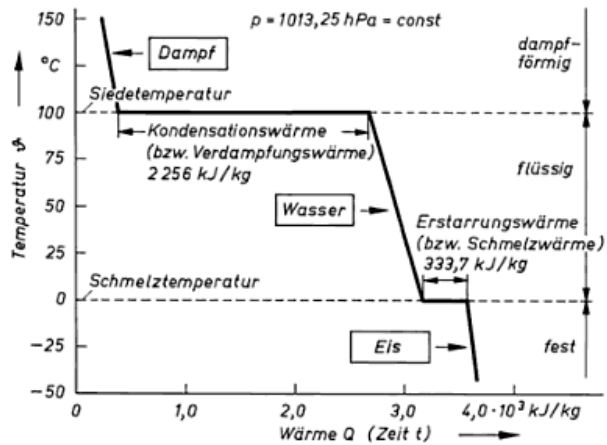


Abbildung 2-23: Abkühlkurve von Wasser unter Normaldruck in Abhängigkeit der abgeführten Energie- oder der Zeit t [STROPPE, H. (2008)]

Die aufzubringende bzw. freiwerdende Wärmeenergie für den Kondensations- bzw. Verdampfungsprozess ist um ein Vielfaches größer als für den Erstarrungs- bzw. Schmelzprozess. Dennoch ist eine Wärmeenergie von 334 kJ/kg erheblich, wenn man die damit erreichbare Temperaturänderung nach Glg. (2-21) berechnet. Bezogen auf 1 kg Wasser der flüssigen Zustandsform mit einer spezifischen Wärmekapazität von 4,19 kJ/(kg K) kann mit dieser Wärmeenergie eine Temperaturerhöhung um rd. 80 K erreicht werden.

$$\partial Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2-21)$$

mit:

$\partial Q$	[kJ]	Wärmeenergie
$m$	[kg]	Masse
$c_p$	[kJ/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität
$\Delta T$	[K]	Temperaturänderung

#### 2.6.4 Phasenübergang von Wasser in Gesteinskornmischungen

Der im vorangegangenen Kapitel erläuterte Phasenübergangsprozess für das Element Wasser gilt nicht für Wasser innerhalb der Gesteinskornmische. Innerhalb der Bodenmatrix existieren, wie bereits erläutert, unterschiedliche Bindungsformen des Wassers. Daraus resultiert, dass kein einheitlicher Schmelzpunkt mehr vorliegt. Somit erfolgt der Wechsel des Aggregatzustandes bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Gefrieretemperatur des Wassers ist von der freien Enthalpie abhängig, welche mit zunehmender Bindung der Wassermoleküle und Ionenkonzentration abnimmt. Deshalb gefriert Wasser zuerst dort, wo keine bzw. nur geringe Beeinflussungen durch Bindungskräfte vorliegen, d. h. in den Porenräumen [FAROUKI, O. T. (1986)]. Erst bei weiter fallenden Tem-

peraturen tritt auch bei gebundenem Wasser der Wechsel des Aggregatzustandes ein. Der komplexe Prozess beinhaltet unterschiedlichste Wechselwirkungen (thermisch-hydraulisch; chemisch-physikalisch), die an dieser Stelle ausschließlich allgemein behandelt werden, um Verständnis für die Interaktionen in thermisch beeinflussten Gesteinskornmischen zu erhalten. Sehr anschaulich wird der Sachverhalt durch ANDERSLAND, O. B./LADANYI, B. (2003) beschrieben, worauf nachfolgend maßgebend Bezug genommen wird.

Der allgemein instationäre Wärmestrom in der Nähe der Bodenoberfläche, verbunden mit den Bedingungen für Eiskeimbildung und Eiswachstum, ist die notwendige Voraussetzung für die Bildung streifenweiser Eisformationen im Boden. Zusätzlich ist es erforderlich, dass die Rate der Wärmeabfuhr die Geschwindigkeit der Wärmeversorgung (Wasserstrom) auf die Gefrierfront überschreitet. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 2-24 eine homogene, feinkörnige Bodensäule mit einer gefrorenen Bodenzone, einer aktiven Eislinse, der Frozen Fringe-Zone und einer darunter liegenden ungefrorenen Bodenzone.

*Die Frozen Fringe-Zone (gefrorene Randzone) kann als Bereich zwischen der 0 °C Isotherme und der etwas niedrigeren Temperaturisotherme verstanden werden, bei welcher die Eislinsebildung stattfindet [GILLOTT; G: E. (2012)].*

In der Frozen Fringe-Zone liegt ein erschwerter Wasserdurchfluss vor, da sich bereits in Teilen des Porenraumes Eis gebildet hat [ANDERSLAND, O. B./LADANYI, B. (2003) mit Verweis auf Nixon 1991]. Das Bodengefüge der Frozen Fringe-Zone dehnt sich aus, wenn der Druck durch Eisbildung ansteigt und größer wird als von der Struktur ertragbar, so dass eine Trennung der Gefügestruktur initiiert wird. Das Korngerüst wird verschoben, und eine neue Eislinse bildet sich. Mit einem schnellen Fortschritt der Gefrierfront (instationärer Wärmefluss) und eine Temperaturabnahme wird die Durchlässigkeit in der Frozen Fringe-Zone verringert, was zu einer Reduzierung der Wasserströmungsmenge zur Eislinse führt. Die Interaktion von Wärmeenergie und Wasserdurchfluss führt zu feineren Eislinse in der Nähe der Oberfläche und dickeren Eislinse in größerer Tiefe, wo der Temperaturgradient kleiner ist. Die Temperaturgradienten zeigen die Rate der Wärmeextraktion oberhalb der Frostgrenze, welche größer ist als die Geschwindigkeit der Wärmezufuhr unterhalb der Frostgrenze. Gefrorenen Bedingungen werden mit dem Index  $f$ , nicht gefrorenen Zustände mit  $u$  und die Tiefe mit  $z$  gekennzeichnet.

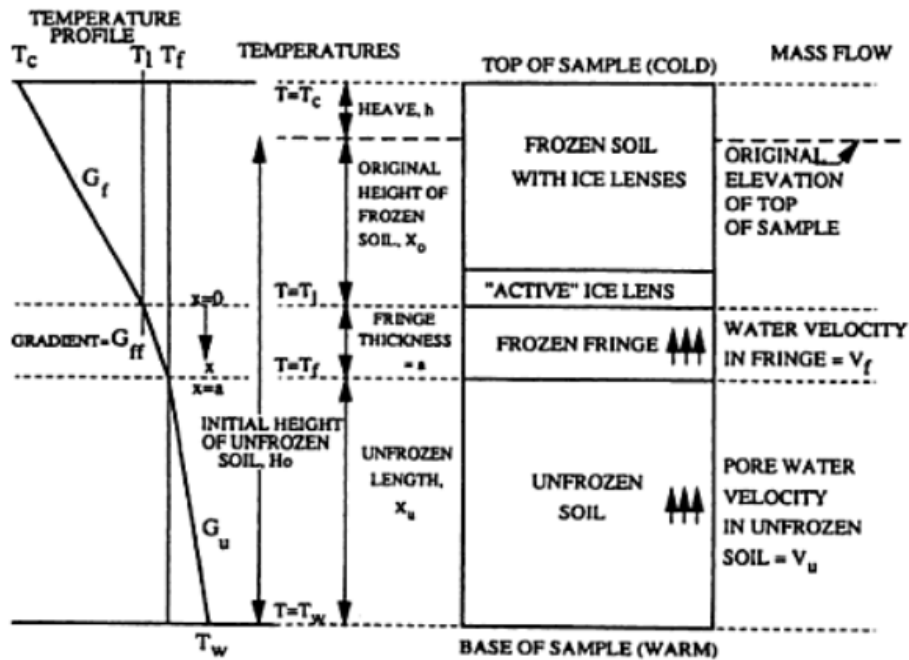


Abbildung 2-24: Frosthebung in einer idealisierten ein-dimensionalen Bodensäule [ANDERSLAND, O. B./LADANYI, B. (2003)]

Sehr bedeutsam an dieser Stelle ist, dass aufgrund des unterschiedlichen Gefrierzeitpunktes des Wassers innerhalb der Bodenstruktur der fluide und der kristalline Aggregatzustand gleichzeitig existieren. Die unterschiedliche Energiedichte des Wassers in seinen verschiedenen Aggregatzuständen bewirkt dabei den Massentransport (Bodenwasser) in Richtung des Temperaturgefälles (Saugspannung bzw. Gefriersog). Bei genügend zur Verfügung stehendem Wasser und stetiger Wasserwanderung zur Gefrierfront können die bereits genannten Eislinsen entstehen.

In grobkörnigen Materialien mit limitiertem Feinkornanteil ist der Wassergehalt üblicherweise vergleichsweise gering und damit auch der ungefrorene Wasseranteil im gefrierenden Material. Erreicht die Frosteindringtiefe grundwasserführende Schichten (bei einer darüber liegenden grobkörnigen Schicht), ist es für das Wasser schwer, die Gefrierfront zu erreichen. Die Frosten-Fringe-Zone ist sehr dünn ausgeprägt oder aber gar nicht existent. Folglich resultiert aus dem Gefrierprozess derartiger Gesteinskornmische üblicherweise weder Eislinsenbildung noch Frosthebung [KHALILI, N. (2014)].

Experimentelle Untersuchungen des Gefrierprozesses verschiedener Böden zeigen den Anteil ungefrorenen, also flüssigen Wassers im Gesteinskornmisch bei verschiedenen Temperaturen im negativen Grad Celsius-Bereich (Abbildung 2-25). Prinzipiell ist feststellbar, dass mit abnehmender Temperatur der Anteil des noch ungefrorenen Wassers ebenfalls ab- und folglich der Eisanteil zunimmt. Dabei zeigt sich, dass unterschiedliche

Korngemische unterschiedliche Entwicklungsverläufe der ungefrorenen Wasseranteile in Abhängigkeit von der Temperatur aufweisen. Bei grobkörnigen Böden wechselt das enthaltene Wasser schon bei geringfügig unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegenden Temperaturen nahezu vollständig vom flüssigen in den festen Aggregatzustand (Abbildung 2-25; Kurve Nr. 5).

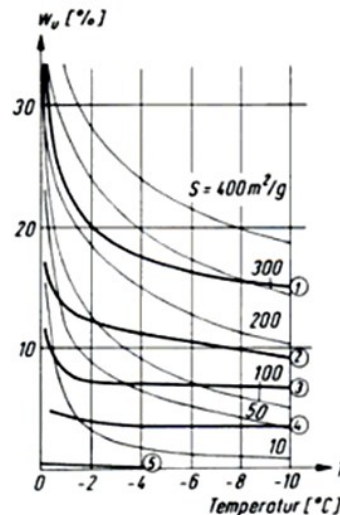


Abbildung 2-25: Ungefrorenes Wasser (WU) im Boden für verschiedene Bodenarten (1 Ton, 2 pleistozäner Ton, 3 toniger schwachsandiger Schluff, 4 schwachtoniger schluffiger Sand, 5 Sand) und für verschiedene spezifische Oberflächen  $S$  (10 bis  $400\text{ m}^2/\text{g}$  bei  $0^{\circ}\text{C}$ ) [WITT, K. J. (Hrsg. 2009)]

Dagegen sind in feinkörnigen Böden erheblich tiefere Temperaturen erforderlich, um die gebundenen Wasseranteile in die feste Zustandsform zu überführen. Folglich ist die Wärmeenergie, welche im Zuge des Aggregatwechsels frei wird bzw. aufgebracht werden muss, in Abhängigkeit des Entzugsmediums (Korngemisches) nicht nur unterschiedlich hoch, sondern erstreckt sich auch über unterschiedliche Temperaturbereiche.

Das mechanische Verformungsverhalten gefrorener Böden wird in der Literatur umfangreich behandelt, beispielsweise im Zusammenhang Baugrundvereisungen oder Gründungen in Regionen mit starker oder dauerhafter Frostbelastung. Dabei kann als allgemein gültig angesehen werden, dass sich die Eigenschaften gefrorener Böden bei Belastung deutlich von denen ungefrorener Böden durch die Anwesenheit von Eis und ungefrorener Wasseranteile unterscheiden. Gefrieren führt allgemein zu einer Zunahme der Festigkeit und Steifigkeit der Böden [beispielsweise in MANCUSO, C. et al. (2012) oder HASS, H. (2012)]. Es existieren Effekte aus Kriechen und Relaxation und gleichermaßen viskoelastische Materialantworten des Eises. Die möglichen Einflussfaktoren auf die Materialantwort können neben der Temperatur der Salzgehalt, der Druck, die Dehnungsrate, die Kristallausrichtung und die Dichte sein. Als wichtiger Materialkennwert gefrorener Böden findet die einaxiale Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul im Rahmen von Modellierungen Berücksichtigung. Diese Kennwerte gelten als temperatur-

und zeitabhängig. Gleichmaßen gilt für die Festigkeit und Steifigkeit gefrorener Böden eine Abhängigkeit vom Sättigungsgrad. Die Druckfestigkeit nimmt dabei mit abnehmendem Sättigungsgrad ab [HASS, H. (2012)].

Für die charakteristischen Darstellungen der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingungen sind für gefrorene Böden unterschiedliche Ausprägungen der Bruchbedingung postuliert. Neben der vertikalen Verschiebung (Anstieg) der Bruchbedingung bei abnehmender Temperatur vergrößert sich gleichermaßen die Zugfestigkeit. Über die experimentelle Bestimmung der Zugfestigkeit gefrorener Böden wird in unterschiedlichsten Veröffentlichungen berichtet, welche als deutlich geringer anzunehmen ist als die Druckfestigkeit (Abbildung 2-28).

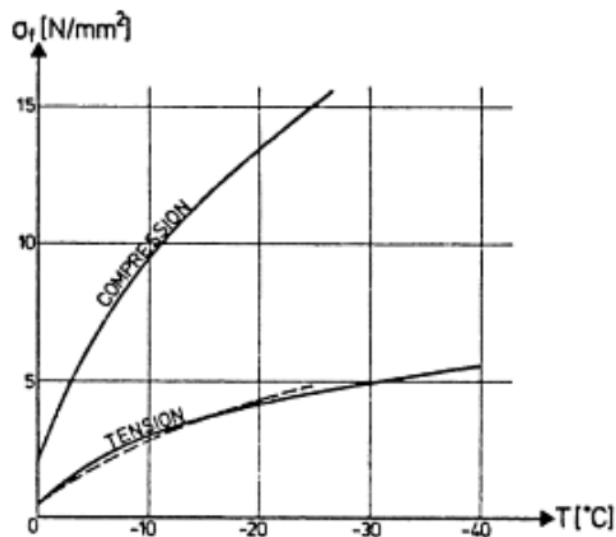


Abbildung 2-26: Druck- und Zugfestigkeit von gefrorenem Sand (w=28%) [nach JESSBERGER, H. L. (1981) aus ZELENIN et al. (1958)]

Ein weiteres in der Literatur beschriebenes Phänomen gefrorener Böden ist der hyperbolische Verlauf der Bruchumhüllenden im Mohr-Coulomb Diagramm. Nach der anfänglichen Zunahme der Scherfestigkeit bei steigender Normalspannung nimmt, nach dem Erreichen/Überschreiten eines Maximalwertes, die Scherfestigkeit ab. In PARAMESWARAN, V. R./JONES, S. J. (1981) wird angeführt, dass eine mögliche Ursache darin besteht, dass nach dem Schließen von Hohlräumen und Mikrorissen, infolge dessen plastische Deformationen entstehen, durch zunehmender Erhöhung des hydrostatischen Druckes der Anteil der flüssigen Wasserphase auf Grund der Druckschmelze ansteigt und dadurch die Scherfestigkeit abfällt. Voraussetzungen dafür sind grundsätzlich sehr große Materialbeanspruchungen.

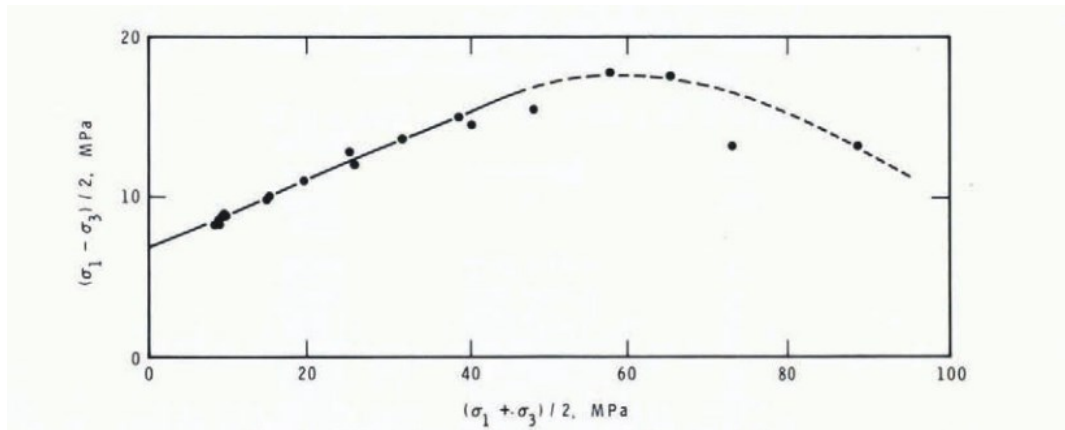


Abbildung 2-27: Variation von Scherspannung und Normalspannung [PARAMESWARAN, V. R./ JONES, S. J. (1981)]

SIMONSEN, E. et al. (2002) untersuchten das reversible Materialverhalten unterschiedlicher Materialien unter triaxialen Bedingungen, beispielsweise feinkörnige schluffige Sande, aber auch grobkörnige Kies-Sand-Gemische. Die Probekörper wurden in der Triaxialkammer gekühlt oder erwärmt, d. h. gefroren oder aufgetaut. Um eine einheitliche Materialantwort zu unterstellen, wurde die Probe 200-mal einer Belastungssequenz von 100 Lastzyklen ausgesetzt (mit einem Limit der plastischen Dehnungen von 5 %). Die Temperatur wurde sowohl in der Klimakammer als auch im Material eines Probekörperdummys gemessen, um Probenstörungen zu vermeiden. Die Proben wurden durch eine haversine Belastung mit dazwischenliegenden Lastpause, bei unterschiedlichen Druckstufen und Temperaturen untersucht. Für den nichtgefrorenen Zustand wurde nach den Empfehlungen der AASHTO TP46-94 getestet. Im gefrorenen Zustand wurden unterschiedlich große deviatorische Spannungen aufgebracht, da ein unzureichender Kenntnisstand hinsichtlich aufzubringender Belastung aus der Literatur bekannt ist. Die größten deviatorischen Spannungszustände wurden unterhalb von  $-5\text{ °C}$  aufgebracht. Dabei konnte grundsätzlich festgestellt werden, dass sich der Elastizitätsmodul während des Gefriervorganges vergrößert. Die erreichten Moduln, aber auch der zeitabhängige Verlauf unterscheidet sich dabei von der Art der Böden (Abbildung 2-28).

Zu erkennen ist, dass der Elastizitätsmodul des grobkörnigen Kiessandes (Coarse Gravelly Sand) vergleichsweise schnell das Maximum erreicht. Zu vermuten ist, dass der ungefrorene Wasseranteil im Gemisch sehr schnell abnimmt und das Gemisch schon bei vergleichsweise geringen negativen Temperaturen nahezu vollständig durchgefroren ist (vgl. Abbildung 2-25). Angenommen wird jedoch in Abhängigkeit der Bodenart ein erheblicher Anstieg des Elastizitätsmoduls um den Faktor 10 bis über 300 bei einer Temperatur von  $-10\text{ °C}$  im Vergleich zur Raumtemperatur.

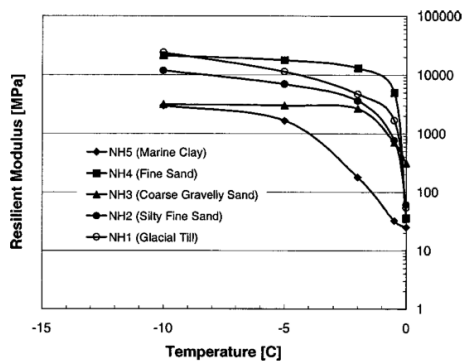


Abbildung 2-28: Elastizitätsmodul für New Hampshire Böden als Funktion der Temperatur [SIMONSEN, E. et al. (2002)]

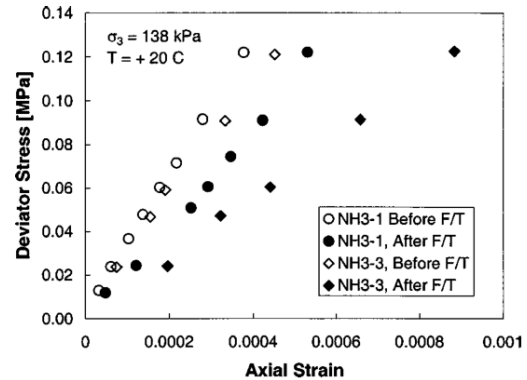


Abbildung 2-29: Typisches „festgestelltes“ Spannungs-Dehnungsverhalten vor und nach dem Frost-Tau Zyklus [SIMONSEN, E. et al. (2002)]

In SIMONSEN, E. et al. (2002) wird für alle Böden zwar eine große Temperaturabhängigkeit, aber eine unterschiedliche Ausprägung der Spannungsabhängigkeit postuliert. Beispielsweise wird für den grobkörnige Kiessand und Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes keine Spannungsabhängigkeit festgestellt. Auch zeigten feinkörnige schluffige Böden eine, wie postuliert, überraschende umgekehrte Proportionalität des Elastizitätsmoduls vom Stützdruck.

Zudem wird für die untersuchten Böden von einer Veränderung der Materialeigenschaften (reduzierter Elastizitätsmodul) nach dem Auftauen (nach Durchlauf eines Frost-Tau-Zyklus) berichtet (Abbildung 2-29). Als ein möglicher Grund für dieses Phänomen wird eine Netto-Volumenzunahme angeführt, aus welcher eine lockerere Bodenstruktur resultiert. Wie aber durch die Autoren angemerkt, sind Literaturquellen, welche eine Abhängigkeit des Materialverhaltens grobkörniger Materialien von der Temperatur (im Zuge von Frost-Tau-Belastung) nachweisen, nicht bekannt. Dem Autor der vorliegenden Arbeit sind derartige Postulate nicht bekannt. Zudem wird auf die Schwierigkeit verwiesen, kleines Dehnungsverhalten infolge geringer Temperaturen möglichst exakt zu messen.

*Angemerkt sei jedoch an dieser Stelle, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass Auflockerungen der Bodenstruktur möglicherweise auch aus der Belastungsgeschichte der Materialprobe und einer dabei aufgetragenen zu großen Scherbelastung (infolge der Erhöhung des Deviators bei Probenabkühlung) resultieren.*

Zuverlässige Aussagen zur Veränderung der Querdehnzahl konnten im Rahmen der Untersuchungen von SIMONSEN, E. et al. (2002) auf Grund zu messender kleiner Radialdehnungen nicht erarbeitet werden.



In BERG, L. et al. (1996) wurde das Materialverhalten unterschiedlicher gesättigter Gesteinskornmische unter triaxialen Bedingungen untersucht und beschrieben. Auch hier wurde der deutliche Anstieg des Elastizitätsmoduls  $M_r$  infolge des Gefrierens beschrieben. Gleichmaßen wurde der Anstieg des Elastizitätsmoduls mit abnehmendem Sättigungsgrad postuliert (Abbildung 2-30). Dieser Zusammenhang war gleichermaßen ein Ansatzpunkt für die funktionalen Berechnungsansätze des Elastizitätsmoduls.  $W_{u-g}$  (berechneter ungefrorener gravimetrischer Wasseranteil) Die verwendeten Kürzel bedeuten hierbei  $W_t$  (Probenwassergehalt),  $W_{u-v}$  (berechneter ungefrorener volumetrischer Wasseranteil) und  $W_{u-g}$  (berechneter ungefrorener gravimetrischer Wasseranteil).

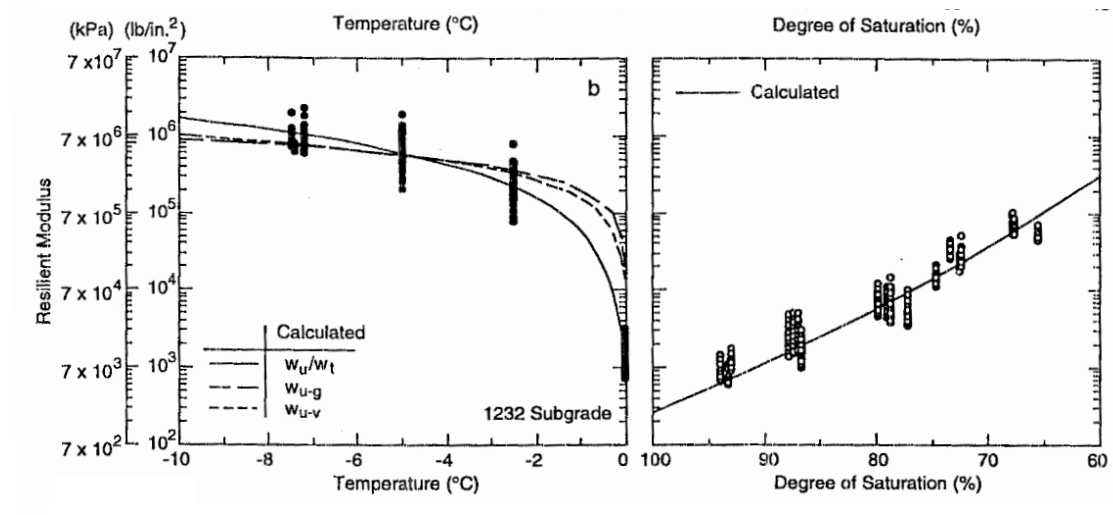


Abbildung 2-30: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur (links) sowie der Sättigung (rechts) [BERG, L. et al. (1996)]

### 3 Der Triaxialversuch

#### 3.1 Theoretische Grundlagen zum Spannungszustand

Der allgemeine Spannungszustand eines Elementes wird üblicherweise durch neun Größen ( $\sigma_{ij}$ ) in der Spannungsmatrix (Spannungstensor) dargestellt. Der Koordinatenbezug wird entweder zum kartesischen Koordinatensystem mit x, y, z oder bei Indexnotation mit 1, 2, 3 hergestellt.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \text{ bzw. } \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

(ij=Schnittebene senkrecht zu i/Komponentenrichtung j)

Um einen allgemeinen Spannungszustand in einen Hauptspannungszustand zu überführen, muss das Bezugskordinatensystem derart gedreht werden, dass alle Elemente der Matrix gleich 0 (Determinante der Koeffizientenmatrix gleich 0) werden, ausgenommen die Elemente der Hauptdiagonalen.

$$\det(\sigma) = 0 = \begin{vmatrix} (\sigma_{xx} - \sigma) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_{yy} - \sigma) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_{zz} - \sigma) \end{vmatrix} \quad (3-2)$$

Für die nichttriviale Lösung ist das kubische Eigenwertproblem zu lösen,

$$0 = -\sigma^3 + I_1\sigma^2 + I_2\sigma + I_3 \quad (3-3)$$

dessen drei Koeffizienten (Invarianten) wie nachfolgend dargestellt berechnet werden [MEYWERT, M. (2007)]:

$$I_1 = \text{Spur}(\sigma) = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3-4)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(\text{Spur}(A)^2 - \text{Spur}(A^2)) \quad (3-5)$$

$$I_3 = \det(A) = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_x\tau_{yz}^2 + \sigma_y\tau_{zx}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2) \quad (3-6)$$

Im Hauptspannungszustand steht der Spannungsvektor senkrecht auf der Schnittebene (Hauptebene). Damit sind Spannungs- und Normalenvektor parallel zueinander. Durch den Normalenvektor der Hauptebene wird die Hauptrichtung mit der zugehörigen Normalspannung, d. h. der Hauptspannung definiert. Ergebnis der Hauptachsentransformation sind der Hauptspannungstensor (HST) und das Bezugssystem, das Hauptachsensystem (HAS) [MEYWERT, M. (2007)]. Der Spannungstensor im Hauptachsensystem vereinfacht sich dabei zu

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (3-7)$$

Auch für den Hauptspannungszustand, d. h. den schubspannungsfreien Spannungszustand existieren Invarianten, welche wie folgt berechnet werden.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3-8)$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \quad (3-9)$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \quad (3-10)$$

Meist wird zur besseren Zuordnung der Spannungstensor derart formuliert, dass dabei gilt

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

(mit  $\sigma_1$ =Hauptnormalspannung)

Für unterschiedlichste Problemstellungen ist es sinnvoll, den Spannungstensor (unabhängig davon, ob ausschließlich Normalspannungen oder Normal- und Schubspannungen existieren) in zwei Komponenten additiv aufzuteilen. Sinn der Aufteilung ist es, den Hauptspannungszustand in eine volumenändernde Komponente (Kugeltensor; auch hydrostatischer Teil des Spannungstensors) und eine formändernde Komponente (Spannungsdeviator; auch „deviatorischer Spannungstensors“) zu differenzieren [BIRKERT, A. et al. (2013); SELKE, P. (2013)]. Abbildung 3-1 verdeutlichen diesen Zusammenhang im Hauptspannungsraum bzw. Haigh-Westergaard stress space.

$$\begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_1 - \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_m \end{vmatrix} \quad (3-11)$$

Die isotrope bzw. hydrostatische Spannung wirkt in alle Richtungen gleich stark und berechnet sich aus der ersten Spannungsinvariante.

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \cdot I_1 = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3-12)$$

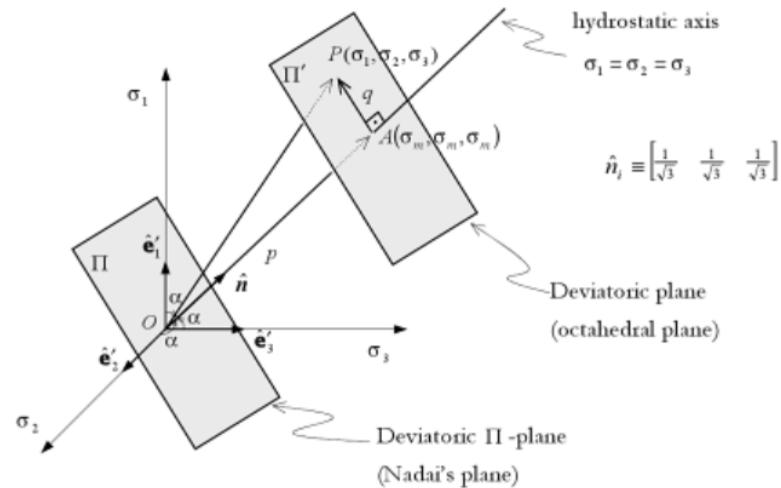


Abbildung 3-1: Haigh-Westergaard stress space [CHAUVER, E. W. V. (2013)]

Der Spannungsdeviator liefert eine Aussage zum Scherspannungszustand im Material und kann dabei nach BOLEY als Maß für die Ausnutzung von Böden definiert werden [BOLEY, C. (2012)]. Gleichmaßen wie bei den Betrachtungen zum Spannungstensor existieren auch für den Spannungsdeviator drei Invarianten.

$$J_1 = 0 \quad (3-13)$$

$$J_2 = 3 \cdot \sigma_m^2 = \frac{1}{6} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3-14)$$

$$J_3 = \sigma_m^3 = \frac{1}{27} \cdot (2 \cdot \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \cdot (2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) \cdot (2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2) \quad (3-15)$$

Die 1. Invariante der gestaltändernden Spannungskomponente ist grundsätzlich null. Die 2. Invariante entspricht dem Deviator, welcher eine Aussage zur Scherbeanspruchung des Betrachtungselementes liefert. Die verbleibende 3. Invariante definiert den sogenannten Lodewinkel, ein Maß für die Lage des Spannungspunktes in der Deviatorenebene [WEBER, M. (2007)]. Der Begriff Spannungsinvariante resultiert daraus, dass diese bei der Drehung der Schnitttrichtung bzw. des Koordinatensystems unverändert bleiben [DOEGE, E./BEHRENS, B.-A. (2010)].

Häufig wird Bezug auf einen geometrischen Körper, den Oktaeder, im Hauptspannungsraum genommen. Normal- und Schubspannung sind in den acht Oktaederebenen jeweils konstant. Entsprechend des Bezuges der Spannungen zum genannten Körper werden diese Invarianten als Oktaeder-Schubspannung ( $\tau_{okt}$ ) und Oktaeder-Normalspannung ( $\sigma_{okt}$ ) bezeichnet und wie nachfolgend dargestellt berechnet [BOLEY, C. (2012)].

$$\sigma_{okt} = \frac{I_1}{3} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3-16)$$

$$\tau_{okt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot J_2} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3-17)$$

Da der Spannungszustand eines Elementes sowohl durch Hauptspannungen als auch durch Invarianten beschrieben werden kann [BOLEY, C. (2012)], sind beide Darstellungsformen in der Literatur vorzufinden. Üblich in der Geotechnik ist die Verwendung folgender Konventionen, welche auch als charakteristische Spannungen bezeichnet werden.

$$p = \sigma_{okt} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad 3-18$$

$$q = \sqrt{3 \cdot J_2} = \sqrt{\left[ \frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right]} \quad 3-19$$

Unter der Annahme mehraxialer Kompression im unechten Triaxialversuch mit  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  kann die Formulierung des Deviators vereinfacht werden.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3-20)$$

Auf Grundlage der Definition von q nach Glg. (3-17) kann dieser invariante Wert unabhängig davon, welche der drei Hauptspannungen betragsmäßig die größte ist, ausschließlich positive Werte annehmen und ist deshalb korrekt wie folgt zu formulieren:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3-21)$$

(mit  $\sigma_1 \geq \sigma_3$ )

oder

$$q = |\sigma_1 - \sigma_3| \quad (3-22)$$

Die Formulierung nach Glg. (3-19) kann zu Interpretations- und Deutungsproblemen (ggf. sogar zu Fehlinterpretationen) führen, wenn ausschließlich die Differenz betrachtet wird.

In der Geotechnik wird üblicherweise bei triaxialen Untersuchungen zwischen Kompression und Extension unterschieden, um Bezug zu Belastungen im Feld, d. h. in situ mit  $\sigma_v$  (Vertikalspannung) und  $\sigma_H$  (Horizontalspannung) herzustellen. Durch Substitution von  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  durch  $\sigma_v$  und  $\sigma_H$  kann Glg. (3-19) wie folgt formuliert werden,

$$q^* = \sigma_v - \sigma_H \quad (3-23)$$

wobei zu beachten ist, dass diese Interpretation ausschließlich für die Differenzierung zwischen Kompression und Extension geeignet ist. In der p-q\* Darstellung bedeutete dabei q\* über der Abszisse aufgetragenen Kompressionsbeanspruchungen (positives Vorzeichen) während q\* unter der Abszisse aufgetragenen Extensionsbeanspruchung (negatives Vorzeichen) bedeutet [POWRIE, W. (2014)].

Die Verknüpfungen zwischen Deviator und Oktaeder-Schubspannung kann durch Auflösen von Glg. (3-17) und Glg. (3-19) nach  $J_2$  und Gleichsetzen hergestellt werden, weshalb nach folgende Beziehung gilt:

$$q = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \tau_{okt} \quad (3-24)$$

*Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Formulierungen wie zuvor dargestellt verwendet. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, dass in der Fachliteratur auch andere mathematische Formulierungen existent sind, welche als Deviator bezeichnet werden [WEBER, M. (2007)].*

### 3.2 Art der Beanspruchung und Spannungspfade

Im Triaxialversuch können verschiedene Belastungen statisch oder zyklisch realisiert werden. Zudem wird die Art der Lastaufbringung während der Versuchsdurchführung üblicherweise durch Spannungspfaddarstellungen visualisiert. Häufigste Verfahrensweise ist, ausgehend von einem definierten isotropen Spannungszustand, die große Hauptspannung zu erhöhen und folglich eine über den hydrostatischen Spannungszustand hinausgehende deviatorische Spannungskomponente zu erzeugen (Abbildung 3-2, Pfade I). Die radiale Spannungskomponente bleibt hierbei unverändert. Für bodenmechanische Belange sind auch verschiedene andere Spannungspfade von Bedeutung. Pfad II (Abbildung 3-2) stellt den sogenannten deviatorischen Pfad dar (orthogonale Richtung im

Bezug zur isotropen Achse). Beanspruchungszustände unterhalb der hydrostatischen Achse (Abbildung 3-2, Spannungspfade III und IV) werden als Extension bezeichnet [KOLYMBAS, D. (1998)]. Grundsätzlich führen steigende deviatorische Spannungszustände nach dem Erreichen eines die Materialfestigkeit übersteigenden Zustandes zum Materialversagen. Diese entsprechenden Grenzzustände (GZ) liegen sowohl für Kompressions- als auch für Extensionsbeanspruchungen vor.

Vielfach wird bei Triaxialversuchen eine Belastungsart realisiert, bei welcher die Spannung in radialer Richtung konstant gehalten wird (Constant Confining Pressure - CCP) und die statische oder zyklische Belastung ausschließlich in axialer Richtung aufgebracht wird. Dies resultiert nicht nur aus materialspezifischen oder baupraktischen Überlegungen, sondern auch aus der äußerst komplexen Prüftechnik.

Triaxialzellen mit variabler Axial- und Radialsteuerung (Various Confining Pressure - VCP) sind vergleichsweise neue Entwicklungen und nur an wenigen Forschungseinrichtungen vorhanden. Eine dieser Einrichtungen ist das Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau der Technischen Universität Dresden. Den grundsätzlichen Unterschied der Ansteuerung eines Spannungspunktes im Kompressionsbereich (A) und im Extensionsbereich (B) bei CCP und VCP Versuchsdurchführung zeigt Abbildung 3-2.

Für straßenbautechnische Problemstellungen ist die variable und zyklische Steuerung von Axial- und Radialkomponente von Bedeutung, da die Beanspruchung im Materialelement der Straßenbefestigung durch Rad- bzw. Achslastüberrollungen veränderlich ist. In Kapitel 4 wird die Triaxialzelle der Professur für Straßenbau vorgestellt, mit welcher gleichermaßen CCP- und VCP-Versuche realisiert werden können.

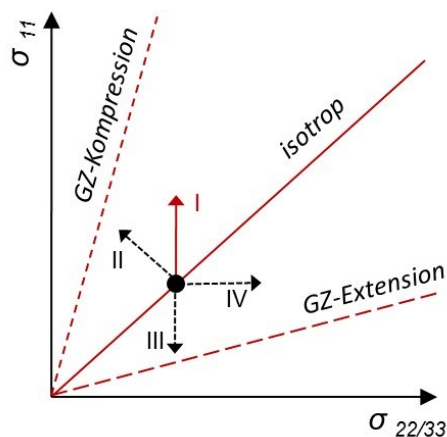


Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung verschiedener realisierbarer Spannungspfade (ausgehend von einem isotropen Spannungszustand) bei triaxialer Beanspruchung

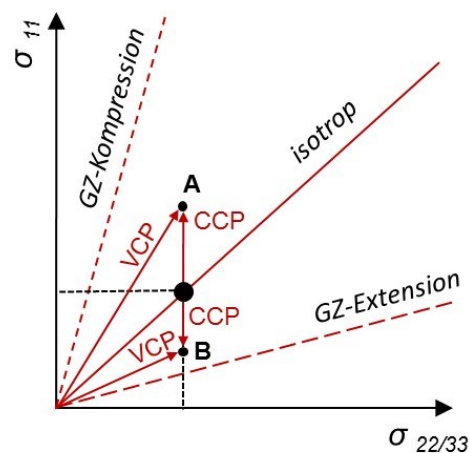


Abbildung 3-3: Prinzipdarstellung der Spannungspfade bei CCP und VCP Versuchsdurchführung

### 3.3 Bruchzustand granularer Materialien (Grenzbedingung)

Für die grafische Darstellung der Beanspruchung im Material bei triaxialer Beanspruchung wird üblicherweise das Mohr-Coulomb'sche Diagramm gewählt (Abbildung 3-4).

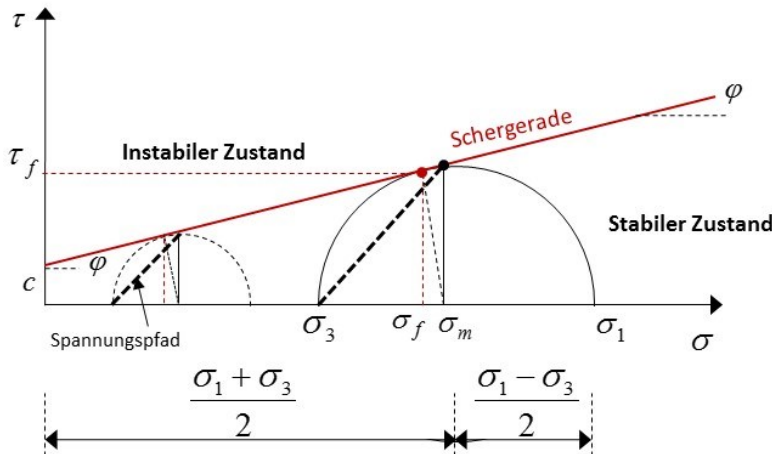


Abbildung 3-4: Prinzip Darstellung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung

Im triaxialen Beanspruchungszustand granularer Materialien liegt ein stabiler Zustand nur dann und nur solange vor, so lange die von außen wirkenden Kräfte vom Material ohne Versagen (Scherbruch) ertragen werden können. Hierbei existiert eine zur kleinen Hauptspannung gehörende maximal ertragbare große Hauptspannung, dargestellt durch die jeweiligen Spannungskreise. Die die Spannungskreise tangierende Gerade wird in der Bodenmechanik als Schergerade bezeichnet und trennt damit den stabilen vom instabilen Bereich (statische Beanspruchungszustände). Beanspruchungszustände oberhalb der Schergeraden können folglich nicht existieren. Der Anstieg der Schergeraden wird als innerer Reibungswinkel ( $\varphi$ ) bezeichnet. Kohäsionsloses Material kann keine Scherkraft ohne gleichzeitig existierende Normalkraft übertragen. Folglich schneidet die Schergerade das Achsensystem im Koordinatenursprung. Liegt Kohäsion bzw. „scheinbare Kohäsion“ vor, schneidet die Schergerade die vertikale Achse bei  $\tau > 0$ , d. h. Schub- bzw. Scherspannungen können auch ohne gleichzeitig vorhandene Normalspannung ertragen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen an grobkörnigen ungebundenen Straßenbaustoffen wird von dränierten Bedingungen und von kohäsionslosen Materialeigenschaften ausgegangen. Deshalb gilt die Darstellung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung entweder nach Abbildung 3-5 im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm oder nach Abbildung 3-6 im  $s$ - $t$ -Diagramm. Häufig werden zudem auch die Invarianten  $p$ - $q$  verwendet, auf deren Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.



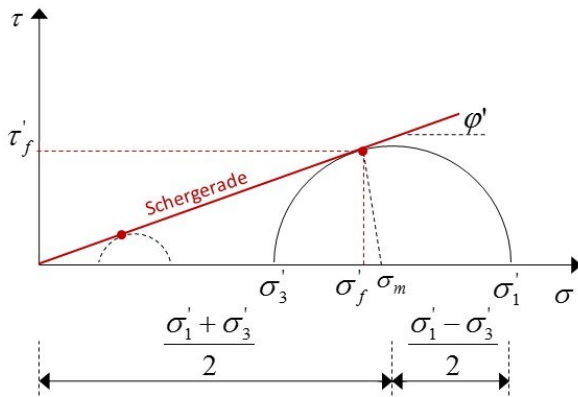


Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm unter dränierten Bedingungen

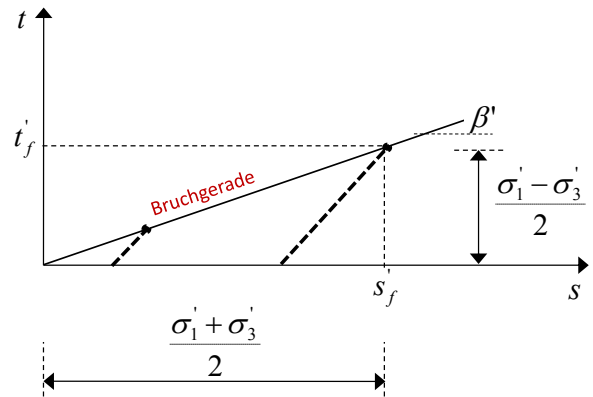


Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung im s-t-Diagramm unter dränierten Bedingungen

Ein allgemeiner Ansatz für die Berechnung der maximal ertragbaren Schubbeanspruchung in Abhängigkeit des inneren Reibungswinkels für kohäsionsbehaftete granulare Stoffe kann wie folgt formuliert werden [beispielsweise aus SCHULZE, D. (2009) oder MÖLLER, G. (2013)].

$$\tau'_f = c' + \tan\varphi' \cdot \sigma'_f \quad (3-25)$$

bzw. unter Verwendung der Hauptspannungen

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = c' + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \sin\varphi' \quad (3-26)$$

und für grobkörniges kohäsionsloses Material

$$\tau'_f = \tan\varphi' \cdot \sigma'_f \quad (3-27)$$

bzw. unter Verwendung der Hauptspannungen.

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \sin\varphi' \quad (3-28)$$

Folglich berechnet sich der innere Reibungswinkel  $\varphi'$  zu

$$\sin\varphi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (3-29)$$

und der Winkel  $\beta'$  der Bruchgeraden zur Horizontalen zu

$$\tan\beta' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (3-30)$$

weshalb gilt

$$\sin\varphi' = \tan\beta' \quad (3-31)$$

Nach Rankine [MÖLLER, G. (2013)] berechnet sich die Neigung der Scherfuge zur Horizontalen bei triaxialer Abscherung zu

$$\alpha = \frac{+}{-} (45^\circ + \varphi') \quad (3-32)$$

und kann aus der trigonometrischen Beziehung nach Abbildung 3-7 berechnet werden. Bezogen auf den Triaxialversuch stellt sich der zu erwartende Scherbruch im rotations-symmetrischen Probekörper, wie in Abbildung 3-8 schematisch dargestellt, ein.

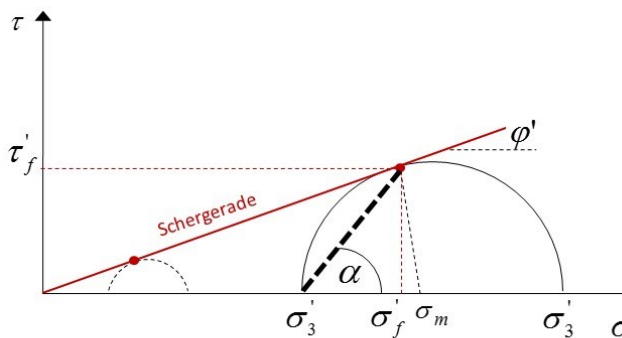


Abbildung 3-7: Winkel der Scherfuge; Prinzipdarstellung im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm unter Dränen Bedingungen

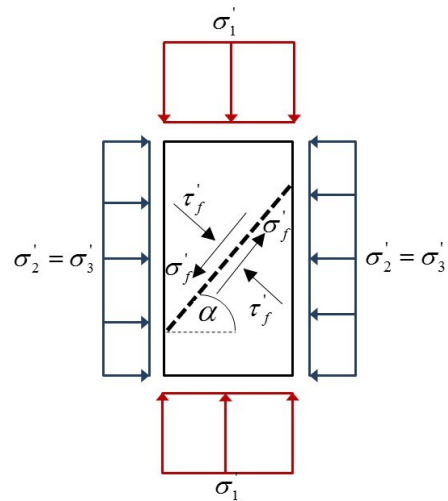


Abbildung 3-8: Winkel der Scherfuge; Prinzipdarstellung am rotationssymmetrischen Triaxial-Probekörper

Grundsätzlich werden für den Triaxialversuch unterschiedliche Versagenszustände postuliert, auf welche an dieser Stelle zusätzlich verwiesen wird. Neben einer einzelnen Scherfuge können auch mehrere Scherfugen gleichzeitig existieren, oder es sind bei ausgeprägter Plastifizierung der Probe keine ausgeprägten Scherfugen existent (Abbildung 3-9).

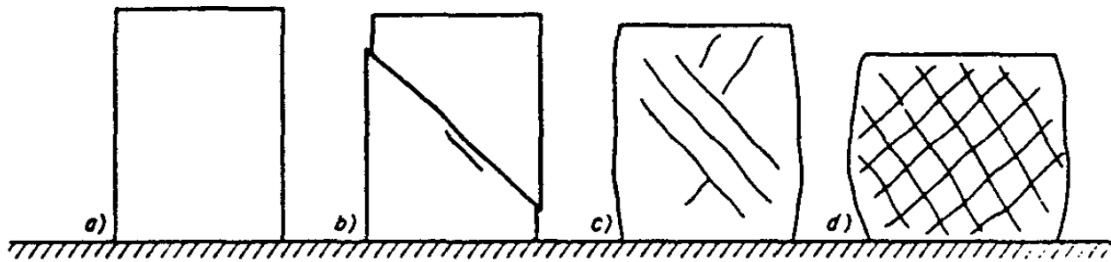


Abbildung 3-9: Abgescherter Triaxialproben a) vor dem Versuch; b) Bruch in einer Bruchfuge; c) Bruch in mehreren Bruchfugen; d) vollständig plastifizierte Probe [BISHOP, A. W./HENKEL, D. J. (1964)]

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass zyklische und statische Belastungen neben verschiedenen Phänomenen auch zu unterschiedlichen Reibungswinkeln führen. Deshalb wird für Reibungswinkel unter zyklischer Belastung der reduzierte Reibungswinkel  $\varphi'_{\text{dyn}}$  verwendet [BECKER, P. (2009)].

### 3.4 Festigkeitshypothesen

In vielen Ingenieurbereichen ist es üblich, mit sogenannten Festigkeitshypothesen Grenzbeanspruchungen für Materialien festzulegen. Ziel hierbei ist es, zu hohe Bauteilbeanspruchungen und in der Folge Materialversagen zu verhindern. Grundsätzlich ist der einfachste Test, um Materialfestigkeiten zu analysieren, die einaxiale Belastung (beispielsweise der einaxiale Zugversuch). Damit kann die mögliche Grenzbeanspruchung  $\sigma_{\text{zul}}$  vergleichsweise einfach bestimmt werden. Räumliche Beanspruchungen hingegen sind deutlich komplexer, woraus sich verschiedenste Überlegungen herauskristallisiert haben, materialspezifische Vergleichsspannungen abzuleiten/zu berechnen, welche das Verhalten bei einaxialer Beanspruchung möglichst gut wiedergeben [DOEGE, E./BEHRENS, B-A. (2010)]. Bei mehrdimensionalen Beanspruchung wird deshalb eine Vergleichsspannung auf Basis einer Hypothese berechnet, auf deren Grundlage der Nachweis

$$\sigma_V \leq k_f$$

geführt wird [DANKERT, J./DANKERT, H. (2013)]. Nachfolgend soll nur auf einige wenige eingegangen werden, um zu zeigen, welche Modellvorstellungen für unterschiedliche Materialien Anwendung finden.

„Klassische“ Fließbedingungen sind beispielweise die Normalspannungshypothese, Gestaltänderungsenergie-Hypothese, die Mohr-Coulomb-Bedingung oder die Drucker-Prager-Bedingung. Nachfolgend wird auf drei der genannten Bedingungen näher eingegangen, um das spezifische Materialverhalten ungebundener Gesteinskorngemische aufzuzeigen.

3.4.1 Gestaltänderungsenergie-Hypothese

Die Gestaltänderungsenergie-Hypothese (auch von Mises Hypothese) ist wohl eine der bekanntesten und am häufigsten verwendeten Hypothesen zur Beschreibung des Materialfließverhaltens.

Die Theorie besagt, dass bei mehrdimensionaler Beanspruchung das Fließen eintritt, wenn die Gestaltänderungsarbeit gleich derjenigen bei Eintritt des Fließens unter einachsiger Beanspruchung ist [RUST, W. (2011)]. Die Fließbedingung der von Mises Hypothese lautet hierbei wie folgt:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3-33)$$

Unter der Annahme von Rotationssymmetrie, wie im unechten Triaxialversuch vorhanden, vereinfacht sich der Ausdruck zu:

$$\sigma_V = |\sigma_1 - \sigma_{2/3}| \quad (3-34)$$

Im Hauptspannungsraum dargestellt entspricht die Fließfläche einem Kreiszyylinder, dessen Zylinderachse der hydrostatischen Achse entspricht (Abbildung 3-10).

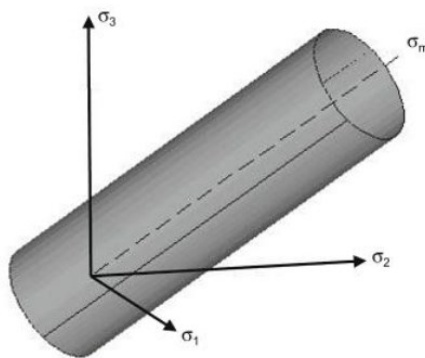


Abbildung 3-10: Von-Mises-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)]

Klar wird bei der Betrachtung der geometrischen Ausprägung der Fließfläche, dass die bis zum Beginn des Fließens ertragbare Spannung unabhängig vom hydrostatischen Druck ist und zudem kein Unterschied zwischen Zug- und Druckbereich vorliegt. Folglich ist die für Metalle postulierte gute Eignung dieser Hypothese für Gesteinskornmischungen nicht anwendbar.

Ähnlich geartet ist die Fließbedingung nach Tresca (Schubspannungshypothese), welche die Form einer sechseckigen Röhre ausweist und deren Mittelachse die Raumdiagonale ist. Die größte im Material vorkommende Schubspannung löst hiernach den Fließbeginn aus [RÖSLER, J. et al. (2012)]. Entsprechend der Form der Fließbedingung ist auch hier die Fließgrenze unabhängig von der hydrostatischen Spannung.

### 3.4.2 Festigkeitshypothese nach Mohr-Coulomb

Die Mohr-Coulomb-Bedingung (M-C-Bedingung) stammt aus der Bodenmechanik und basiert auf dem Grundzusammenhang der Mohr-Coloumb'schen Theorie [RUST, W. (2011)]. Dennoch findet man diese Theorie auch in der Verfahrenstechnik oder anderen Wissenschaftszweigen, welche sich mit Granulaten, Pulver o. ä. Materialien beschäftigen.

Der klassische Mohr-Coloumb'sche Ansatz verknüpft Normal- und Schubspannung linear im Sinne eines Reibungsgesetzes. Der entscheidende Unterschied zu den zuvor erläuterten Hypothesen besteht in der Abhängigkeit der ertragbaren Scherspannung von der Normalspannung, da Reibung auftritt. Die Fließbedingung wird nach [RUST, W. (2011)] dann erreicht, wenn gilt:

$$F = \frac{I_1}{3} \cdot \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left( \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cdot \cos \varphi = 0 \quad (3-35)$$

Erkennbar ist, dass sowohl der innerer Reibungswinkel als auch die Kohäsion die geometrische Ausprägung der Fließfläche mitbestimmen. Würde der innere Reibungswinkel den Wert Null annehmen, d. h. läge keine Reibungsabhängigkeit mehr vor, entspräche die Fließbedingung dem Tresca Kriterium [RUST, W. (2011)].

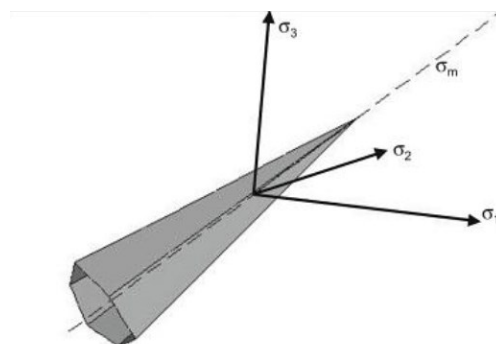


Abbildung 3-11: Mohr-Coloumb-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)]

Die Form der Fließfläche im Hauptspannungsraum entspricht einer Pyramide mit einer Grundfläche in Form eines unregelmäßigen Sechsecks (Abbildung 3-11). Für den Druck- und den Zugbereich gelten folglich unterschiedliche Grenzbedingungen.

Darauf hingewiesen wird, dass mit diesem Kriterium zwei Probleme verbunden sind [CHEN, W.F./LIU, X. L. (1990)]. Zum einen hat die mittlere Hauptspannung keinen Einfluss auf das Versagenskriterium, was konträr zu den Versuchsergebnissen genannter Autoren ist. Zum anderen entspricht das Versagenskriterium im Mohr-Coulomb-Diagramm einer Geraden, was einen konstanten inneren Reibungswinkel unterstellt. Diese Approximation ist nur für einen begrenzten Bereich von Seitendrücken vertretbar, da Versuche bereits gezeigt haben, dass die Entwicklung der Schädigung verschiedener Böden nichtlinear, d. h. durch einen Kurvenverlauf, geprägt ist. Dies wiederum impliziert, dass der innere Reibungswinkel vom isotropen Spannungszustand abhängig ist und abnimmt, wenn der hydrostatische Druck zunimmt [CHEN, W.F./LIU, X. L. (1990)].

### 3.4.3 Drucker- Prager- Bedingung

Die Drucker-Prager-Bedingung (D-P-Bedingung) gilt als vereinfachte Mohr-Coulomb-Bedingung. Im HSA stellt sich die geometrische Form der Fließfläche als Kreiskegel mit der Raumdiagonalen als Symmetrieachse dar. Umschließt der Kegel die Druckmeridiane der Mohr-Coloumb-Bedingungen, bezeichnet man dies als Kompressionskegel (Abbildung 3-12). Postulierte Vorteile der D-P-Bedingung im Vergleich zur M-C-Bedingung sind Symmetrie und der Einfluss der mittleren Hauptspannung auf das Fließkriterium [CHARLEZ, Ph. A. (1997)]. Die Fließbedingung wird nach [RUST, W. (2011)] dann erreicht wenn gilt:

$$F = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_V^{v.Mises} + 3 \cdot \beta \cdot \sigma_m - \sigma_F \leq 0 \quad (3-36)$$

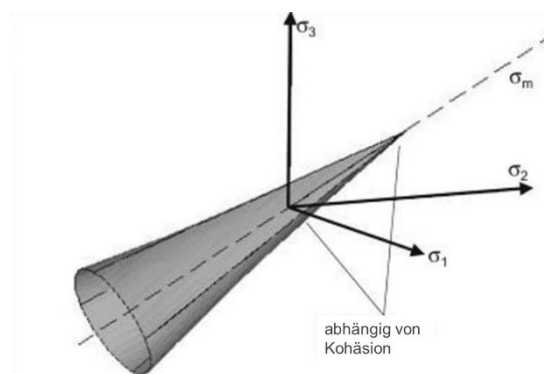


Abbildung 3-12: Drucker-Prager-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)]

Sowohl für M-C-Bedingungen als auch für D-P-Bedingungen werden in der Literatur verschiedenste Erweiterungen und Modifikationen vorgestellt. Grundsätzlich soll an dieser Stelle ergänzend erwähnt werden, dass die Plastifizierung ungebundener Gesteinskorn-

gemische nicht nur durch eine zu große Scherbeanspruchung entstehen kann, sondern auch durch reine isotrope Beanspruchung. Deshalb werden, nicht nur in der Geotechnik, sogenannte Kappen zur Begrenzung definiert, da sich Hexaeder oder Kegel nicht bis ins Unendliche fortsetzen können. [MEYWERK, M. (2007)]. Kappenverschiebungen resultieren aus Materialverfestigungen, infolge derer der Boden größere Scherfestigkeiten erträgt.

## 4. Durchführung der Versuche

### 4.1 Triaxialversuchsstand und Messdatenerfassung

Die dynamische Triaxial-Prüfanlage des Institutes für Stadtbauwesen und Straßenbau ermöglicht eine dreidimensionale Probekörperbelastung. Aufgrund der Rotationssymmetrie entsteht ein Spannungszustand, bei welchem die horizontalen Spannungskomponenten  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  gleich groß sind. Bei Triaxialversuchen wird grundsätzlich zwischen den sogenannten „echten“ (3-axial) sowie den „unechten“ (axial-symmetrisch) Triaxialversuchen unterschieden. Beim echten Triaxialversuch liegt im Probekörper ein dreidimensionaler Hauptspannungszustand vor. Aufgrund der Komplexität dieses Versuches, speziell unter der Berücksichtigung einer zyklischen Prüfung, wird fast ausnahmslos der unechte Triaxialversuch bevorzugt. Durch die Rotationssymmetrie des Probekörpers und den orthogonal zur vertikalen Achse aufgetragenen Manteldruck wird ein axial-symmetrischer Hauptspannungszustand, bei welchem folglich die horizontalen Hauptspannungskomponenten stets die gleiche Größe und Richtung aufweisen, erzeugt.

An der Prüfanlage der Professur für Straßenbau (Abbildung 4-1) können Kräfte statisch und schwellend in vertikaler Richtung von 65 kN (Druckkraft) bis 50 kN (Zugkraft) auf den Probekörper aufgebracht werden. In horizontaler Richtung können die Kräfte ebenfalls statisch und schwellend durch Mantel- bzw. Stützdruck aufgebracht werden.



Abbildung 4-1: Triaxialprüfstand der TU Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau



Das Maximum hierbei beträgt  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Die maximale Prüffrequenz beträgt  $10 \text{ Hz}$ . Für das Aufbringen des Manteldruckes wird ein inkompressibles Medium, im Beispiel der beschriebenen Anlage ein Hydrauliköl verwendet. Die Triaxialzelle, in welcher sich der Probekörper befindet, ist eine sogenannte Trockenzelle. Der Probekörper ist hierbei im Gegensatz zur Nasszelle durch eine Gummimembran vom Stützdruckmedium getrennt. Um die Gummimembran zu schützen, werden die zu prüfenden Probekörper unabhängig vom Prüfmaterial zusätzlich mit einer Latexhülle versehen (Abbildung 4-1). Um eventuelle Reibungseffekte zu verhindern, wird Glycerin als Gleitmittel zwischen Latexhülle und Gummimembran verwendet. Die vertikale und die horizontale Belastungsgröße sowie deren zeitlicher Belastungsverlauf können im Bereich der zulässigen Prüfparameter frei festgelegt werden. Für die Temperaturregelung erlaubt die Temperaturkammer eine Spanne von  $80 \text{ K}$  für einen Temperaturbereich von  $-20^\circ\text{C}$  bis  $+60^\circ\text{C}$ . Verformungsänderungen des Probekörpers werden durch zwei getrennte Messsysteme aufgezeichnet. Das axiale Messsystem (AMS) ist ein Magnetmesssystem, welches berührungsfreies Messen der vertikalen Probekörperverformungen erlaubt. 6 Magnete auf zwei Messebenen und einer Anordnung von  $120^\circ$  pro Ebene messen vertikale Verschiebungen innerhalb des Probekörpers. Die Messgenauigkeit dieses Systems beträgt  $1/1000 \text{ mm}$ . Das radiale Messsystem (RMS) besteht aus 9 induktiven Wegaufnehmern, welche in drei Messebenen angeordnet sind. Der Winkelversatz pro Ebene beträgt ebenfalls  $120^\circ$  (Abbildung 4-2). Als Probekörper werden ausschließlich schlanke, zylindrische Probekörperformen mit einem Verhältnis von  $h_0/d_0=2/1$  verwendet. Da beide Messsysteme im mittleren Drittel (Messbasis jeweils  $150 \text{ mm}$ ) angeordnet sind, ist der Messbereich unbeeinflusst von Reibungseffekten infolge der Lasteinleitungs- bzw. Kontaktflächen.

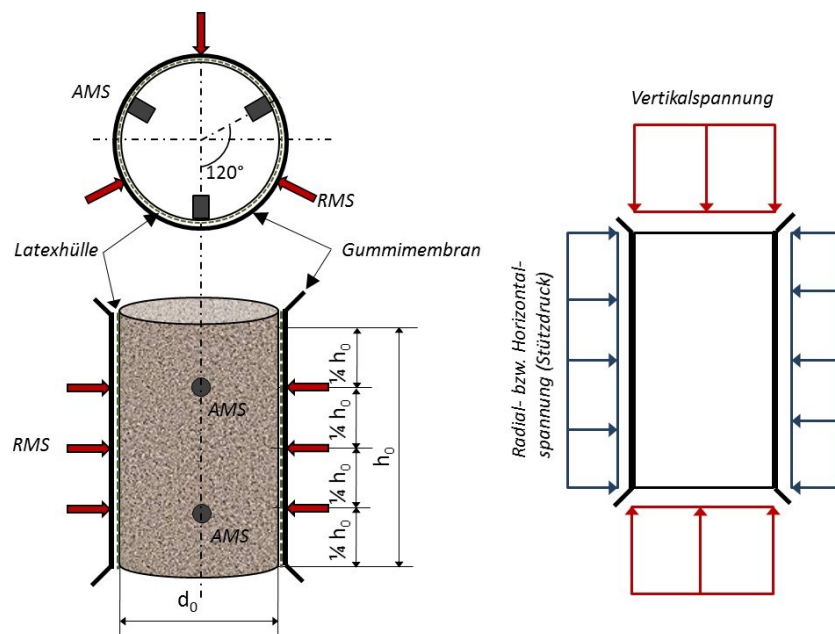


Abbildung 4-2: Anordnung des axialen Messsystems (AMS) und des radialen Messsystems (RMS) sowie die grundsätzliche Belastungssituation bei „unechter“ triaxialer Belastung

## 4.2 Untersuchungsmaterial

Als Untersuchungsmaterial wurde ein rundkörniges Gesteinskorngemisch 0/45 für Frostschutzschichten (FSS) gem. TL SoB-StB (Abbildung 4-3) verwendet (Anlage A). Die Wahl eines rundkörnigen Gesteinskorngemisches basiert auf der empfindlichen Prüf- und Messtechnik der Triaxialzelle. Gebrochene Gesteinskorngemische und daraus resultierende scharfkantige Oberflächen können in Kombination mit großen Manteldrücken und/oder großer Lastwechselzahl zur Beschädigung der Zellmembran und folglich zum Austritt der Manteldruckflüssigkeit führen.

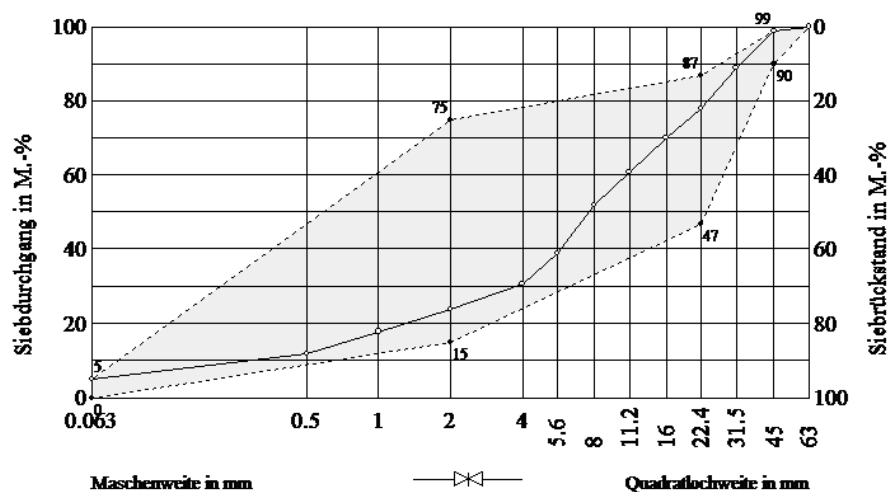


Abbildung 4-3: Korngrößenverteilung des Untersuchungsmaterials 0/45 (FSS)

Grundsätzlich wurde das Probenmaterial bis zur Massenkonzanz getrocknet. Nach definierter Wasserzugabe (entsprechend des gewünschten Wassergehaltes) wurde das Probenmaterial gleichmäßige durchmischt. Um eine möglichst homogene Durchmischung sowie Wasseraufnahme zu erreichen, wurde nach dem ersten Mischvorgang eine ca. einstündige Pause vorgesehen, bevor die zweite und letzte Durchmischung erfolgte.

## 4.3 Materialvorbereitung und Probekörperherstellung

Das Probekörpermaterial wurde in einer zylindrischen, verschließbaren und innen polierten Stahlform lagenweise eingebaut und verdichtet (Anlage B). Die Höhe der Stahlform beträgt  $h = 320$  mm, der Durchmesser im vollständig geschlossenem Zustand (mit Innenzylinder)  $d = 150$  mm. Zusätzlich wurde der Stahlzylinder durch einen Kunststoffinnenzylinder ergänzt, welcher den Ausschalprozess deutlich erleichtert. Durch die Kombination aus Innen- und Außenzylinder wird ein ungestörter Ausbau des Probekörpers nach der Verdichtung erreicht, wofür eine essentielle Notwendigkeit besteht. (Abbildung 4-4 bis Abbildung 4-7).



Abbildung 4-4: Polierter Stahlzylinder mit Grundplatte



Abbildung 4-5: Stahlzylinder und Kunststoffinnenzylinder sowie eingefülltem Untersuchungsmaterial



Abbildung 4-6: Stahlzylinder und Kunststoffinnenzylinder mit bis zur oberen Messebene verdichtetem Material und positionierten Magneten



Abbildung 4-7: Ausgeschalter Probekörper mit Kunststoffinnenzylinder

Um die entsprechenden Probekörper möglichst homogen herstellen zu können, ist ein lagenweiser Einbau zwingend erforderlich. Die Verdichtung des Untersuchungsmaterials erfolgt mittels eines Verdichtungshammers sowie eines speziell dafür angefertigten Verdichtungsstempels. Für die Festlegung der zu verdichtenden Lagenhöhen sind dabei drei relevante Randbedingungen zu beachten.

1. Während bei gebundenen Probekörpern die Magnete des AMS in entsprechend positionierte Bohrlöcher eingeklebt werden, müssen die Magnete bei Probekörpern aus ungebundenen Materialien während der Probekörperherstellung so positioniert werden, dass im Zuge der Verdichtung Lageänderung nahezu ausgeschlossen werden können. Erreicht wird dies durch den lagenweisen Einbau und ausreichende Verzahnung zwischen den Magneten und dem Material während der Verdichtung.

Bei der Herstellung des Probekörpers sind die Höhen der Messebenen des Axialmesssystems (Abbildung 4-8) Zwangspunkte und folglich exakt einzuhalten. Damit sind zwei Lagengrenzen sowie deren Höhen vorgegeben.

2. Da die Verdichtung mit einem Verdichtungshammer erfolgte, muss sehr genau darauf geachtet werden, dass die Magnete des Messsystems hinreichend überdeckt sind, um Schäden am Messsystem während der Verdichtung zu vermeiden. Daraus resultiert die Begrenzung der Einbaulage nach unten mit einer vorzuhaltenden Mindestüberdeckungshöhe.
3. Um bei manuelle eingebrachter Verdichtungsenergie eine gleichmäßige, homogene Verdichtung pro Einbaulage bei gleichzeitiger minimaler Kornzerstörung an der Kontaktfläche des Verdichtungsstempels zu erreichen, muss die Lagenhöhe zusätzlich nach oben begrenzt werden.

Um den genannten Kriterien genügen zu können, stellte sich im Ergebnis unterschiedlicher Herstellungsprozeduren heraus, dass ein 4-lagiger Einbau- und Verdichtungsprozess die favorisierte Herstellungsvariante darstellt. Das verwendete Systemraster zeigt Abbildung 4-8. Die Probekörperherstellung erfolgte grundsätzlich im unmittelbaren Anschluss an die Materialvorbereitung. Bei der Herstellung der Probekörper wurde prinzipiell nach dem Einbau und der Verdichtung einer i-ten Schicht die Oberfläche aufgelockert, um im Anschluss die i+1 te Schicht mit möglichst guter Verzahnungsstruktur einzubauen und ein aufeinanderliegendes „Schichtensystem“ zu vermeiden.

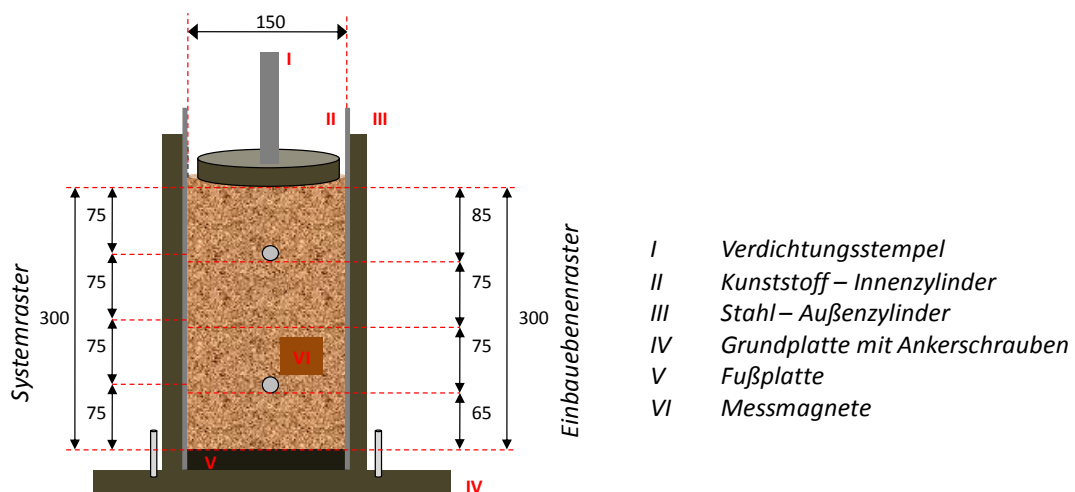


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Probekörperherstellung

Als problematisch bei der Herstellung der Probekörper erwiesen sich die Größtkornfraktionen unmittelbar im Bereich der fixierten Magnete. Die größten Gesteinskörner des untersuchten Gemisches können zu Lageänderungen der Magnete während der Verdich-



tung und damit zu einem unbrauchbaren Probekörper gleichermaßen führen. Zu befürchten sind außerdem bei der Verdichtung bei direktem Kontakt Schäden an den Magneten. Um diese Probleme grundsätzlich ausschließen zu können, wurde die KGV 0/45 des Ausgangsmaterials modifiziert und abgesiebt (oberer Siebdurchgang 22,4 mm), so dass für alle Versuche ausschließlich eine KGV 0/22 mit einer Proctordichte von  $2,215 \text{ g/cm}^3$  sowie einem optimalen Wassergehalt von 6,1 M.-% verwendet wurde. Die Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 zeigen einen fertig hergestellten Probekörper mit Latexmembran unmittelbar vor dem Einbau in die Triaxialprüfanlage sowie die im Probekörper positionierten Magnete.



Abbildung 4-9: Fertiger Probekörper und Latexmembran vor dem Einbau in Triaxialzelle



Abbildung 4-10: Fixierter Magnet der oberen Messebene im Probekörper

### 4.4 Aufbereiten der Messdaten

Ausgehend von der Belastungsart im Rahmen der durchgeführten Versuche mit dem „unechten“ Triaxialversuches wurden Vertikalkraft und Radialdruck zyklisch aufgebracht und Amplituden sowie Frequenzen (je nach Fragestellung) variiert (Abbildung 4-11).

Zur Berechnung der aus der Belastung resultierenden Verformung bzw. Dehnung können unterschiedliche Herangehensweisen Anwendung finden. Für die Berechnung der elastischen Axialdehnungen (Gesamtdehnung) aus den Axialverformungen werden üblicherweise die Verformungsmaximalwerte, d. h. die Amplituden verwendet, meist als Mittelwerte über eine festgelegte Anzahl aufeinanderfolgender Lastzyklen. Gleichmaßen können Regressionsansätze verwendet werden, welche die aus der cosinusförmigen Belastung resultierende cosinusförmige Materialantwort approximieren. Für die im Rahmen der vorliegenden gewählte Art der Auswertung lagen folgende Überlegungen zugrunde:

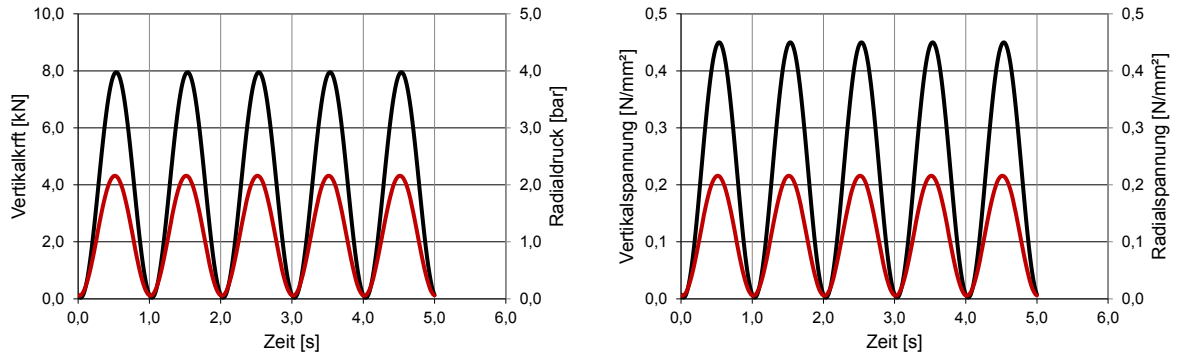


Abbildung 4-11: Prinzipdarstellung der Belastung einer Probe im „unechten“ Triaxialversuch (Kompression). Vertikalkraft und Radialdruck (links), Vertikalspannung und Radialspannung (rechts)

Da ausschließlich Verformungsamplitudenwerte Verwendung finden (und der Be- und Entlastungsweg unberücksichtigt bleibt), sind die Extremwerte zu lokalisieren, was einfach zu realisieren ist. Abbildung 4-12 zeigt exemplarisch die axiale Materialantwort bei einer Belastungsfrequenz von 1 Hz und positiver Probekörpertemperatur. Abbildung 4-13 zeigt am Beispiel des Lastwechsels  $i$  die Minimalverformung (sowohl am Anfang als auch am Ende) und die Maximalverformung. Die Amplitude der Vertikalverformung berechnet sich hierbei nach Glg. 4-1.

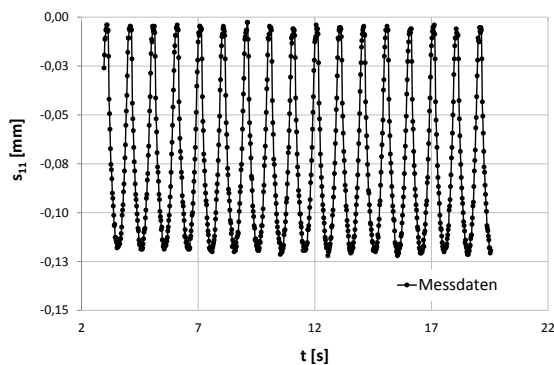


Abbildung 4-12: Axialverformung (Messdaten) bei thermisch unbeeinflusstem Material

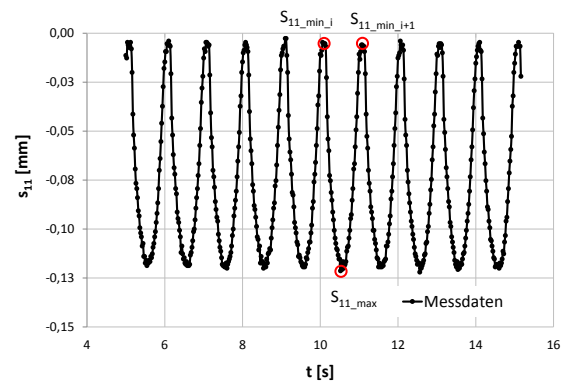


Abbildung 4-13: Messdatenauswertung bei thermisch unbeeinflusstem Material

$$A_{s_{11}} = \frac{s_{11\_max} - \frac{\Delta s_{11\_min}}{2}}{2} \quad (4-1)$$

mit:

- $A_{s_{11}}$  Amplitude am Lastwechsel  $i$
- $s_{11\_max}$  Maximalverformung am Lastwechsel  $i$
- $\Delta s_{11\_min}$  Differenz aus Minimalverformung am Anfang von Lastwechsel  $i+1$  und Minimalverformung am Anfang von Lastwechsel  $i$

Bei dieser Art der Auswertung ist die Ausprägung der cosinusförmigen Materialantwort, welche, z. B. infolge unterschiedlicher Belastung oder unterschiedlicher Materialzustände, unterschiedlich sein kann, unbedeutend. Auch das Auftreten gleichzeitiger reversibler und irreversibler Verformungen ist für die Auswertung der elastischen Gesamtverformung pro Lastzyklus unerheblich.

*An dieser Stelle wird bereits auf Kapitel 6 vorgegriffen und angemerkt, dass durch die Art der Materialbeanspruchung der Fokus ausschließlich auf der elastischen (quasi-elastischen) Materialantwort liegt.*

Bei der Verwendung einer Regressionsfunktion wird üblicherweise das Bestimmtheitsmaß als charakteristische Güte der Anpassung verwendet. Da die Anpassung aber über alle Messpunkte pro Lastwechsel erfolgt (im konkreten Fall über 50 Messpunkte pro Lastwechsel), bedeutet ein großes Bestimmtheitsmaß nicht zwangsläufig eine „treffende“ Approximation der Verformungsmaximalwerte. Über- oder Unterschätzungen der elastischen Materialantwort führen in der weiteren Folge zu Über- oder Unterschätzungen der charakteristischen Materialkennwerte.

Für die Auswertung aller Versuche im positiven °C-Temperaturbereich erfolgte die Berechnung der Dehnungsamplituden als Mittelwert über 10 aufeinanderfolgende Lastzyklen nach zuvor erläuteter Methode. Bei Temperaturen  $< 0\text{ °C}$  ändert sich die elastische Materialantwort erheblich. Die Materialverformungen werden im Vergleich zu Verformungen im positiven °C-Temperaturbereich sehr viel kleiner (Abbildung 4-14).

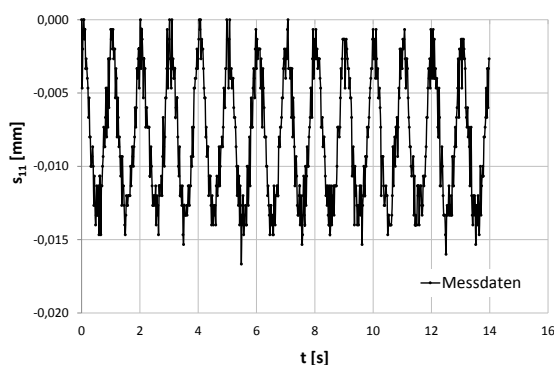


Abbildung 4-14: Messdaten bei thermisch beeinflusstem Material ( $T = -10^\circ$ )

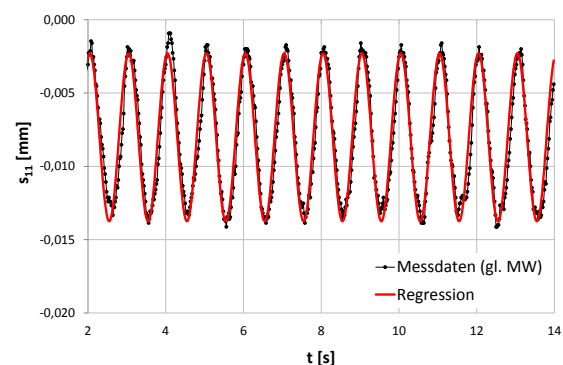


Abbildung 4-15: Messdatenauswertung bei thermisch beeinflusstem Material

Erschwerend kommt hinzu, dass definierte Spannungsverhältnisse nicht überschritten werden sollen, um innerhalb quasi-elastischen Verhaltens zu bleiben (vgl. Kapitel 6). Aus den genannten Gründen werden die Messdaten in einem ersten Schritt durch Bildung des gleitenden Mittelwertes (Glg. 4-2) über jeweils 5 aufeinanderfolgende Messpunkte (bei je

50 Messpunkten pro Lastzyklus) aufbereitet, um Veränderungen der Materialantwort besser analysieren zu können.

$$S_{11gl_{MW}}(t) = \frac{S_{11}(t-2)+S_{11}(t-1)+S_{11}(t)+S_{11}(t+1)+S_{11}(t+2)}{5} \quad (4-2)$$

mit:

$S_{11gl\_MW}(t)$  gleitender Mittelwert der Axialverformung zum Zeitpunkt t

$S_{11}(t)$  Axialverformung zum Zeitpunkt t

In einem zweiten Schritt wird die Amplitude über eine Cosinusregression (für eine ungedämpfte Schwingung) über 10 aufeinanderfolgende Lastzyklen nach Glg. 4-3 berechnet (Abbildung 4-15).

$$S_{11}(t) = a_{11} + a_{22} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (4-3)$$

mit:

$S_{11}(t)$  Axialverformung zum Zeitpunkt t

$a_{11}$  Absolutglied

$a_{22}$  Amplitude

$\varphi$  Phasenverschiebung

f Frequenz

t Zeit



## 5 Berechnung charakteristischer Materialkennwerte

### 5.1 Grundlagen zum elastisches Materialverhalten

Im Rahmen der Versuchsauswertung wurde das elastische Materialverhalten (Spannungs-Dehnungsverhalten) untersucht und zur Charakterisierung dessen die erforderlichen Materialkennwerte Elastizitätsmodul und Querdehnzahl berechnet. Die dafür zugrunde gelegten Annahmen und Voraussetzungen werden nachfolgend erläutert.

Elastisches Materialverhalten im Sinne des Hookeschen Gesetzes basiert bekanntermaßen auf der Annahme einer linearen Beziehung zwischen Spannung und Dehnung. Die Beziehung für den uniaxialen Fall (beispielsweise für den Zugstab) lautet folglich:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} \quad (5-1)$$

und zusätzlich für den räumlichen Fall, unter der Einwirkung von Normalspannungen, sowie unter der Voraussetzung von Isotropie:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{E} \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E} \quad (5-3)$$

Eine auf einen Körper aufgebrachte Spannung bewirkt nach dem Poissonschen Gesetz neben der Dehnung in Spannungsrichtung eine zusätzliche Dehnung orthogonal zur aufgebrachten Spannungsrichtung – die sogenannte Querdehnung bzw. Querkontraktion, dargestellt in der Form für linear-elastisches, isotropes Materialverhalten

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\mu \cdot \varepsilon_{xx} \quad (5-4)$$

oder unter nach Einsetzen von Glg. (5-1) in Glg. (5-4) in nachfolgender Form [DAVIS, R. O./SELVADURAI, A. P. S. (1996)]:

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\mu \cdot \frac{\sigma_{xx}}{E} \quad (5-5)$$

Für die Dehnungen der drei Raumrichtungen gilt damit:

$$\varepsilon_{XX} = \frac{\sigma_{XX}}{E} \rightarrow \varepsilon_{YY} = \varepsilon_{ZZ} = -\mu \cdot \frac{\sigma_{XX}}{E} \quad (5-6)$$

$$\varepsilon_{YY} = \frac{\sigma_{YY}}{E} \rightarrow \varepsilon_{XX} = \varepsilon_{ZZ} = -\mu \cdot \frac{\sigma_{YY}}{E} \quad (5-7)$$

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{\sigma_{ZZ}}{E} \rightarrow \varepsilon_{XX} = \varepsilon_{YY} = -\mu \cdot \frac{\sigma_{ZZ}}{E} \quad (5-8)$$

Die hier verwendete Vorzeichenkonvention kennzeichnet Dehnungen in Koordinatenrichtung positiv, Dehnungen entgegen der Koordinatenrichtung negativ. Der 3-dimensionale räumliche Spannungszustand wird durch Überlagerung (Superposition) der Einzeldehnungen berechnet. Somit gilt für die Dehnung in x-Richtung bei räumlicher Spannungseinwirkung

$$\varepsilon_{XX} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{XX} - \mu(\sigma_{YY} + \sigma_{ZZ})) \quad (5-9)$$

und für die Dehnungen in beide verbleibenden Raumrichtungen [DAVIS, R. O./ SELVADURAI, A. P. S. (1996)]

$$\varepsilon_{YY} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{YY} - \mu(\sigma_{XX} + \sigma_{ZZ})) \quad (5-10)$$

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{ZZ} - \mu(\sigma_{YY} + \sigma_{XX})) \quad (5-11)$$

Das allgemeine Hookesche Gesetz für den räumlichen Dehnungszustand ergibt sich folglich durch das Auflösen der gezeigten Gleichungen nach den Spannungen.

$$\sigma_{XX} = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \cdot [(1 - \mu) \cdot \varepsilon_{XX} + \mu \cdot (\varepsilon_{YY} + \varepsilon_{ZZ})] \quad (5-12)$$

$$\sigma_{YY} = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \cdot [(1 - \mu) \cdot \varepsilon_{YY} + \mu \cdot (\varepsilon_{XX} + \varepsilon_{ZZ})] \quad (5-13)$$

$$\sigma_{ZZ} = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \cdot [(1 - \mu) \cdot \varepsilon_{ZZ} + \mu \cdot (\varepsilon_{XX} + \varepsilon_{YY})] \quad (5-14)$$

In allgemeiner Form (unter der Einwirkung von Normal- und Schubspannungen) liefern die Gleichgewichtsbedingungen am würfelförmigen Element insgesamt 18 Spannungskomponenten, welche unter den Voraussetzungen von Gleichgewichtsbedingungen (statisches Gleichgewicht) auf 9 Komponenten reduziert werden können. Lineares Verhalten impliziert, dass jedem Verzerrungszustand ein eindeutiger Spannungszustand zugeordnet werden kann. Folglich ist der Spannungstensor (und ebenfalls der Dehnungstensor) mit 9 Werten besetzt. Je nach Art der Indizierung stellt sich dies wie folgt dar:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad 5-15$$

(Mit den Symmetriebedingungen von Spannungs- und Dehnungskomponenten, ausgedrückt durch  $\tau_{ij} = \tau_{ji}$  und  $i \neq j$ )

Auf die Darstellung des Verzerrungstensors wird an dieser Stelle verzichtet. Für die allgemeine Darstellung des Hookeschen Gesetzes in Matrixnotation der Form

$$[\sigma] = [C] \cdot [\varepsilon] \quad 5-16$$

bedeutet dies, dass die Steifigkeitsmatrix [C] mit 36 Komponenten besetzt ist [CHUNG, T. J. (2007)].

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{1111}\varepsilon_{11} + C_{1122}\varepsilon_{22} + C_{1133}\varepsilon_{33} + C_{1112}2\varepsilon_{12} + C_{1123}2\varepsilon_{23} + C_{1113}2\varepsilon_{13} \\ \sigma_{22} &= C_{2211}\varepsilon_{11} + \dots + C_{2213}2\varepsilon_{13} \\ \sigma_{33} &= \dots \\ \tau_{12} &= \dots \\ \tau_{23} &= \dots \\ \tau_{13} &= \dots \end{aligned} \quad 5-17$$

Die Koeffizienten, welche Spannungen und Dehnungen miteinander verknüpfen, werden als Elastizitätskonstanten bezeichnet und können wie nachfolgend dargestellt berechnet werden (Beispielhaft gezeigt für C1111)

$$C_{1111} = 2\mu' + \lambda \quad 5-18$$

Die beiden Konstanten  $\lambda$  und  $\mu'$  sind die sogenannten Lamé-Konstanten, durch welche der Zusammenhang zu Elastizitätsmodul  $E$  und Querdehnzahl hergestellt wird. Die Lamé-Konstante  $\mu'$  ist hierbei von der Querdehnzahl  $\mu$  zu unterscheiden.

$$\lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad 5-19$$

$$\mu' = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad 5-20$$

Durch Einsetzen von Glg. 5-19 und 5-20 in Glg. 5-18 folgt am Bsp. von  $C_{1111}$

$$C_{1111} = \frac{E \cdot (1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (5-21)$$

In Matrixnotation und unter Verwendung der Lamé Konstanten sowie unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften von Spannungs- und Dehnungstensor stellt sich das Gleichungssystem wie folgt dar:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu' + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & 2\mu' + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & 2\mu' + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{bmatrix} \quad (5-22)$$

Werden die Lamé-Konstanten durch Elastizitätsmodul  $E$  und Querdehnzahl  $\mu$  ersetzt, kann die Steifigkeitsmatrix  $[C]$  für den allgemeinen Spannungszustand in nachfolgender Form ausgedrückt werden [CHUNG, T. J. (2007)].

$$[C] = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 - \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 - \mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1 - 2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (5-23)$$

Übertragen auf den Hauptspannungszustand (und damit auf einen „echten“ Triaxialversuch) reduziert sich der Ausdruck auf die vereinfachte Form:

$$[C] = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu \\ & 1-\mu & \mu \\ & & 1-\mu \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

Durch das Hookesche Gesetz kann, unter der Annahme von Isotropie, d. h. Richtungsunabhängigkeit, das Materialverhalten für einen beliebigen Beanspruchungszustand mit ausschließlich zwei maßgebenden Materialparametern (Elastizitätsmodul und Querdehnzahl) ausgedrückt werden. Im Gegensatz dazu würden für orthotrope Materialien infolge der Richtungsabhängigkeit drei E-Moduln, drei Schermoduln und sechs Querdehnzahl-Verhältnisse erforderlich werden [OERTEL, H./RUCK, S. (2012)]. Für den „unechten Triaxialversuch“, d. h. für rotationssymmetrische Bedingungen und Richtungsunabhängigkeit gilt:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{xx/yy} / \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{22/33} \quad (5-25)$$

sowie

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xx/yy} / \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{22/33} \quad (5-26)$$

weshalb die Gleichungen für den Hauptspannungszustand (Glg. (5-9) bis (Glg. 5-11)) wie folgt dargestellt werden können:

$$\varepsilon_{XX/YY} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{XX/YY} - \mu(\sigma_{XX/YY} + \sigma_{ZZ})) \quad (5-27)$$

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{ZZ} - \mu(\sigma_{XX/YY} + \sigma_{XX/YY})) \quad (5-28)$$

Im Rahmen der Auswertung von Triaxialversuchen wird die Indizierung der Koordinatenachsen derart gewählt, dass die vertikale Achse der Richtung der großen Hauptspannung ( $\sigma_1$  bzw.  $\sigma_{11}$ ) entspricht und mit 1-Achse bzw. 11-Achse bezeichnet wird. Die Bezeichnung wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, so dass Spannungen und Dehnungen in vertikale Richtung mit 11 und in horizontale Richtung (auf Grund der Rotationssymmetrie) mit 22/33 indiziert werden. Ausgehend von Glg. (5-29)

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{11} - 2\mu \cdot \sigma_{22/33}) \quad (5-29)$$

und Glg. (5-30)

$$\varepsilon_{22/33} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{22/33} - \mu \cdot (\sigma_{22/33} + \sigma_{11})) \quad (5-30)$$

folgt nach Umstellen und Ersetzen von  $\mu$  (unter der Voraussetzung von Isotropie)

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \cdot \left( \sigma_{11} - 2\sigma_{22/33} \cdot \left( \frac{\sigma_{22/33} - \varepsilon_{22/33} \cdot E}{(\sigma_{11} + \sigma_{22/33})} \right) \right) \quad (5-31)$$

bzw.

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \cdot \left( \frac{\sigma_{11}^2 + \sigma_{11} \cdot \sigma_{22/33} - 2 \cdot \sigma_{22/33}^2 + 2 \cdot \sigma_{22/33} \cdot \varepsilon_{22/33} \cdot E}{(\sigma_{11} + \sigma_{22/33})} \right) \quad (5-32)$$

oder durch Umstellen nach E

$$E = \frac{\sigma_{11}^2 + \sigma_{11} \cdot \sigma_{22/33} - 2 \cdot \sigma_{22/33}^2}{\varepsilon_{11} \cdot \sigma_{11} + \varepsilon_{11} \cdot \sigma_{22/33} - 2 \cdot \varepsilon_{22/33} \cdot \sigma_{22/33}} = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22/33}) \cdot (\sigma_{11} + 2 \cdot \sigma_{22/33})}{\varepsilon_{11} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22/33}) - 2 \cdot \varepsilon_{22/33} \cdot \sigma_{22/33}} \quad (5-33)$$

Da bei Nichtlinearität (welche im mechanischen Verformungsverhalten ungebundener Tragschichtmaterialien vorliegt) die Hookesche Formulierung ausschließlich für infinitesimal kleine Spannungs-Dehnungsänderungen betrachtet werden kann, muss die Berechnung inkrementell in der Form

$$E = \frac{(\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{22/33}) \cdot (\Delta\sigma_{11} + 2 \cdot \Delta\sigma_{22/33})}{\Delta\varepsilon_{11} \cdot (\Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{22/33}) - 2 \cdot \Delta\varepsilon_{22/33} \cdot \Delta\sigma_{22/33}} \quad (5-34)$$

erfolgen. Hierbei ist ersichtlich, dass die Steifigkeit aus inkrementellen Änderungen von Spannung und Dehnung (in horizontaler und vertikaler Richtung) resultiert.

Bei VCP-Versuchsdurchführung entspricht eine Änderung von Spannung oder Dehnung grundsätzlich der Spannungsänderung beider Spannungskomponenten (vertikal und radial). Bei Anwendung einer CCP-Versuchsdurchführung vereinfacht sich die Berechnung des Elastizitätsmoduls, da gilt  $\Delta\sigma_{22/33} = 0$ .

$$E = \frac{(\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{22/33}) \cdot (\Delta\sigma_{11} + 2 \cdot \Delta\sigma_{22/33})}{\Delta\varepsilon_{11} \cdot (\Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{22/33}) - 2 \cdot \Delta\varepsilon_{22/33} \cdot \Delta\sigma_{22/33}} = \frac{\Delta\sigma_{11}}{\Delta\varepsilon_{11}} \quad (5-35)$$

In gleicher Form kann die Querdehnzahl unter den genannten Voraussetzungen berechnet werden.

$$\mu = \frac{\varepsilon_{22/33} \cdot \sigma_{11} - \varepsilon_{11} \cdot \sigma_{22/33}}{2 \cdot \varepsilon_{22/33} \cdot \sigma_{22/33} - \varepsilon_{11} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22/33})} \quad (5-36)$$

Für infinitesimal kleine Spannungs-Dehnungsänderungen gilt damit:

$$\mu = \frac{\Delta\varepsilon_{22/33} \cdot \Delta\sigma_{11} - \Delta\varepsilon_{11} \cdot \Delta\sigma_{22/33}}{2 \cdot \Delta\varepsilon_{22/33} \cdot \Delta\sigma_{22/33} - \Delta\varepsilon_{11} \cdot (\Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{22/33})} \quad (5-37)$$

Die nachfolgenden Abbildungen Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 verdeutlichen den grundsätzlichen Unterschied triaxialer Beanspruchung hinsichtlich der Art der Testprozedur.

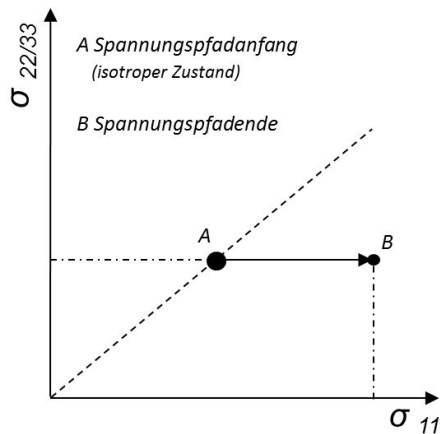


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung eines Kompressionsspannungspfades bei einer CCP-Testprozedur

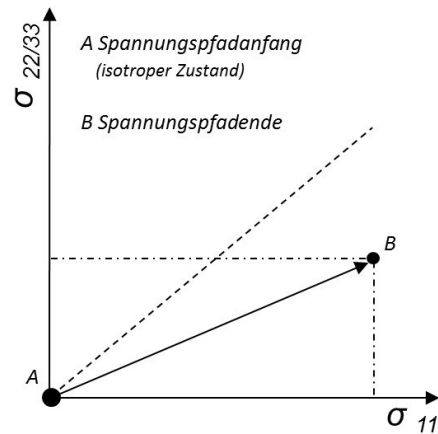


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung eines Kompressionsspannungspfades bei einer VCP-Testprozedur

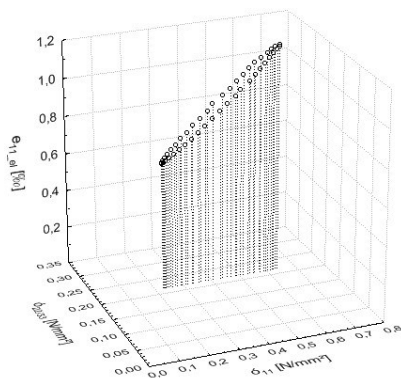


Abbildung 5-3: Materialantwort (Hystereseschleife) infolge eines Kompressionsspannungspfades bei einer CCP-Testprozedur

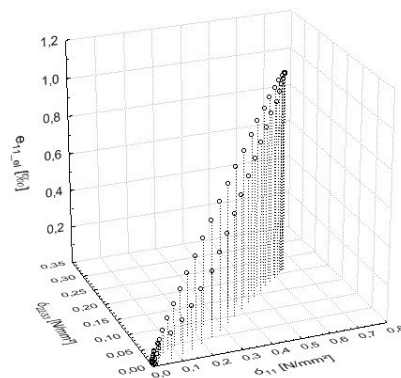


Abbildung 5-4: Materialantwort (Hystereseschleife) infolge eines Kompressionsspannungspfades bei einer VCP-Testprozedur

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen schematisch Kompressionsspannungspfade (Spannungspfadanzug und -ende sowie die Spannungspfadrichtung) sowie die daraus resultierende Materialdehnung sowohl für die Be- als auch für die Entlastung mit charakteristischer Hystereseaussprägung. Deutlich wird, dass infolge einer CCP-Testprozedur nach Glg. (5-35) (siehe auch Abbildung 5-1 und Abbildung 5-3) ein inkrementeller oder tangentialer Steifigkeitsmodul berechnet werden kann, welcher bezogen auf die einzelne Hystereseschleife nur von der großen Hauptspannung (hier von  $\sigma_{11}$ ) abhängig ist, da die kleine Hauptspannung konstant gehalten wird. Gleichermäßen ersichtlich ist, dass infolge einer VCP-Testprozedur nach Glg. (5-34) (Abbildung 5-2 und Abbildung 5-4) ein inkrementeller Steifigkeitsmodul berechnet wird, welcher bezogen auf die einzelne Hystereseschleife sowohl von der großen Hauptspannung (im Beispiel  $\sigma_{11}$ ) als auch von der kleinen Hauptspannung (im Beispiel  $\sigma_{22/33}$ ) abhängt. Die berechneten Elastizitätsmoduln sind für beide zuvor erläuterten Arten der Versuchsdurchführung als richtungsunabhängige Materialkenngrößen zu verstehen.

### 5.2 Berechnungsannahmen und Festlegungen

In Kapitel 4 wurde der prinzipielle Aufbau der verwendeten Triaxialanlage dargestellt. Neben den verschiedenen Vorteilen der Trockenzelle gegenüber einer Nasszelle besteht der Nachteil der verwendeten Trockenzelle darin, dass das radiale induktive Wegmesssystem keinen direkten Kontakt zum Probekörper besitzt. Während sich der Probekörper im „trockenen“ Zentrum der Zelle befindet, ist das Wegmesssystem auf der „nassen“ Seite (im Öl zur Aufbringung des Stützdruckes) angeordnet. Zwischen den Tastspitzen der Wegnehmer und dem Probekörper befinden sich demzufolge die Gummimembran (zur Abgrenzung des Stützdruckfluides vom Probekörper) sowie die Latexmembran zur Reibungsminderung. Aus dieser Konstellation resultiert ein „gestörtes“ und im Rahmen dieser Arbeit (für die elastische Materialantwort) nicht ausgewertetes radiales Wegmesssignal. Da die Stützdruckfluidbewegung ebenfalls nicht mess- und auswertbar ist, können Volumendehnungen infolge der zyklischen Beanspruchung nicht erfasst werden. Daraus folgt, dass der E-Modul nicht nach Glg. (5-34) berechnet werden kann. Die in Anbetracht dieser Schwierigkeit gewählte Herangehensweise zur Ermittlung charakteristischer Materialkennwerte wird nachfolgend dargestellt.

#### Berechnung der elastischen Axialdehnung:

Auf den Probekörper werden unterschiedliche Kombinationen aus Vertikalkraft und horizontalem Stützdruck zyklisch aufgebracht entsprechend den zu untersuchenden Beanspruchungsbereichen. Die daraus resultierende Axialverformung (Verformungsamplitude) wird



messtechnisch erfasst und daraus die elastische Axialdehnung berechnet. Für alle untersuchten Beanspruchungen wird im Weiteren folgender funktionale Zusammenhang formuliert

$$\varepsilon_{11\_el} = f(q; p) \quad (5-38)$$

und darauf basierend die Einflusscharakteristik infolge veränderter Materialzustände, aber auch infolge thermischer Beeinflussung auf die elastische Materialantwort untersucht. Zur vergleichenden Charakterisierung ausgewählter Beanspruchungszustände bei definierten Randbedingungen wird zudem die elastische Materialantwort als Funktion der Spannungspfadlänge und –winkel beschrieben.

$$\varepsilon_{11\_el} = f(L; \gamma) \quad (5-39)$$

Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 verdeutlichen die prinzipiellen funktionalen Zusammenhänge.

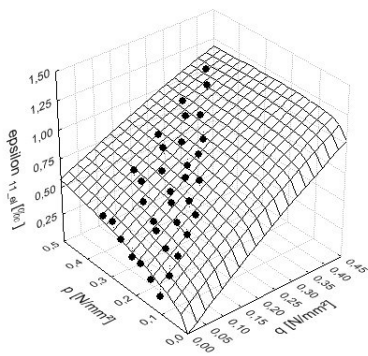


Abbildung 5-5: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator und der mittlerer Spannung

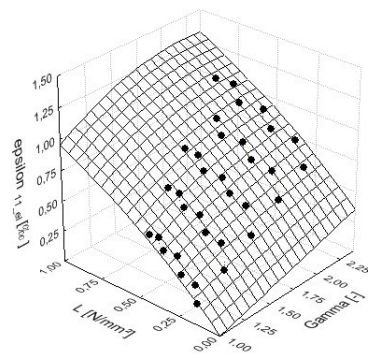


Abbildung 5-6: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und –winkel

#### Berechnung des Elastizitätsmoduls:

Wird die elastische Axialdehnung funktional, als eine von Spannungspfadlänge und –winkel abhängige Größe definiert wird, folgt daraus, dass die Dehnung bei konstantem Spannungspfadwinkel lediglich durch die Spannungspfadlänge beeinflusst wird (Abbildung 5-6). Würde auf Grundlage dieses Zusammenhanges eine skalare Größe, interpretierbar als Modul, durch Differentiation nach L in der Form

$$\frac{d\varepsilon_{11\_el} f(L; \lambda)}{dL} = \frac{1}{L_M} \quad (5-40)$$

definiert werden, könnte dieser ggf. als „Verformungsmodul“ unter triaxialen Bedingungen (VCP) interpretiert werden.

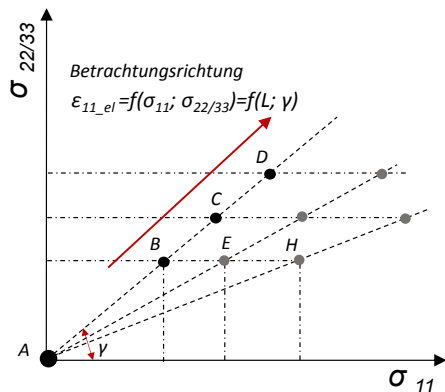


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Spannungspfade sowie der daraus resultierenden funktionalen Abhängigkeit der elastischen Axialdehnung

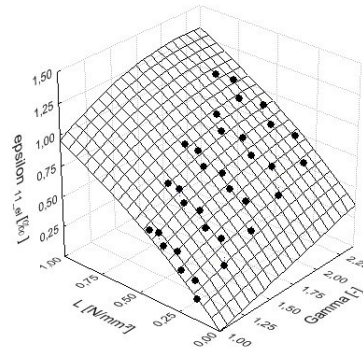


Abbildung 5-8: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und -winkel

Mit Hilfe dieses Moduls kann das Verformungsverhalten des Materials zwar vergleichend bewertet und der Einfluss sich ändernder Randbedingungen analysiert werden, jedoch mit der großen Einschränkung, dass dieser Modul nicht als Materialkennwert im Sinne eines Elastizitätsmoduls verstanden werden darf. Das führt zwangsläufig dazu, dass eine Implementierung dieser Größe in Softwarelösungen zu numerischen Nachrechnungen der Versuche oder für Dimensionierungszwecke nicht zielführend ist.

Der Elastizitätsmodul im „Hookeschen Sinne“ kann für den uniaxialen, linear elastischen Fall als Proportionalitätskonstante verstanden werden (Abbildung 5-9, links). Liegen Nichtlinearität (bei Be- oder Entlastung) vor, ist der Elastizitätsmodul eine spannungsabhängige Größe (Abbildung 5-9, Mitte). In der Literatur wird dabei der Elastizitätsmodul unterschiedlich definiert. Verwendet werden sowohl der Sekantenmodul für definierte kleine Änderungen von Spannung und Dehnung (teilweise auch mit Basis im Koordinatensprung = Ursprungssekantenmodul) als auch der Tangentenmodul (Abbildung 5-9, rechts).

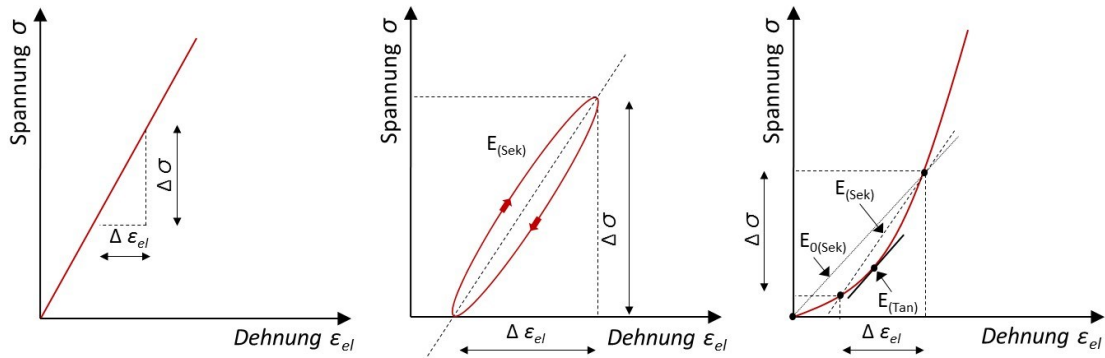


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Spannungs- Dehnungsbeziehung sowie der daraus resultierenden Definition von Elastizitätsmoduln (uniaxial)

Hingewiesen sei an dieser Stelle darauf, dass die Steifigkeit aufgrund der Definitionen von Spannung und Dehnung als tensorielle Größen ebenfalls ein Tensor ist und nur für den isotropen, linear elastischen Stoff modulare Bedeutung hat [HERLE, I./MASIN D. (2005)].

Wird bei der Betrachtung des Zusammenhanges zwischen elastischer Axialdehnung und aufgebracht horizontaler sowie vertikaler Spannungen (Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11) der Focus ausschließlich auf den Betrachtungspunkt (Spannungspunkt) gelegt, folgt aus

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) \quad (5-41)$$

bzw.

$$\varepsilon_{22/33\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) \quad (5-42)$$

und Differentiation nach der jeweiligen unabhängigen Größe (mit gleicher Richtung wie die abhängige Größe) die Berechnung des Elastizitätsmoduls als Tangentenmodul.

$$\frac{d\varepsilon_{11} f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33})}{d\sigma_{11}} = \frac{1}{E_{11}} \quad (5-43)$$

bzw.

$$\frac{d\varepsilon_{22/33} f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33})}{d\sigma_{22/33}} = \frac{1}{E_{22/33}} \quad (5-44)$$

Entscheidend hierbei ist, dass der berechnete Elastizitätsmodul als Differentialquotient ausschließlich für den Spannungspunkt gilt. Eine inkrementelle Betrachtung von vertikaler Hauptspannung und vertikaler Dehnung und der daraus resultierenden Berechnung des

Elastizitätsmoduls als inkrementellen Sekantenwert (CCP) ist bei den hier durchgeführten Versuchen (VCP) sowie der gezeigten Berechnung nicht zulässig! Wie bereits erläutert wird Isotropie vorausgesetzt und es gilt  $E_{11}=E_{22/33}=E$ .

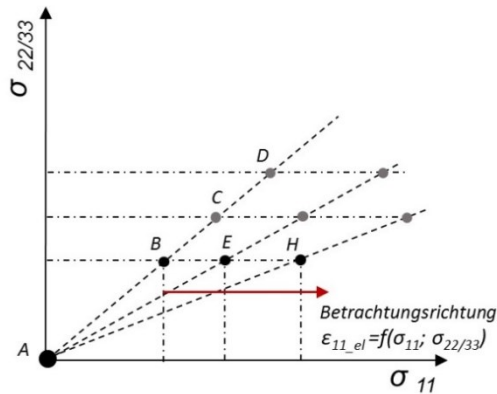


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Spannungspfade sowie der daraus resultierenden funktionalen Abhängigkeit der elastischen Axialdehnung

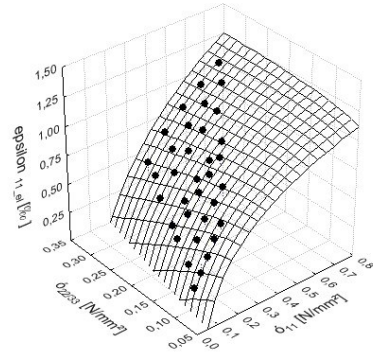


Abbildung 5-11: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von großer und kleiner Hauptspannung

*Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Elastizitätsmodul als richtungsunabhängige Größe ausschließlich nach Ansatz 2 (Glg. 5-43) berechnet.*

Berechnung der Querdehnzahl:

Auf Basis des berechneten Elastizitätsmoduls am Spannungspunkt kann für eine inkrementelle infinitesimal kleine Änderung der Hauptspannungen die Dehnungsänderung in axialer Richtung nach Glg. (5-41) und in radialer Richtung nach Glg. (5-34), aufgelöst nach  $\epsilon_{22/33}$ , berechnet werden. Die Querdehnzahl berechnet sich im Weiteren nach Glg. (5-37).

Anmerkung:

*Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen werden im Rahmen der Versuchsauswertung die elastischen Dehnungen infolge zyklischer Beanspruchung je nach Richtung der Hauptachse mit  $\epsilon_{11\_el}$  bzw.  $\epsilon_{22/33\_el}$  bezeichnet.*

## 6 Versuche ohne thermische Beeinflussung

### 6.1 Vorbelastungsprozedur

Vor Beginn der eigentlichen Materialuntersuchungen, d. h. der Untersuchung der elastischen Materialantwort, werden die Probekörper üblicherweise einer Vorbelastung unterzogen.

*Gemäß DIN EN 13286-7:2004-04 ist es das Ziel der Vorbelastung, die anfänglich hohen plastischen Verformungen vorwegzunehmen und ein nahezu elastisches Materialverhalten zu erreichen.*

Postuliert wird dabei, dass sowohl für VCP als auch für CCP Versuchsprozeduren durch vorgegebene Spannungsniveaus ( $\sigma_3$ ;  $\sigma_d$ ) und Lastwechselzahlen das genannte Ziel erreicht wird.

Nachfolgende Abbildungen zeigen am Beispiel der Versuchsreihe A (Anlage D) die spannungsabhängigen akkumulierten plastischen Axialdehnungen von LW 100 bis 20.000 (Abbildung 6-1) bzw. LW 100 bis 330.000 (Abbildung 6-2), approximiert durch den nachfolgenden einfachen Potenzansatz

$$\sum \varepsilon_{11\_pl} = a_{11} \cdot N^{a_{12}} \quad (6-1)$$

Die entsprechenden plastischen Dehnungsraten berechnen sich durch Differentiation nach N, dargestellt in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4.

$$\frac{d(\sum \varepsilon_{11\_pl})}{dN} = a_{11} \cdot a_{12} \cdot N^{a_{12}-1} \quad (6-2)$$

Die gezeigten akkumulierten plastischen Dehnungsverläufe in axialer Richtung sind typisch für Spannungsverhältnisse, für welche zyklische Stabilität vorliegt und folglich die plastischen Dehnungsraten mit zunehmender Lastwechselzahl abnehmen, d. h. theoretisch bei unendlich großer Lastzyklenzahl gegen 0 streben. Mit steigendem Spannungsverhältnis vergrößert sich die axiale Gesamtdehnung, welche bereits zu Versuchsbeginn den offenbar größten Verformungsanteil (bezogen auf die Gesamtverformung) erfährt.

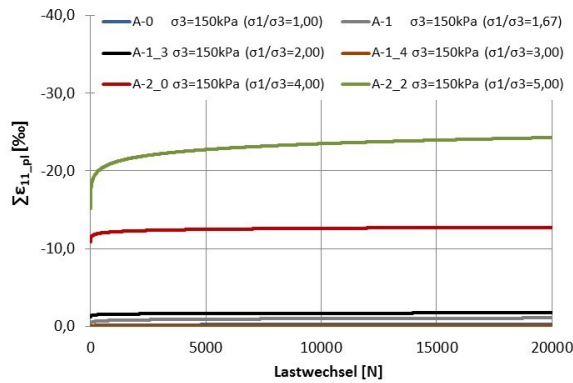


Abbildung 6-1: Spannungsunabhängige akkumulierte plastische Dehnungen bis Lastwechsel 20.000 (Versuchsreihe A)

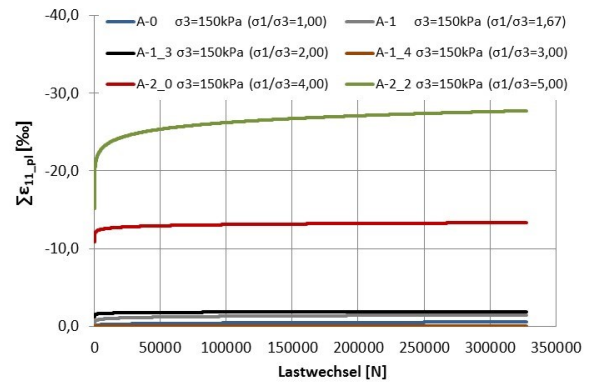


Abbildung 6-2: Spannungsunabhängige akkumulierte plastische Dehnungen bis Lastwechsel 330.000 (Versuchsreihe A)

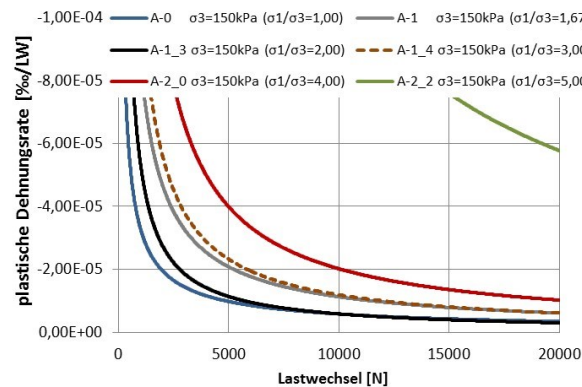


Abbildung 6-3: Spannungsunabhängige plastische Dehnungsrate über 20.000 Lastzyklen (Versuchsreihe A)

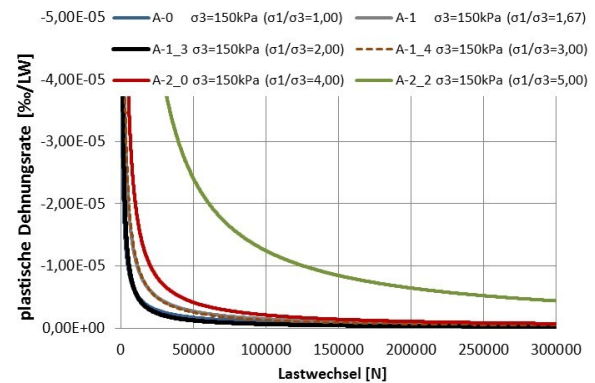


Abbildung 6-4: Spannungsunabhängige plastische Dehnungsrate über 330.000 Lastzyklen (Versuchsreihe A)

Die plastischen Dehnungsraten erreichen im konkreten Fall bei Versuchsabbruch, d. h. nach 330.000 Lastwechseln, in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis, Werte zwischen  $-4 \cdot 10^{-6}$  %/LW und  $-4 \cdot 10^{-7}$  %/LW (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). Hierbei wird bereits ersichtlich, dass die plastischen Dehnungsraten selbst nach dieser hochzyklischen Beanspruchungen noch nicht die in den DIN EN 13286-7:2004-04 geforderten Dehnungsraten von  $< 10^{-7}$  %/LW nach 20.000 LW erreichen. Nach gerade 20.000 Lastwechseln liegen diese spannungsabhängig zwischen  $-6 \cdot 10^{-5}$  %/LW und  $-3 \cdot 10^{-6}$  %/LW (Abbildung 6-3) und sind damit deutlich größer als die geforderten Dehnungsraten. Zu dieser Erkenntnis gelangt man auch dann, wenn Versuch A\_2-2 aufgrund der Überschreitung der 2% - Dehnungsgrenze gem. DIN EN 13286-7:2004-04 unberücksichtigt bleibt.

*(Die DIN EN 13286-7:2004-04 verwendet eine positive Vorzeichenkonvention für irreversible Verformungen (Stauchungen) in axialer Richtung. Im Rahmen der Versuche zur Festlegung der Vorbelastungsprozedur – Long Term Versuche (Kapitel 6.1) wird für irreversible Stauchungen ein negatives Vorzeichen verwendet!)*

Berechnet man das Verhältnis der Dehnungsraten nach 10.000, 20.000 bzw. 100.000 LW zur Dehnungsrate nach 330.000 LW (Abbildung 6-6), ist nachvollziehbar, dass der Quotient kleiner wird, je geringer die Differenz zwischen den Lastwechselzahlen ist, an welchen man die Dehnungsraten betrachtet. Während sich die plastischen Dehnungsraten spannungsabhängig zwischen 10.000 LW und 330.000 LW etwa um den Faktor 14 bis 28 unterscheiden, reduziert sich der Faktor beim Vergleich der Dehnungsraten zwischen 100.000 LW und 330.000 LW (nahezu unabhängig vom Spannungsverhältnis) auf rd. 3.

Deutlich wird hierbei, dass sich unabhängig von den aufgebrauchten Spannungsverhältnissen, die plastischen Dehnungsraten nach Vorbelastungen von 10.000 LW oder 20.000 LW noch erheblich von Dehnungsraten nach hochzyklischer Beanspruchung unterscheiden. Des Weiteren ist daraus zu folgern, dass infolge der Änderung der plastischen Dehnungsraten gleichermaßen eine Änderung der elastischen Materialantwort vorliegt. Auch wenn die plastischen Verformungen gegen einen Grenzzustand konvergieren und die Materialantwort „quasi-elastisch“ erscheint [STOECKER, T. (2002)], gibt es immer Relativbewegungen einzelner Körner, weshalb elastisches Materialverhalten nur vereinfacht als unveränderliche Größe bei kleinen Dehnungsamplituden angesehen werden kann.

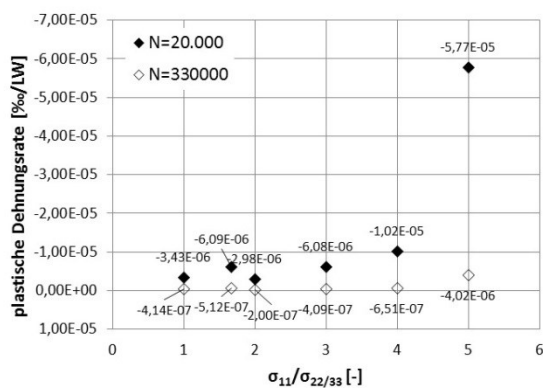


Abbildung 6-5: Plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis nach 20.000 und 330.000 Lastwechseln

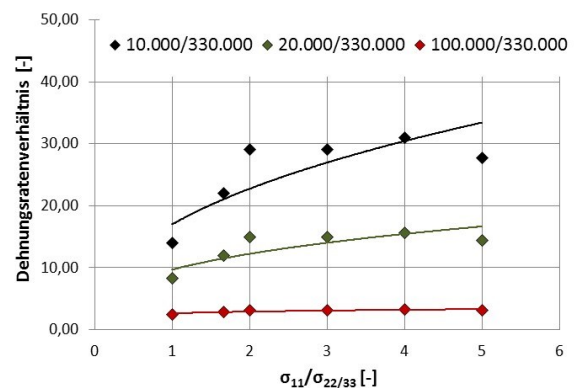


Abbildung 6-6: Spannungsabhängige plastische Dehnungsrate nach Lastwechsel 300.000 (Versuchsreihe A)

Deutlich wird, von welcher Bedeutung Pyknotropie auf das Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung ist. An dieser Stelle wird die grundsätzliche Frage aufgeworfen, was von einer Vorbelastungsprozedur erwartet werden kann und sollte bzw. wie ein definierter/gewünschter Ausgangszustand des Materials erreicht werden kann. Nachfolgend werden deshalb unterschiedliche Aspekte hinsichtlich des Materialeinbaus in situ sowie der Probekörperherstellung im Labor einschließlich der Prüfprozedur diskutiert.

In situ werden SoB nach dem Einbau durch verschiedenste Baufahrzeuge befahren und dabei unterschiedlichsten Beanspruchungszuständen ausgesetzt. Da die konkreten Belastungen (Achslasten und Achslasthäufigkeiten) während der Bauphase der Straßenbefestigung weitestgehend unbekannt sind, ist es folglich sehr schwer, die Belastungsgeschichte zu quantifizieren. Es wird davon ausgegangen, dass im Zuge der straßenbauspezifischen Belastungsgeschichte beim Herstellen des mehrschichtigen Straßenaufbaus die Schichten ohne Bindemittel nachverdichtet werden und somit die Materialdichte bei Verkehrsfreigabe, bezogen auf den Einbauzustand, erhöht ist (kontraktanter Zustand).

Aus labortechnischer Sicht existieren unterschiedliche Schwierigkeiten bei der Herstellung von Probekörpern aus ungebundenen Baustoffgemischen. Üblicherweise werden derartige Proben von Hand hergestellt. Auch bei definierten Festlegungen hinsichtlich der Probekörperherstellung (Dicke der Einbaulagen, verrichtete Arbeit pro Einbaulage) sind die genannten Randbedingungen bei Handeinbau nicht identisch. Des Weiteren weisen die Probekörper trotz sorgfältigster Herstellung keine planen Oberflächen auf, da ein Schleifen, wie bei Probekörpern aus gebundenen Baustoffen üblich, nicht möglich ist. Deshalb kann durch eine zyklisch konstante Vorbelastung der Proben ein homogenerer Ausgangszustand erreicht.

Wird nunmehr davon ausgegangen, dass ungebundene Baustoffgemische bis zur Verkehrsfreigabe der Verkehrsanlage durch die genannten Beanspruchungen während der Bauphase nicht überbeansprucht (Kornzertrümmerung oder Auflockerung), sondern nachverdichtet werden oder mindestens im angestrebten Verdichtungsgrad vorliegen, muss infolge der Vorbelastungsprozedur dieser Effekt am Probekörper erreicht werden.

Bereits hier stellt sich die Frage, warum an einem stark verdichtetem Gesteinskorngemisch (mit straßenbautypischen Verdichtungsgraden zwischen 97 % und 103 %), nach dem Einbau in die Triaxialzelle und innerhalb von 20.000 LW (unter Bezug auf DIN EN 13286-7:2004-04) eine ausgeprägte Nachverdichtung eintreten sollte. Während der Herstellung der Probekörper ist bereits feststellbar, dass Verdichtungsgrade über 97 % Proctordichte mit deutlich steigender Verdichtungsarbeit unter diesen ödometrischen Bedingungen verbunden sind. In der Triaxialzelle liegen bei Vorbelastungsbedingungen nach DIN EN 13286-7:2004-04 ausgeprägte gestaltändernde Beanspruchungen vor (Verfahren A, hohes Spannungsniveau mit  $\sigma_d/\sigma_3=5,45$ ), welche neben Volumenänderung erhebliche Gestaltänderung zur Folge haben. Grundsätzlich problematisch bei einer solchen Herangehensweise ist die Tatsache, dass ausschließlich akkumulierte plastische Verformungen in axialer Richtung betrachtet werden; ohne jegliche Beachtung der Pyknotropie.



Wenn jedoch, wie zuvor genannt, unterstellt werden soll, dass SoB mit definiertem Verdichtungsgrad und damit bekannter Trockendichte nach zyklischer Belastung/Vorbelastung einen kontraktanten Zustand und folglich eine erhöhte Dichte aufweisen soll, muss die Vorbelastung explizit darauf abgestimmt sein. Deshalb muss überprüfbar sein, welche Dichteänderung der Probekörper während der Prozedur erfahren hat.

*Aus Sicht des Verfassers ist es daher dringend notwendig, verschiedene Vorbelastungsprozeduren im Hinblick auf die genannte Problematik zu untersuchen und darauf aufbauend eine geeignete Prüfprozedur zu erarbeiten.*

In Kapitel 4 wurden die axialen und radialen Wegmesssysteme der Triaxialanlage vorgestellt. Dabei wurde auf die Problematik der radialen Wegmessungen der Trockenzelle ohne direkten Kontakt zum Probekörper hingewiesen, weshalb Volumendehnungen nicht ausgewertet wurden. Da für die Bewertung des akkumuliert plastischen Verformungsverhaltens des Probekörpers die Radialdehnung während der Be-/Entlastungsphase unbedeutend ist und ausschließlich die zyklische Änderung des Weges in radialer (und axialer) Richtung benötigt wird, konnte die zeit- bzw. zyklusabhängige Volumenänderung berechnet werden. Hierbei wird ausschließlich die Änderung des Volumens des Probekörpers innerhalb des unbeeinflussten Messbereiches nach jedem Lastzyklus berechnet. Die Elementhöhe entspricht hierbei dem mittleren Abstand der beiden Axialmessebenen, und der Durchmesser entspricht dem mittleren Elementdurchmesser. Die Volumenänderung wurde vereinfacht auf einen Kreiszyylinder bezogen. Auf eine explizite Erfassung der Krümmung der Mantelfläche des Elementes, welche bei ausgeprägter Probekörperdeformation bedeutsam ist, wird hierbei verzichtet. Das Volumen im unbeanspruchten Ausgangszustand  $V_0$  berechnet sich folglich zu

$$V_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \bar{d}_{E_0}^2 \cdot \bar{h}_{E_0} \quad (6-3)$$

mit

$\bar{h}_{E_0}$  mittlere Elementhöhe – Mittelwert der Messbänke  
(0-Zustand/0. LW)

$\bar{d}_{E_0}$  mittlerer Elementdurchmesser – Mittelwert der Messbänke  
(0-Zustand/0. LW)

Für die Berechnung der akkumulierten plastischen Verformungen wird die Änderung der mittleren Elementhöhe und des mittleren Elementdurchmessers am Ende eines jeden

Lastzyklus berechnet und subsummiert, so dass das Elementvolumen  $V_i$  nach dem  $i$ -ten Lastwechsel wie folgt berechnet werden kann:

$$V_i = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \bar{d}_{E_0} + \sum_{i=1}^i \Delta \bar{d}_E \right)^2 \cdot \left( \bar{h}_{E_0} + \sum_{i=1}^i \Delta \bar{h}_E \right) \quad (6-4)$$

mit

$$\Delta \bar{h}_E = \bar{h}_{E_i} - \bar{h}_{E_{i-1}} \quad (6-5)$$

$$\Delta \bar{d}_E = \bar{d}_{E_i} - \bar{d}_{E_{i-1}} \quad (6-6)$$

$\bar{h}_{E_i}$  mittlere Elementhöhe – Mittelwert der Messbänke  
( $i$ -ter LW)

$\bar{h}_{E_{i-1}}$  mittlere Elementhöhe – Mittelwert der Messbänke  
(LW  $i-1$ )

$\bar{d}_{E_i}$  mittlerer Elementdurchmesser – Mittelwert der Messbänke  
( $i$ -ter LW)

$\bar{d}_{E_{i-1}}$  mittlerer Elementdurchmesser – Mittelwert der Messbänke  
(LW  $i-1$ )

folgt

$$V_i = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \bar{d}_{E_0} + \sum_{i=1}^i (\bar{d}_{E_i} - \bar{d}_{E_{i-1}}) \right)^2 \cdot \left( \bar{h}_{E_0} + \sum_{i=1}^i (\bar{h}_{E_i} - \bar{h}_{E_{i-1}}) \right) \quad (6-7)$$

Im Hinblick auf die Vorbelastungsprozedur ist bereits die Volumenänderung nach dem ersten Lastwechsel von großer Bedeutung. Je nach Spannungszustand des Probekörpers erfährt dieser eine Volumenverringerng (Kompression) bzw. eine Volumenvergrößerung (Dilatanz) und damit eine Dichteänderung. Volumenverringerng tritt beim Untersuchungsmaterial bei isotroper Beanspruchung (oder nur geringfügiger Differenz zwischen großer und kleiner Hauptspannung) auf. Bei größer werdender Spannungsdifferenz vergrößert sich die Materialdilatanz auf Grund der größeren gestaltändernden Beanspruchung (Abbildung 6-7). Dieser anfängliche Dilatanzzustand reduziert sich bei weiterer zyklischer Belastung, so dass das Material in einen zyklisch stabilen Zustand übergeht oder aber der dilatante Zustand bestehen bleibt bzw. sich bei fortschreitender zyklischer Beanspruchung vergrößert, so dass zyklisches Versagen eintritt.

Die vom Spannungsverhältnis abhängige, beim ersten Lastwechsel auftretende Volumenveränderung tritt unabhängig von der im Versuch aufgebrauchten Radialspannung auf.

Abbildung 6-8 zeigt das relative Volumen jeweils nach dem ersten Lastwechsel, in Abhängigkeit vom aufgetragenen Spannungsverhältnis am Beispiel der Versuchsreihe A. Die Ergebnisse von Versuchsreihe B und C sind der Anlage E zu entnehmen.

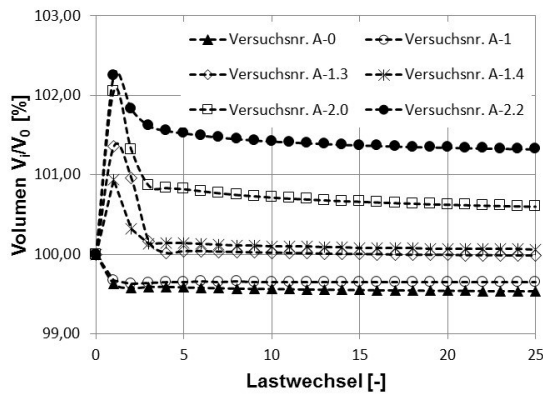


Abbildung 6-7: Spannungabhängige relative Volumenänderung während der ersten 25 Lastwechsel (Versuchsreihe A)

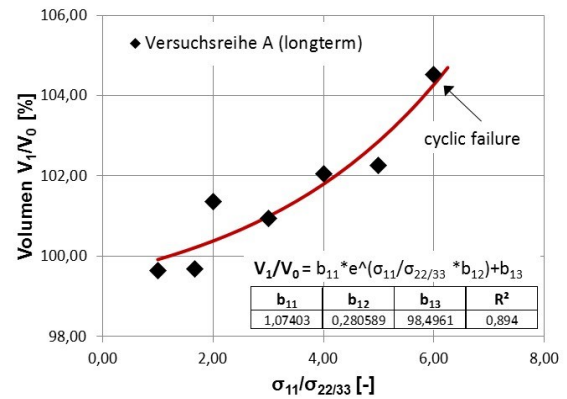


Abbildung 6-8: Spannungabhängige relative Volumenänderung nach dem 1. Lastwechsel (Versuchsreihe A)

*Aufgrund der gezeigten Effekte entspricht eine anfängliche Materialnachverdichtung nur dann einer Nachverdichtung, wenn die Beanspruchung isotrop ist oder eine sehr geringe deviatorische Komponente aufweist. Andernfalls liegt (nur bei Betrachtung der axialen Richtung) keine unterstellte Vergrößerung der Probekörperausgangsdichte vor, sondern eine Vergrößerung der Probekörperdichte nach vorausgegangener Dilatanz.*

Nachfolgend sollen deshalb folgende Fragen beantwortet werden:

- Welcher Fortgang der spannungsabhängigen, relativen Volumenveränderung nach dem 1. Lastwechsel stellt sich bei zyklischer Beanspruchung ein?
- Wird bzw. wann wird der volumetrische Ausgangszustand nach anfänglicher Dilatanz erreicht?

Da Beanspruchungen die eine isotrope Kompression von SoB in einer Straßenverkehrsanlage zur Folge haben, einer nicht zu erwartenden Beanspruchung entspricht, ist für die Vorbelastung des Probekörpers eine Beanspruchung zu wählen, bei welcher eine Spannungsdifferenz zwischen vertikaler Hauptspannung und horizontaler Hauptspannung vorliegt und für welche gilt:  $\sigma_{11} > \sigma_{22} = \sigma_{33}$ . In einem ersten Schritt wurde überprüft, welche Lastwechselzahl erforderlich ist, um bei einem definierten Spannungsverhältnis, verbunden mit anfänglicher Dilatanz, den Ausgangszustand (100% Ausgangsvolumen) zu erreichen.

Ziel dieser Untersuchung war es, ein für die Vorbelastungsprozedur geeignetes Spannungsverhältnis im Kontext mit einer geeigneten Lastwechselzahl festzulegen, wodurch ein definierter Materialzustand erreicht wird.

Abbildung 6-9 zeigt den typischen Verlauf der Volumenänderung, mit Volumenzunahme nach dem ersten Lastwechsel und anschließender Konsolidierung (Bsp. Versuchnr. A-1.3). Das Ausgangsvolumen  $V_0$  wird im konkreten Beispiel bereits nach 16 Lastwechseln mit zyklischer Belastung erreicht ( $V_i = V_0$ ). Mit weiter steigender Lastwechselzahl geht eine stetige Zunahme der Materialdichte einher. Die Auswertung der gesamten Versuchsreihe A (Abbildung 6-10) verdeutlicht, dass eine stark überproportionale Zunahme der erforderlichen Lastwechsel bei zyklischer Belastung notwendig ist, um eine Komprimierung des Probekörpers auf das Ausgangsvolumen zu erreichen.

Im mit „Bereich A“ gekennzeichneten Abschnitt (Abbildung 6-10) der Abszisse (Versuche (A-0 und A-1) führte bereits der erste Lastwechsel zur Materialkompression, so dass ein lastzyklenabhängiger Wechsel vom dilatanten zum kontraktanten Zustand nicht vorlag. Mit steigendem Spannungsverhältnis vergrößert sich die anfängliche Dilatanz, gefolgt von stetiger Volumenreduzierung und zyklischer Stabilisierung (Bereich B). Deutlich erkennbar ist dabei, dass eine Vergrößerung des Spannungsverhältnisses zu einer stark ausgeprägten überproportionalen Zunahme der erforderlichen Lastwechsel für das Erreichen des Ausgangsvolumens führt. Im mit „Bereich C“ gekennzeichneten Bereich wird auch nach 300.000 LW (Lastwechselgrenze der durchgeführten Versuche) keine Komprimierung auf den Ausgangsvolumenzustand erreicht. Die dargestellten, rot markierten Bereichsgrenzen sind hierbei nicht als grundsätzliche Spannungsverhältnisgrenzwerte zu verstehen, sondern für die im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihe interpretierbaren Übergangsbereiche.

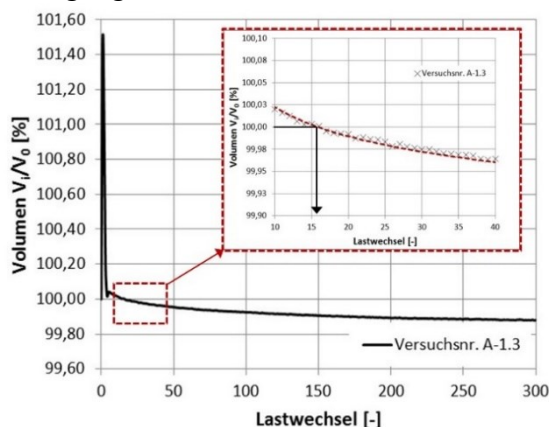


Abbildung 6-9: Lastwechselzahl zum Erreichen von 100 % Ausgangsvolumen am Beispiel des Versuchs A-1.3

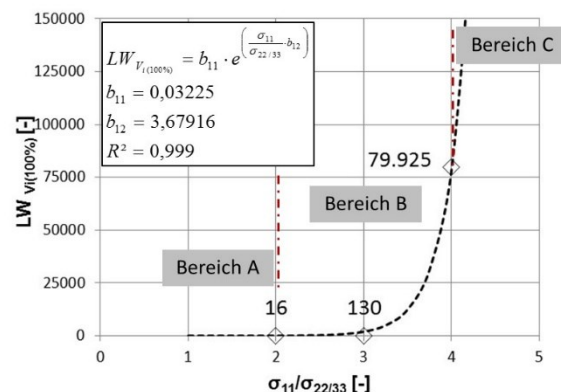


Abbildung 6-10: Lastwechselzahl zum Erreichen von 100 % Ausgangsvolumen in Abh. vom Spannungsverhältnis für Versuchsreihe A

Im Hinblick auf die Betrachtung der Volumenänderung würde im konkreten Beispiel der Versuchsreihe A eine vom Spannungsverhältnis abhängige Lastwechselzahl zwischen rd. 16 und 80.000 Lastwechseln notwendig sein, um den Ausgangsvolumenzustand  $V_0$  zu erreichen.

Wird postuliert, dass durch die Vorbelastungsprozedur eine Erhöhung der Trockendichte erreicht werden soll, vergleichbar dem angenommenen in situ Verhalten (jedoch unbekannter Belastungsgeschichte) muss die zuvor genannte, vom Spannungsverhältnis abhängige Lastwechselzahl größer sein als die Lastwechselzahl bis zum Erreichen des Ausgangsvolumens. Dabei stellt sich weiterführend die Frage, wieviel Lastzyklen sinnvoll und notwendig sind, um einen definierten Kontraktanzzustand zu erreichen. Deshalb wurden neben der Untersuchung der relativen Volumenänderung des Probekörpers zusätzlich die elastischen Axialdehnungen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl analysiert. Dabei wurden in festgelegten Abständen, beginnend bei Lastwechsel 10 bis Lastwechsel 300.000, die elastischen Axialdehnungen berechnet (Amplitudenmittelwerte über jeweils 10 Lastzyklen, siehe Kapitel 4).

Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 zeigen die Änderung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl am Beispiel der Versuchsreihe A. Erkennbar ist die bereits angesprochene charakteristische, konvergierende Reduzierung der elastischen Materialantwort infolge der akkumulierten Volumenreduzierung, d. h. Dichteerhöhung.

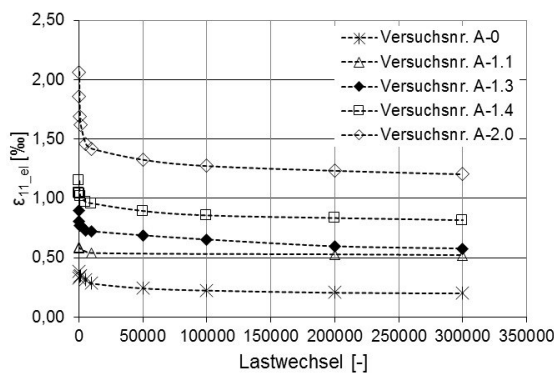


Abbildung 6-11: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl und des Spannungsverhältnisses (Versuchsreihe A)

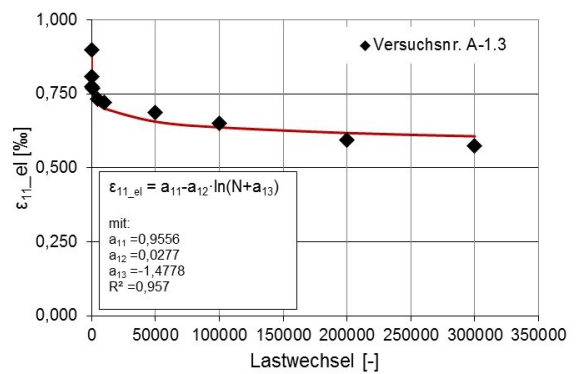


Abbildung 6-12: Approximation der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl am Beispiel von Versuchsnummer A-1.3

Stellt man die elastische Axialdehnung dem Volumenverhältnis gegenüber (Abbildung 6-13), wird der korrelative Zusammenhang über ein Betrachtungsfenster von 300.000 Lastzyklen deutlich. Gleichermäßen ist ersichtlich ist, dass das Material in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis lastwechselzahlabhängig im Dilatanz- oder Kontraktanzzustand vorliegt.

Abbildung 6-14 zeigt die Differenz zwischen dem relativen Volumen nach dem 1. LW und nach dem 300.000. LW sowie das relative Volumen nach dem 300.000. LW (Versuchsabbruch) in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis. Es zeigt sich, dass das Material nach 300.000 Lastzyklen ( $V_i=300.000$ ) bei isotroper Kompression die größte Volumenreduzierung erfährt. Die bei steigendem Spannungsverhältnis größer werdende Differenz zwischen dem relativen Volumen nach dem 1. LW und nach dem 300.000. LW resultiert hierbei aus der gezeigten ansteigenden Volumendilatation nach dem 1. LW. Im dargestellten Beispiel (Versuchsreihe A; ohne Versuchsnummer A-0 bis A-2.0) erreichen alle untersuchten Probekörper unabhängig vom Spannungsverhältnis bei Versuchsabbruch nach 300.000 Lastzyklen ein im Vergleich zum Ausgangsvolumen geringeres Volumen. Dabei wird das geringste Volumen und folglich die größte Dichte bei kleiner werdendem Spannungsverhältnis erreicht. Erklärbar ist dies dadurch, dass dem Aufbringen kleiner Spannungsverhältnisse hauptsächlich volumenändernde Beanspruchungen resultieren.

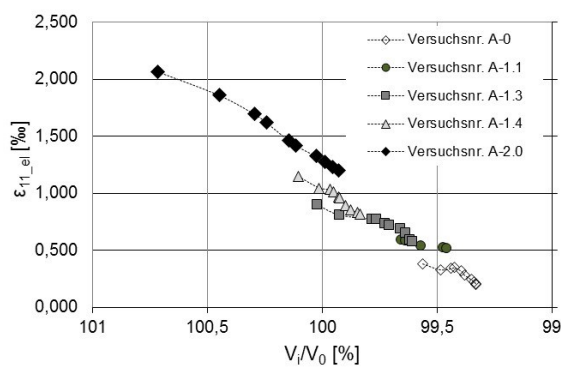


Abbildung 6-13: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis (Zeitfenster 300.000 Lastzyklen; Versuchsreihe A)

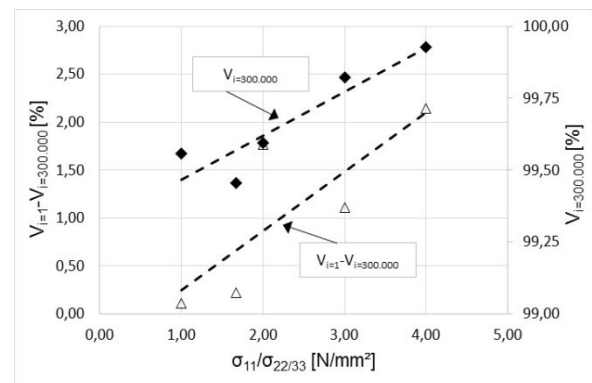


Abbildung 6-14: Volumendifferenz und relatives Probekörpervolumen nach 300.000 LW in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis (Versuchsreihe A)

Zudem erschien es zur vergleichenden Beurteilung und Charakterisierung der lastwechselzahlabhängigen Veränderung der elastischen Axialdehnung zweckmäßig, einen definierten Zeitpunkt während der Versuchsdurchführung festzulegen. Dafür wurden die elastischen Dehnungen bei Lastwechsel 10 als elastische Ausgangsdehnung (Maximalwert) und bei Lastwechsel 300.000 als quasi-elastische Enddehnung (Minimalwert) berechnet.

Als Vergleichskriterium für unterschiedliche Spannungsverhältnisse wurde die Lastwechselzahl  $LW_{50}$  definiert, nach welcher die elastische Anfangsdehnung um 50 %, bezogen auf die Dehnungsdifferenz beider zu vor genannter Dehnungswerte, abfällt. Aus der gewählten Ansatzfunktion zur Approximation der lastzyklenabhängigen elastischen Axialdehnung mit

$$\varepsilon_{11,el} = f(LW) = a_{11} - a_{12} \cdot \ln(LW + a_{13}) \quad (6-8)$$

und

$$\frac{\Delta\varepsilon_{11,el}}{2} = \varepsilon_{11,el}(LW_{10}) - \varepsilon_{11,el}(LW_{300.000}) \quad (6-9)$$

$$\varepsilon_{11,el,50} = \varepsilon_{11,el}(LW_{10}) - \frac{\Delta\varepsilon_{11,el}}{2} \quad (6-10)$$

folgt

$$LW_{50} = e^{\frac{a_{11} - \varepsilon_{11,el,50}}{a_{12}}} - a_{13} \quad (6-11)$$

Hierbei unberücksichtigt und für diese Betrachtungen unbedeutend sind die anfänglichen singulären Effekte, resultierend aus dem ersten Lastwechsel. Abbildung 6-15 zeigt beispielhaft für Versuch A-1.3 die Herangehensweise. Abbildung 6-16 zeigt das Ergebnis am Beispiel der Versuchsreihe A. Ausgehend von zyklisch isotroper Belastung, bei welcher rd. 16.100 Lastzyklen benötigt werden, um  $LW_{50}$  zu erreichen, reduziert sich diese Lastwechselzahl bei steigendem Spannungsverhältnis sehr schnell und erreicht ein relativ ähnliches Niveau zwischen etwa 1.000 und 3.000 Lastzyklen.

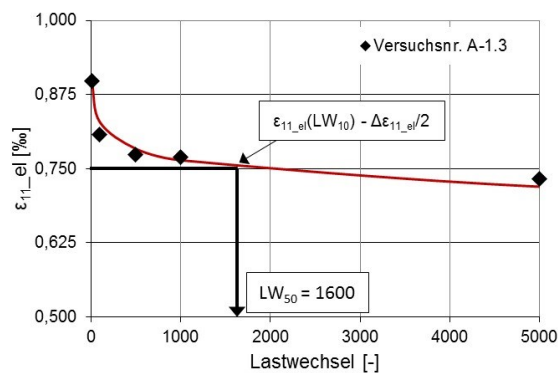


Abbildung 6-15: Lastwechselzahl für das Erreichen von 50 % Dehnungsdifferenz der elastischen Axialdehnung am Beispiel von Versuch A-1.3

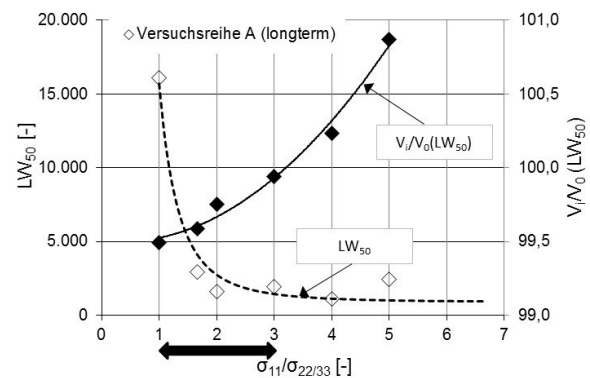


Abbildung 6-16: Lastwechselzahl für das Erreichen von 50 % Dehnungsdifferenz der elastischen Axialdehnung sowie das dazugehörige Volumenverhältnis in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses (Versuchsreihe A)

Falsch wäre in der Konsequenz dieser Betrachtung die Schlussfolgerung, die Vorbelastungsprozedur innerhalb einer Bandbreite des Spannungsverhältnisses von 1 bis 5 aufzubringen. Wird in der gleichen Darstellung zusätzlich abgebildet, welches Volumenverhältnis bei der gesuchten Lastwechselzahl  $LW_{50}$  vorliegt, wird deutlich, dass ab einem Spannungsverhältnis größer 3 der Probekörper noch im dilatanten Zustand ( $V_i/V_0 >$

100 %) vorliegt. Im Ergebnis dieser Untersuchung führten folgende Sachverhalte zur Festlegung der Vorbelastungsprozedur:

- Bezugnehmend auf postulierte und angenommene Nachverdichtung von SoB in situ und die gleichermaßen angestrebte Dichteerhöhung im Labor ist festzustellen, dass für eine geeignete Vorbelastungsprozedur die Betrachtung in ausschließlich axialer Richtung unzureichend ist.
- Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen (bei definiertem Materialzustand) wird ein gewünschter kontraktanter Zustand bis zu einem Spannungsverhältnis von 4 sowie einer Lastwechselzahl von 300.000 (Abbildung 6-14) erreicht.
- Die Auswertung der Veränderung der lastwechselzahlabhängigen elastischen Dehnungen hinsichtlich des festgelegten Vergleichskriteriums zeigt, dass dieses bis zu einem Spannungsverhältnis von 5 erfüllt ist. Bei gleichzeitiger und zwingend erforderlicher Betrachtung des relativen Volumenverhältnisses kann festgestellt werden, dass ein Spannungsverhältnis von 3 nicht überschritten werden sollte.
- Da eine isotrope Belastung in situ nicht vorliegt, wird ein Spannungsverhältnis von 1 im Rahmen der Vorbelastungsprozedur ausgeschlossen.

Im Ergebnis dieser Vorstudien wurde für alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche, bei welchen Probekörpervorbelastungen erforderlich waren (Multi-Stage-Versuche), folgende pragmatischen Festlegungen vereinbart:

Spannungsverhältnis:

$$\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}} = 2 \quad \text{mit} \quad (\sigma_{22/33} = 0,15 \text{ N/mm}^2)$$

Lastwechselzahl:

5.000

## 6.2 Mechanisches Verformungsverhalten - Grundlagen

Zur Untersuchung der elastischen Materialantwort ist vorab zu diskutieren, was exakt unter diesem Verhalten zu verstehen ist. Es wurde bereits erläutert, dass ein rein reversibles



Antwortverhalten eine theoretische Modellvorstellung ist, da streng genommen bei zyklischer Beanspruchung fortlaufende Energiedissipation vorliegt.

Um eine quasi-elastische Dehnung ungebundener Gesteinskorn Gemische zu erhalten und darauf aufbauend dieses modellhaft zu beschreiben, sind zyklische Langzeitversuche (Möglichkeit 1) prinzipiell vorstellbar. Unter der Voraussetzung zyklischer Stabilität sind sehr große Lastwechselzahlen (theoretisch unendlich viele Lastwechsel) auf den Probekörper aufzubringen, um plastische Dehnungssinkremente auszuschließen und damit elastisches Materialverhalten zu unterstellen [GOTSCHOL, A. (2002)]. Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens von Gesteinskorn Gemischen in Straßenbefestigungen sind unterschiedlichste Beanspruchungszustände und Materialzustände relevant und deshalb prüftechnisch zu untersuchen. Damit einher geht eine große Anzahl zu untersuchender Probekörper, welche in Verbindung mit der erforderlichen Prüfdauer für die hochzyklische Beanspruchung zu einem nicht praktikablen und zielführenden Prüfaufwand führt.

Üblich ist, in den unterschiedlichsten Materialwissenschaften, verschiedene Beanspruchungszustände an einer Werkstoffprobe durch deutlich verkürzte Prüfprozeduren, sogenannte Multi-Stage Versuche (Möglichkeit 2), zu untersuchen. Derartige Prozeduren können sehr unterschiedlich aufgebaut sein; grundsätzlich jedoch werden verschiedene Belastungszustände aufeinanderfolgend, häufig verlaufend von kleiner zu größer werdender Belastung, aufgebracht. Damit ist es in zeitlich kurzer Folge und unter definierten Randbedingungen möglich, belastungsabhängige Materialantworten zu erhalten und zu untersuchen.

Entscheidend hierbei ist es, dass der Probekörper während der Versuche, d. h. während der Beanspruchungen, keine „bedeutsame“ Veränderung der Materialstruktur erfährt. Würde im Zuge der Materialprüfung eine Veränderung der Materialstruktur verursacht, läge bei wiederholter Beanspruchung eine veränderte Materialantwort vor, weshalb für die daraus abgeleiteten Materialkennwerte/-kennwertfunktionen ausschließlich instationärer Charakter konstatiert werden könnte. Wesentliches Ziel ist es jedoch, das Material derart anzusprechen, dass bei bekannter Belastungsgeschichte (Vorbelastung nach Kapitel 6.1) und unter Berücksichtigung materialzustandsabhängiger Belastung „quasi-elastisches“ Materialantwortverhalten erwartet werden kann. Diesem Gedankengang folgend, wurde ein Modellansatz erarbeitet und experimentell umgesetzt, durch welchen definierte materialspezifische Grenzbedingungen ableitbar und praktikabel umsetzbar sind.

Abbildung 6-17 zeigt beispielhaft angewandte Spannungspfade (VCP), wodurch im Element sowohl Extensions-, Kompressions- als auch isotrope Beanspruchung erzeugt wird. Aus der Extensionsbeanspruchung resultiert eine indirekte Zugdehnung in vertikaler

Richtung, bei welcher der Probekörper trotz allseitiger Druckspannungen (aller drei Hauptspannungen) gedehnt (verlängert) wird. Die aus den aufgebrachtten Spannungspfaden resultierenden elastischen Axialdehnungen beschreiben einen charakteristischen Verlauf, für welchen typische Bereiche definiert werden können (Abbildung 6-18). Beginnend im Extensionsbereich, verringert sich die elastische Axialdehnung bei kleiner werdender deviatorischer Beanspruchung. Der Vorzeichenwechsel der axialen Dehnungsrichtung tritt nicht erst beim Übergang in den Kompressionsbereich auf, was bei InkompRESSibilität ( $\mu=0,5$ ) der Fall wäre, sondern bereits vorher. Bei Kompression von Gesteinskornmischen vergrößert sich die elastische Dehnung anfänglich degressiv und erfährt bei steigender deviatorischer Beanspruchung eine progressive Vergrößerung. In der ersten Beanspruchungsphase (degressiver Dehnungszuwachs) liegt eine Materialverfestigung infolge vor, während sich in der zweiten Phase (progressiver Dehnungszuwachs) das Material entfestigt. Die Phase der hier beschriebenen Verfestigung ist im Wesentlichen durch die Barotropie bedingt, da die mittlere Spannung  $p$  bei Zunahme der großen Hauptspannung ebenfalls ansteigt, was zur Versteifung des Korngerüstes führt. Eine weiter ansteigende Erhöhung des Deviators bedingt zunehmend gestaltändernde irreversible Verformungen des Korngefüges infolge der Verschiebung (Translation und Rotation) der Gesteinskörner.

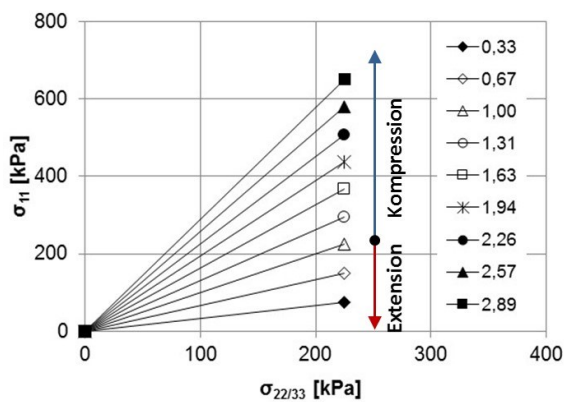


Abbildung 6-17: Triaxiale Spannungspfade (VCP) mit Extensions-, Kompressions- und isotroper Materialbeanspruchung

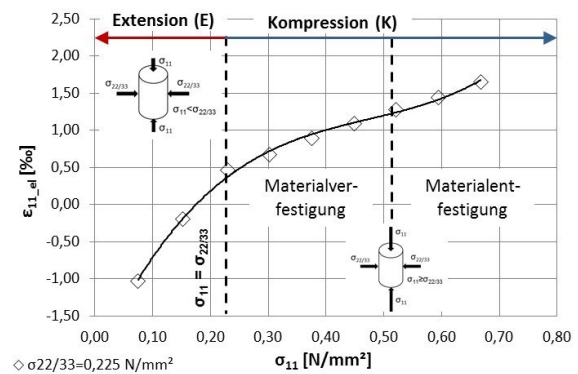


Abbildung 6-18: Elastische Axialdehnung resultierend aus der Beanspruchung nach Abb. 6-1

Abbildung 6-19 zeigt eine Folge aufgebrachtter Spannungspfade (Multi-Stage) und die dabei gemessenen elastischen Axialdehnungen (Abbildung 6-20). Erkennbar ist, dass das genannte charakteristische Dehnungsverhalten bei derartigen Spannungspfaden grundsätzlich, jedoch beanspruchungsabhängig unterschiedlich, auftritt. In Anlehnung an die Mohr-Coulomb'sche Theorie wird ersichtlich, dass mit steigender mittlerer Spannung größere gestaltändernde Beanspruchungen ertragen werden können, bevor Materialentfestigung einsetzt. Zur besseren Anschauung wird die elastische Axialdehnung

beispielhaft als Funktion von  $q'$  und  $p$  in Abbildung 6-21 dargestellt, wodurch der grundsätzliche Zusammenhang deutlich wird.

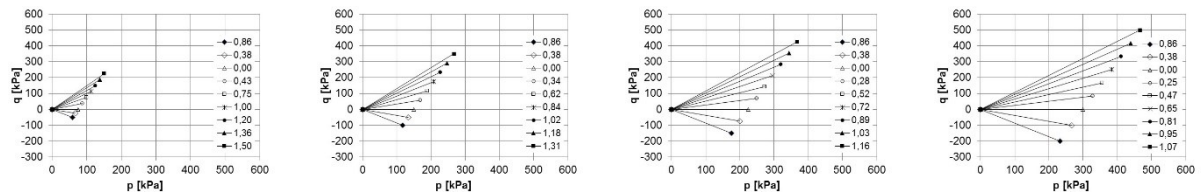


Abbildung 6-19: Folge triaxialer Spannungspfade (VCP) mit Extensions-, Kompressions- und isotroper Beanspruchung

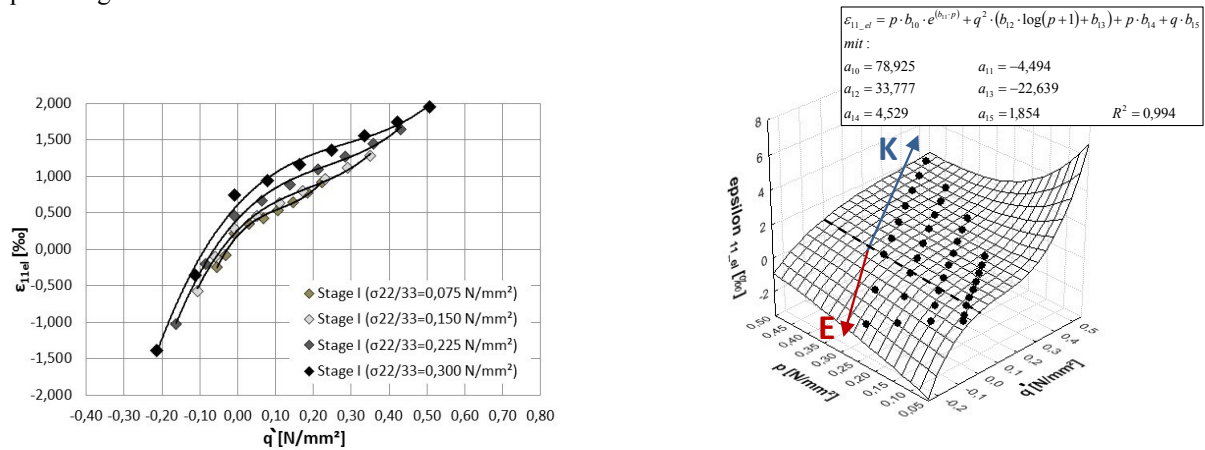


Abbildung 6-20: Axiale elastische Dehnungen in Abhängigkeit von Deviator bei unterschiedlichen Radialspannungsamplituden

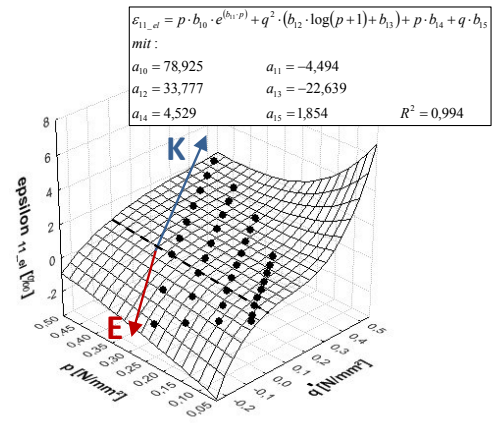


Abbildung 6-21: Axiale elastische Dehnungen in Abhängigkeit von Deviator und mittlerer Spannung

Aus derartigen Beanspruchungsfolgen, welche zu wiederholter Materialentfestigung führen, resultiert zwangsläufig eine zeitabhängige Änderung der Materialdichte. Wenn eine solche Materialveränderung, beispielsweise eine Entfestigung vorliegt, muss bei erneuter und gleicher Beanspruchung des Materials eine veränderte Materialantwort die zwangsläufige Folge sein.

Diesem Gedankengang folgend, wurde das Untersuchungsmaterial wiederholt mit identischen Belastungszyklen beansprucht. Die einzelnen Laststufen beginnen mit isotroper Kompression, gefolgt von anschließender stufenweiser Steigerung der Vertikalspannung. Nach jeder Laststeigerung wird zu Vergleichszwecken auf ein Bezugsspannungsniveau reduziert (Abbildung 6-22). Extensionsbeanspruchungen, welche nicht maßgebender Untersuchungsbestandteil sind, wurden hierbei nicht aufgebracht. Abbildung 6-23 zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung (in axialer Richtung) der Folge drei nacheinander aufgetragener gleicher Belastungszyklen. Deutlich feststellbar ist die Zunahme der elastischen Axialdehnungen bei identischen Beanspruchungen und wiederholtem Belastungszyklus (Belastungszyklus 1 bis 3). Dies bestätigt den zuvor erläuterten

Sachverhalt und zeigt die Veränderung der elastischen Materialantwort infolge wiederholter Beanspruchung mit Materialentfestigung.

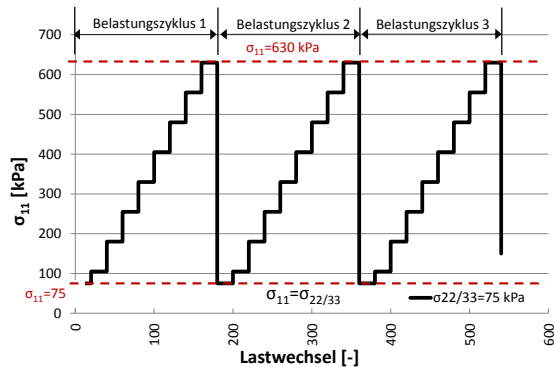


Abbildung 6-22: Multi-Stage Testprozedur mit wiederholter Folge gleicher Belastungszyklen

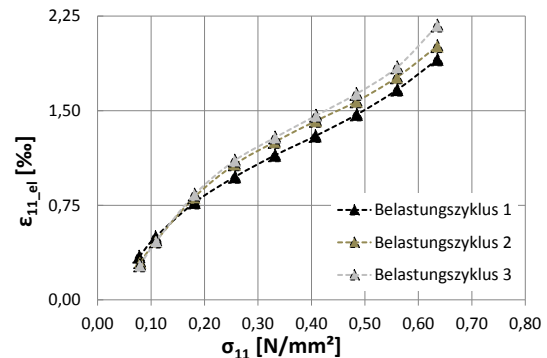


Abbildung 6-23: Spannungs-Dehnungsbeziehung bei wiederholter Folge gleicher Belastungszyklen

Wird durch verkürzte Versuchsprozeduren (Multi-Stage) in einem vergleichsweise kleinen Zeitfenster, ein möglichst breites Beanspruchungsspektrum abgeprüft und dabei eine Überbeanspruchung, verbunden mit Materialentfestigung, akzeptiert, führt dies in der Konsequenz zu weiterführenden Problemen sowie zu möglichen Fehlinterpretationen. Verdeutlicht werden soll dies nachfolgend exemplarisch am Beispiel der isotropen elastischen Materialantwort.

Bei ausschließlich isotroper Kompression erfährt das Material ausschließlich Volumenveränderung (Volumenverringern). Dabei nimmt die elastische Axialdehnung mit steigender mittlerer Spannung grundsätzlich degressiv zu, da bei ungebundenen Gesteinskornmischungen immer mehr Kontaktpunkte zur Spannungsübertragung entstehen und sich die Kontaktflächen vergrößern. Abbildung 6-24 zeigt den typischen Verlauf der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Hauptspannung am Beispiel zwei aufeinanderfolgender isotroper Belastungszyklen.

Wird das Material zwischen isotropen Beanspruchungen zusätzlich deviatorischen Beanspruchungen ausgesetzt, ist davon auszugehen, dass die Materialantwort von der bei ausschließlich isotroper Kompression abweicht. Um dies zu untersuchen, wurden ausschließlich die isotropen Spannungspfade der aufgebrachten Belastungszyklen (Abbildung 6-19) untersucht. Im Ergebnis dessen wurden die dabei aufgetretenen elastischen Axialdehnungen (rot markiert) denen bei ausschließlich isotroper Beanspruchung (schwarz markiert) gegenübergestellt (Abbildung 6-25). Deutlich erkennbar ist, dass bei gleicher mittlerer Spannung deutlich größere elastische Axialdehnungen festgestellt werden konnten, wenn das Material zwischen den isotropen Belastungszyklen zusätzliche gestaltändernde Beanspruchungen (in Verbindung mit Materialentfestigung) ertragen musste.

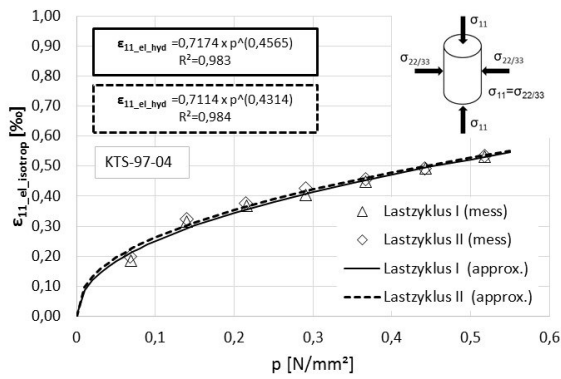


Abbildung 6-24: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression

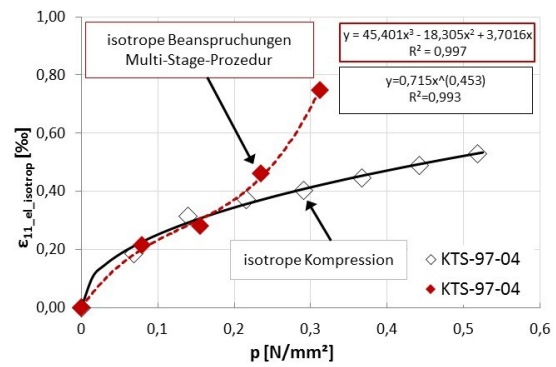


Abbildung 6-25: Vergleich der elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung und der Spannungspfadfolge

Dass die postulierten Materialfestigungserscheinungen ausschließlich aus der Art der Beanspruchung resultieren, zeigen die Abbildung 6-26 und Abbildung 6-27. Dargestellt sind die elastischen Axialdehnungen in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Beanspruchungen im Rahmen der Multi-Stage-Prozedur bei unterschiedlichen Wassergehalten sowie unterschiedlichen Verdichtungsgraden der Probekörper. Erkennbar ist, dass der axiale Dehnungsverlauf unabhängig von Wassergehalt und Dichte des Probekörpers funktional ähnlich ausgeprägt ist und den progressiven Dehnungszuwachs aufzeigt, welcher bei isotroper Kompression nicht entstehen kann (ausgenommen hierbei sind Beanspruchungen mit Materialversagen durch Kornbruch) und somit ausschließlich auf die Materialfestigung (Dichteabnahme) zurückgeführt werden kann.

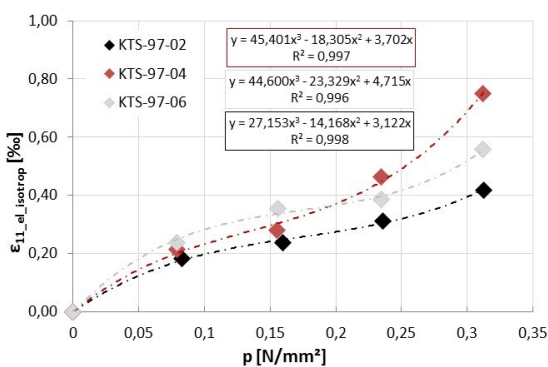


Abbildung 6-26: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression und unterschiedlichem Wassergehalt

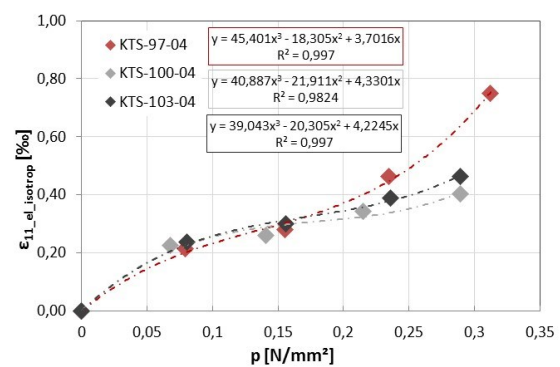


Abbildung 6-27: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression und unterschiedlichem Verdichtungsgrad

Die absoluten Unterschiede der gemessenen Dehnungen resultieren aus den bekannten Einflüssen des Wassergehaltes und der Dichte auf das Spannungs-Dehnungsverhalten von Gesteinskornmischungen und werden im weiteren Verlauf der Arbeit explizit betrachtet. Nachvollziehbar ist, dass vergleichende Analysen des Materialverhaltens oder daraus berechnete charakteristische Materialkennwerte wenig zielführend sind, da diese durch die

gezeigten erheblichen Änderungen der elastischen Materialantwort einen instationären Charakter aufweisen.

### 6.3 Begrenzung der Spannungspfade – theoretischer Ansatz

Aus den im vorhergehenden Kapitel diskutierten Problemen ergeben sich hinsichtlich der Prüfung des mechanischen Verformungsverhaltens ungebundener Gesteinskorngemische zwei wesentliche Anforderungskriterien.

- I. Im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen sind materialspezifische charakteristische Materialkennwerte/-kennwertfunktionen (des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl) essentielle Voraussetzung für Schichtdickenfestlegungen und Nutzungsdauerprognosen. Grundlage hierfür ist die möglichst realitätsnahe Einschätzung der elastischen Materialantwort. Da im Gebrauchsverhalten von Straßenbefestigungen maßgeblich von der Aktivierung der elastischen Dehnungsantwort ungebundener Gesteinskorngemische ausgegangen wird, ist dieses quasi-elastische Dehnungsverhalten zu untersuchen und explizit prüftechnisch anzusprechen.
- II. Da ungebundene Gesteinskorngemische hinsichtlich ihrer Materialantwort zustandsabhängig (z. B. in Abh. von Wassergehalt und Dichte) reagieren, ist dies bei der Erarbeitung der Prüfprozedur zwingend zu berücksichtigen, um dies in der Folge adäquat sowohl bei der rechnerischen Dimensionierung als auch bei der rechnerischen Prognose einbinden zu können.

Bereits in GULDENFELS, R. (1996) wird das Materialverhalten auf Grundlage von Ergebnissen von Wechsellastversuchen diskutiert. Unter anderem wird hierbei die sogenannte CL-Linie (innerhalb der p-q Beziehung deutlich unterhalb der Bruchgeraden) definiert, welche über- und unterkritische Bereiche voneinander trennt. Dabei postuliert GULDENFELS, R. (1996), dass die Probe sich umso mehr auflockert, je weiter der Spannungspfad in den Dilatanzbereich verläuft, da die Bewegungen an den Kontaktpunkten zunehmen, mehr Energie dissipiert wird.

Zyklisch-viskoplastische Stoffansätze beispielsweise verwendet in [STOECKER, T (2002)], beschreiben basierend auf der Unterscheidung der charakteristischen Zustände unter zyklischer Beanspruchung „zyklische Beruhigung“ und „zyklisches Versagen“. Die Modellvorstellung im Hauptspannungsraum zeigt unter anderem die reduzierte zyklische Versagensgrenze im Bezug zur statischen Bruchlinie. Im Falle der zyklischen Beruhigung konvergieren die plastischen Dehnungen gegen einen Grenzwert, so dass bei unendlich

großer Lastwechselzahl eine quasi-elastische Dehnung erwartet werden könnte, während bei Überschreitung der Fließgrenze zyklisches Versagen eintritt (Abbildung 6-28).

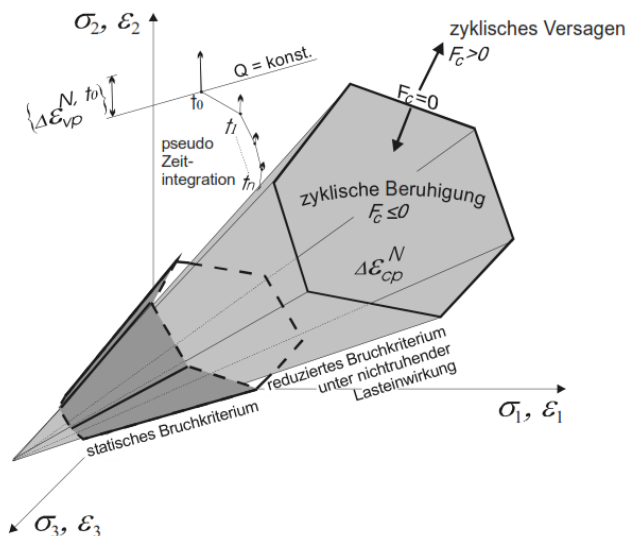


Abbildung 6-28: Abgrenzung der Verformungsarten für den Hauptspannungsraum und gewählten Stoffansatz [STOECKER, T (2002)]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Erfüllung der zu Beginn des Kapitels definierten Anforderungskriterien eine Spannungspfadbegrenzung gewählt, welche ähnlich der Modellvorstellung von GULDENFELS, R. (1996) verstanden werden kann. Auf Basis der spannungsabhängigen elastischen Axialdehnung mit Materialverfestigungs- und -entfestigungsbereichen (Abbildung 6-18), kann postuliert werden, dass durch Spannungspfade, aus welchen ein degressiver Dehnungszuwachs resultiert, im Wesentlichen Teilchentranslation in Richtung der Teilchenschwerpunkte vorliegt. Infolge dessen ist ausschließlich eine zyklische Verfestigung zu erwarten. Deshalb ist der Übergang vom degressiven zum progressiven Dehnungsverhalten als Grenzkriterium interpretierbar.

*Anmerkung:*

*Der Bezug zur elastischen Axialdehnung wurde deshalb gewählt, da auf Grund der erläuterten Randbedingungen (Kapitel 5) elastische Radialdehnungen nicht ausgewertet wurden und folglich tatsächliche Volumendehnungen nicht berechnet werden konnten.*

Den genannten Überlegungen folgend wird ein charakteristischer Grenzdehnungszustand definiert, welcher dem genannten Übergang von der Materialverfestigungen zur Materialentfestigung entspricht. Um diesen experimentell sowohl spannungs- als auch zustandsabhängig zu ermitteln, wurden Versuche mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen (in Abhängigkeit von Probenwassergehalt und Verdichtungsgrad) durchgeführt. Da die

Spannungs-Dehnungsbeziehung einen charakteristischen Wendepunkt ausweist, definiert dieser im Weiteren die Grenzdehnung- bzw. das Grenzspannungsverhältnis für den zulässigen Beanspruchungsbereich (quasi-elastischer Zustand).

Für die Approximation der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit vom Spannungszustand und Materialzustand wird ein Polynom 3. Grades nachfolgender Form verwendet:

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}; \rho_d; w) = a_{13} \cdot \sigma_{11}^3 + a_{12} \cdot \sigma_{11}^2 + a_{11} \cdot \sigma_{11} + a_{10} \quad (6-12)$$

mit  $0,075 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{22/33} \leq 0,30 \text{ N/mm}^2$

Die Koeffizientenbestimmung erfolgt nach der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wonach die Abweichungen der Funktionswerte  $f(x_i)$  von den vorhandenen Werten (Messwerten)  $y_i$  als „Fehler“  $F$  definiert werden.

$$F = y_i - f(x_i) \quad (6-13)$$

Im Rahmen des Lösungsalgorithmus wird gefordert, dass die Summe aller Fehlerquadrate  $S_F$  minimal wird.

$$S_F = \sum_{i=1}^n F^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 > \text{Minimalwert} \quad (6-14)$$

Zur Erfüllung der Forderung dieses Minima-Problems müssen die partiellen Ableitungen von  $S_F$  nach den zu bestimmenden Koeffizienten gleich 0 ergeben [DANKERT, J.(2014)]. Das sich dabei ergebende lineare Gleichungssystem in allgemeiner Form für Polynome  $m$ -ten Grades lautet

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^{2m} & \sum x_i^{2m-1} & \cdots & \sum x_i^m \\ \sum x_i^{2m-1} & \sum x_i^{2m-2} & \cdots & \sum x_i^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \sum x_i \\ \sum x_i^m & \cdots & \sum x_i & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{m-1} \\ a_m \\ \vdots \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^m y_i \\ \sum x_i^{m-1} y_i \\ \vdots \\ \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} \quad (6-15)$$

Bezogen auf das nach Glg. 6-12 zu lösende Problem ergibt sich folgendes Gleichungssystem:



$$\begin{bmatrix} \sum \sigma_{11}^6 & \sum \sigma_{11}^5 & \sum \sigma_{11}^4 & \sum \sigma_{11}^3 \\ \sum \sigma_{11}^5 & \sum \sigma_{11}^4 & \sum \sigma_{11}^3 & \sum \sigma_{11}^2 \\ \sum \sigma_{11}^4 & \sum \sigma_{11}^3 & \sum \sigma_{11}^2 & \sum \sigma_{11}^1 \\ \sum \sigma_{11}^3 & \sum \sigma_{11}^2 & \sum \sigma_{11}^1 & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{12} \\ a_{11} \\ a_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^3 y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} \quad \text{oder } |A| \cdot |a_k| = |K| \quad (6-16)$$

Die Lösungen der gesuchten Parameter  $a_{10}$  bis  $a_{13}$  erhält man beispielweise durch die Berechnung der Determinante der Koeffizientenmatrix A sowie der Determinanten der Matrix  $A_k$  bei welcher jeweils die k-te Spalte der Koeffizientenmatrix A durch K ersetzt wird (Cramersche Regel).

$$\begin{pmatrix} a_{k=4} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{k=1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{13} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{10} \end{pmatrix}, \quad \text{mit } a_k = \frac{\det A_k}{\det A} \quad \text{für } k=1 \text{ bis } 4 \quad (6-17)$$

Nach der Berechnung der Parameter des Gleichungssystems sind die Koeffizienten des Polynoms (Glg. 6-12) eindeutig bestimm- und die elastische Grenzdehnung berechenbar.

$$\varepsilon_{11\_el\_grz} = f''(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}; \rho_d; w) = \frac{d^2 \varepsilon_{11\_el}}{d\sigma_{11}^2} = 0 \quad (6-18)$$

Die zur jeweiligen elastischen Grenzdehnung gehörende Grenzspannung berechnet sich damit (in Abhängigkeit von der jeweiligen Radialspannung sowie dem Materialzustand) zu

$$\sigma_{11}(\varepsilon_{11\_el\_grz}) = \frac{-a_{12}}{6 \cdot a_{13}} \quad \text{für } (\sigma_{22/33}; \rho_d \text{ und } w) \quad (6-19)$$

Mit dieser Herangehensweise wurden die Grenzspannungsverhältnisse für jeweils 4 unterschiedliche Radialspannungsstufen materialzustandsabhängig, d. h. für 3 unterschiedliche Probenwassergehalte sowie 3 unterschiedliche Verdichtungsgrade berechnet (Versuchsdaten gem. Anlage F). Abbildung 6-29 zeigt beispielhaft die axialen Grenzdehnungen sowie die jeweiligen Spannungsverhältnisse am Beispiel einer Materialprobe mit 97 % Verdichtungsgrad und 4 % Probenwassergehalt.

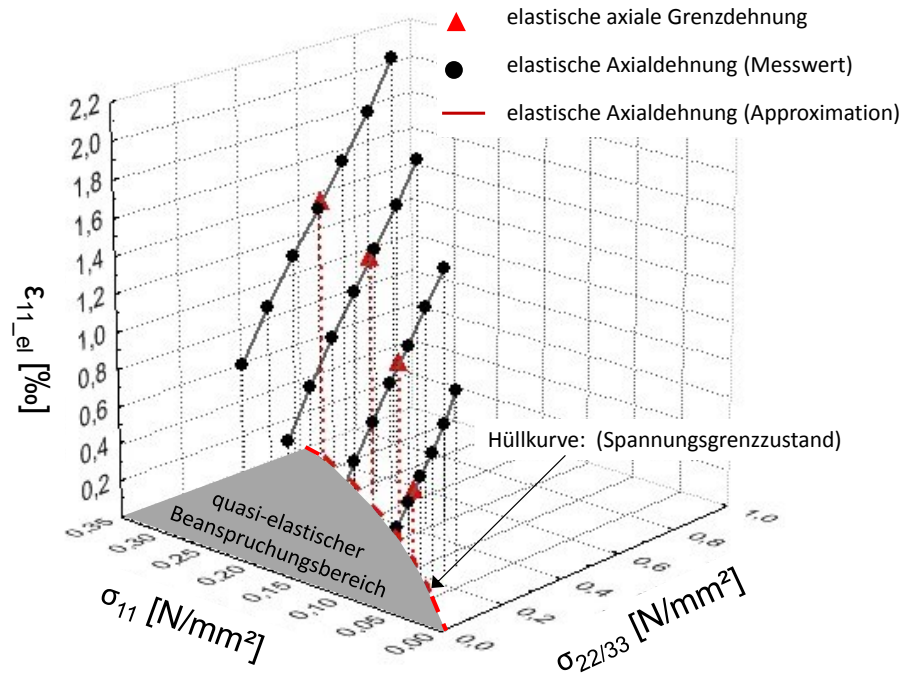


Abbildung 6-29: Darstellung der elastischen Axialgrenzdehnungen in Abhängigkeit der Hauptspannungen

#### 6.4 Begrenzung der Spannungspfade - Ergebnisse

Werden die aus den berechneten materialzustandsabhängigen Grenzdehnungen zugehörigen charakteristischen Schub- und Normalspannungen im Mohr-Coulomb-Diagramm aufgetragen (Abbildung 6-30), können unterschiedliche Sachverhalte festgestellt werden.

Zum einen kann je nach Materialzustand ein maximal aktivierbarer Reibungswinkel ( $\beta'_{GRZ}$ ) berechnet werden. Dabei ist erkennbar, dass bei vergleichsweise hohen Verdichtungsgraden (KTS 100-04; KTS 103-04) der aktivierbare Reibungswinkel größer ist, d. h. höhere Schubbeanspruchungen ertragen werden können. Nahezu identische Ergebnisse können für Proben mit geringerem Verdichtungsgrad in Verbindung mit reduziertem Wassergehalt (KTS 97-04) festgestellt werden. Das bedeutet, dass durch die Reduzierung des Probenwassergehaltes Materialumlagerungen in Verbindung mit beginnender Entfestigung später, d. h. bei größeren Verhältnissen aus Schub- und Normalspannung einsetzen als bei höheren Wassergehalten in der Probe. Der Einfluss von Wassergehalt und Verdichtungsgrad auf den materialspezifischen aktivierbaren Reibungswinkel wird hierbei in gleicher Art und Weise deutlich wie bei statischen Abscherversuchen. Zum anderen ist feststellbar, dass Proben mit dem im Vergleich geringstem Verdichtungsgrad und gleichermaßen hohen Wassergehalten nichtlineare Grenzspannungsverhältnisse aufweisen. Folglich ist der berechnete aktivierbare Reibungswinkel nicht mehr konstant, sondern von der mittleren Spannung abhängig. Das Verhältnis aus

ertragbarer deviatorischer Spannung zur mittleren Spannung wird bei steigender mittlerer Spannung kleiner. Dieses Phänomen ist aus bodenmechanischen Elementversuchen bekannt und wird beispielweise in MÜLLERSCHÖN, H. (2000) oder auch in GOTSCHOL, A. (2002) erwähnt und diskutiert.

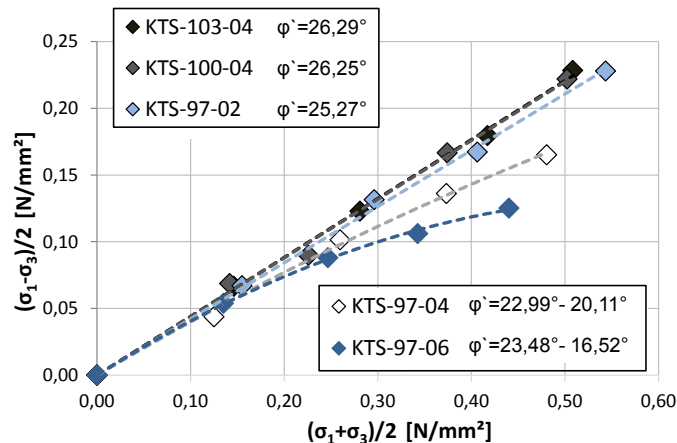


Abbildung 6-30: Grenzspannungsverhältnisse in Abhängigkeit der untersuchten Materialproben

Zusätzlich und ausschließlich zum exemplarischen Vergleich (da der Reibungswinkel des Untersuchungsmaterials im Bruchzustand nicht experimentell ermittelt wurde) wurden die berechneten aktivierbaren Reibungswinkel charakteristischen Reibungswinkeln für den statischen Bruchzustand gegenübergestellt (Abbildung 6-31).

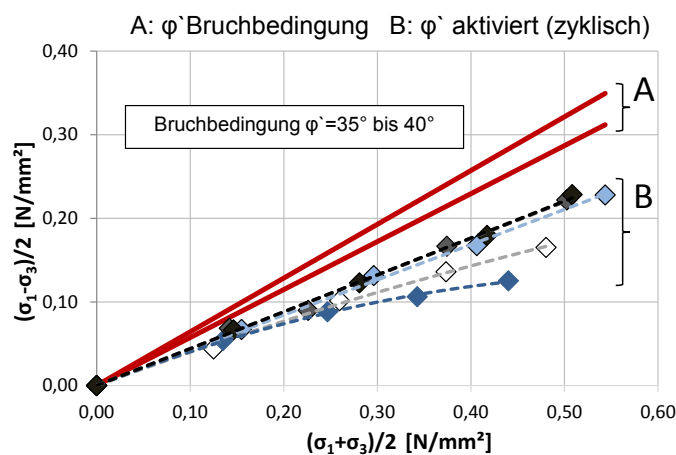


Abbildung 6-31: Vergleich der Grenzspannungsverhältnisse zu charakteristischen Bruchspannungsverhältnissen

Reibungswinkel ungebundener nichtbindiger Gesteinskornmische werden beispielweise in GIESECKE, J. et al. (2009) mit 35 ° für Kiese und Sande, in den EAB (2012) mit 35 ° bis 40 ° für Kies bzw. Sand mit dichter Lagerung oder in der europäischen Norm EUROCODE 7, Geotechnische Bemessung – 2 mit 38 ° bis 40 ° für Kies bzw. Sand mit dichter Lagerung angegeben.

Vergleicht man die berechneten aktivierbaren Reibungswinkel in Abhängigkeit vom Probenwassergehalt (Abbildung 6-32), wird deutlich, dass dieser bei steigendem Wassergehalt im Untersuchungsbeispiel von 23,11 ° auf 18,61 ° abnimmt. Gleichermäßen entspricht der Reibungswinkel ab einem Wassergehalt von 4 % keiner konstanten Größe mehr (Kennzeichnung „S“). Die im Diagramm hinterlegten Werte des Reibungswinkels entsprechen vereinfacht dem Mittelwert. Wird der Wassergehalt konstant gehalten und der Verdichtungsgrad erhöht (Abbildung 6-33), vergrößert sich der aktivierbare Reibungswinkel aufgrund des gestiegenen Umlagerungswiderstandes im Untersuchungsbeispiel von 19,90 ° (Mittelwert) auf 23,88 °.

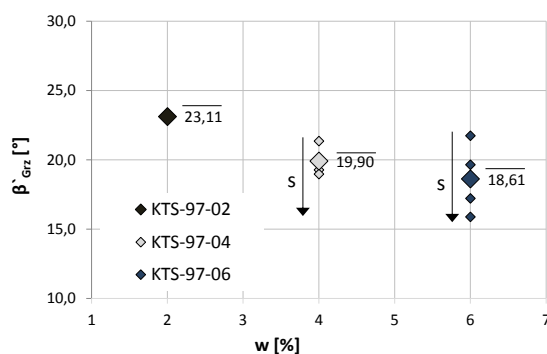


Abbildung 6-32: Grenzreibungswinkel  $\beta'_{GRZ}$  in Abhängigkeit des Probenwassergehaltes

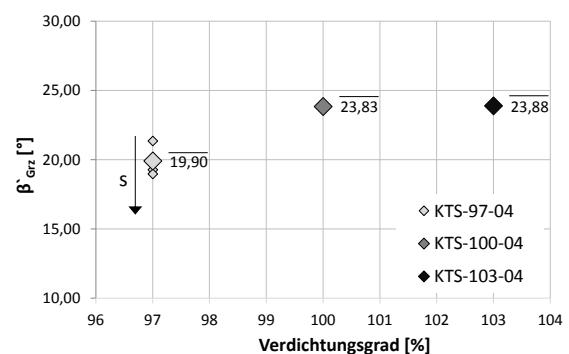


Abbildung 6-33: Grenzreibungswinkel  $\beta'_{GRZ}$  in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades

## 6.5 Zusatzbetrachtungen - Lokalisierung entstehenden Porendrucks

Wie bereits erläutert, wird bei der Prüfung ungebundener Gesteinskornmische von dränierten Bedingungen ausgegangen. Aufgrund der Grobkörnigkeit der Materialien sowie der beinhalteten vergleichsweise sehr geringen Wasseranteile treten im Korngefüge keine Porendrücke auf. Gleichermäßen wurde dargestellt, dass mit der verwendeten Triaxialprüftechnik existente Porendrücke nicht gemessen werden können. Wären dennoch Porendrücke - beispielweise infolge vergleichsweise großem Wassergehalt existent, könnten diese unter Verwendung der Trockenzelle nicht nachgewiesen werden. Konkret bedeutet dies, dass weder die Existenz noch die Entwicklung der Porendrücke mit der vorhandenen Versuchstechnik während des Versuches messtechnisch erfass- und auswertbar sind. Folglich kann die notwendige Berechnung der effektiven Spannungen in Abhängigkeit des Porendruckes nicht erfolgen. Dennoch stellte sich im Rahmen der durchgeführten Versuche, speziell der Abgrenzung der Versuchsrandbedingungen die Frage, nach welcher Festlegung der Wassergehalt nach „oben“ zu begrenzen ist. Der optimale Wassergehalt des Untersuchungsmaterials lag bei 6,1 % (vgl. Kapitel 4.2). Unter „Proctorbedingungen“

bedeutet dies, dass sich oberhalb des genannten Wassergehaltes infolge entstehender Porendrücke keine weitere Dichtezunahme erreichen lässt. Unter den triaxialen Versuchsrandbedingungen wurde versucht zu überprüfen, ob indirekt Porendruck lokalisiert werden kann. Dafür wurden zwei unterschiedliche Herangehensweisen gewählt.

In einem ersten Schritt wurde an Probekörpern mit 6,0 M.-% Wassergehalt die festgelegte Versuchsprozedur zur Abgrenzung der Grenzspannungsverhältnisse durchgeführt, um das spannungsabhängige Verformungsverhalten auch bei diesem vergleichsweise hohem Wassergehalt zu untersuchen. Abbildung 6-34 zeigt beispielhaft das wiederholt festgestellte Ergebnis dieser Versuche. Die charakteristische Spannungs-Dehnungsbeziehung mit anfänglicher Materialverfestigung, gefolgt von Materialentfestigung wie in Kapitel 6 dargestellt, kann bei diesem Wassergehalt ausschließlich bei der im Rahmen der Versuche geringsten Radialspannung ( $\sigma_{22/33}=0,075 \text{ N/mm}^2$ ) festgestellt werden. Bei größeren Stützdrücken und steigender Vertikalspannung und damit verbundener steigender mittlerer Spannung zeigt sich, dass bereits die anfängliche Zunahme der Vertikalspannung zu einer progressiven Zunahme der Axialdehnung führt. Bei weiterer Steigerung der großen Hauptspannung erfolgt der Zuwachs der Axialdehnung degressiv. Dieser, ausschließlich bei den genannten Randbedingungen festgestellte Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Spannung und gemessener elastischer Axialdehnung kann wie folgt interpretiert werden:

- Der im Vergleich hohe Wassergehalt führt bei steigender mittlerer Spannung zu Volumenverringerng und dabei zur Entwicklung von lokalen Porendrücken.
- Diese Porendrücke führen zur Destabilisierung des Korngerüstes, womit der bereits anfänglich vorhandene progressive Dehnungszuwachs erklärt werden kann.
- Mit steigender Kompressionsbeanspruchung der Probe nehmen die lokalen Porendrücke zu, da das inkompressible Wasser nicht entweichen kann.

In einem zweiten Schritt wurden Probekörper mit einem Wassergehalt von 2 M.-% bis 6 M.-% hergestellt und der festgelegten zyklischen Vorbelastungsprozedur ausgesetzt sowie die Volumenänderung über die ersten 5.000 Lastzyklen ausgewertet. Bei diesen zyklischen Versuchen entsprach die Belastungsgeschwindigkeit 5 Hz und der in Kap. 6.1 festgelegten Beanspruchung für die Vorbelastungsprozedur. Erwartet wurde, dass eine vom Wassergehalt abhängige Volumenänderung auch bei zyklischer Beanspruchung nachweisbar ist.

Abbildung 6-35 zeigt die Volumenänderung der Probe in Abhängigkeit vom Wassergehaltes und sonst gleichen Randbedingungen nach 500, 1.000 und 5.000

Lastwechseln. Zum einen ist feststellbar, dass das Volumen unabhängig vom Wassergehalt bei zunehmender Lastwechselzahl abnimmt, jedoch unterschiedlich stark in Abhängigkeit des Wassergehaltes. Während bei dem geringsten untersuchten Wassergehalt von 2 M.-% nach 5.000 LW die vergleichsweise geringste Volumenreduzierung feststellbar war, nimmt diese mit ansteigendem Wassergehalt zu, da die Umlagewilligkeit des Gesteinskorngemisches ansteigt. Gleichermäßen ist erkennbar, dass sich das zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt (der festgelegten Lastwechselzahlen) eingestellte Probekörpervolumen anfänglich, d. h. bei steigendem Wassergehalt reduziert, etwa zwischen 4 M.-% und 5 M.-% ein Extremum erreicht und sich im Fortlauf dieser Betrachtung der geschilderte Zusammenhang umkehrt. Das Extremum liegt hierbei unterhalb des Proctorwassergehaltes.

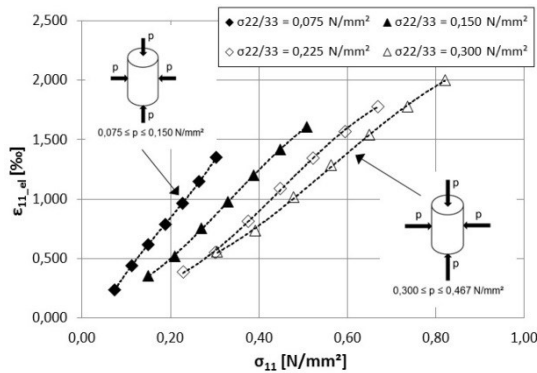


Abbildung 6-34: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Axial- und Radialspannungen (Wassergehalt 6,0 M.-%)

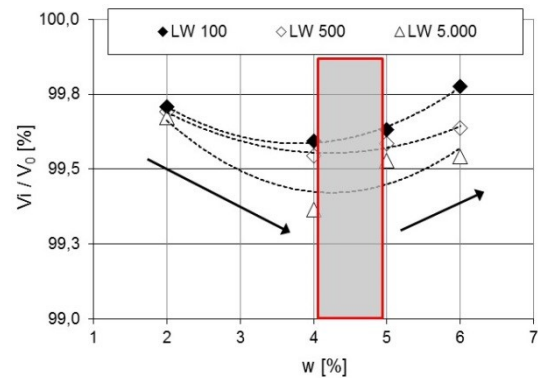


Abbildung 6-35: Relative Volumenänderung in Abhängigkeit des Wassergehaltes; Vergleich im Rahmen der Vorbelastungsprozedur

Dabei zeigt sich, dass infolge der zyklischen Beanspruchung der Probe die Volumenänderung bzw. das Volumenänderungsverhalten gesondert vom Ergebnis des Proctorversuches zu verstehen ist. Auf Grundlage der erläuterten Versuche ist ggf. der optimale Wassergehalt bei zyklischer Beanspruchung von dem bei statischer Beanspruchung zu unterscheiden. Aus der bodenmechanischen Betrachtung ist grundsätzlich bekannt, dass zwischen dränierten und undränierten Bedingungen zu differenzieren ist. Liegt eine große Durchlässigkeit des Materials vor und ist die Belastungsgeschwindigkeit klein, können dränierte Bedingungen vermutet werden. Anders verhält es sich, wenn die Durchlässigkeit gering ist und große Belastungsgeschwindigkeiten aufgebracht werden [WEHNERT, M. (2006)]. Für eine weitergehende detaillierte Erfassung und Differenzierung dieser Effekte ist die Messung von Porendrücken unumgänglich, jedoch im Rahmen dieser Versuche und der zur Verfügung stehenden Prüftechnik nicht möglich.

Im Ergebnis dieser Betrachtungen wird die Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens auf maximal 5 M.-% Wassergehalt begrenzt, da bei diesem

Wasseranteil im Gemisch und den definierten Versuchsrandbedingungen davon ausgegangen wird, dass keine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch das Entstehen lokaler Porendrücken vorliegt.

## 7 Ergebnisse - Versuche ohne thermische Beeinflussung

### 7.1 Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten

Ausgehend von dem in Kapitel 6 festgelegten Grenzspannungsverhältnis wurden die elastischen Axialdehnungen ausschließlich für Spannungspfade im definierten quasi-elastischen Beanspruchungsbereich untersucht. Zur Vereinfachung des Untersuchungsaufwandes wurde das nicht-lineare Grenzspannungsverhältnis, ermittelt an den Proben KTS 97-04, für alle im Weiteren untersuchten Materialzustände angewandt. Da für geringere Probenwassergerhalte oder größere Verdichtungsgrade größere ertragbare Schubspannungen bei gleicher Normalspannung zulässig sind, definiert folglich die gewählte Begrenzung die „Sichere Seite“. Im Ergebnis der Beanspruchungsbegrenzung nehmen, wie erwartet, die elastischen Axialdehnungen bei zunehmender Beanspruchung ausschließlich degressiv zu. Der Übergang in den progressiven Dehnungszuwachs wird nicht mehr erreicht (Abbildung 7-1). Gleichmaßen ist erkennbar, dass bei ausschließlicher Betrachtung der isotropen Beanspruchungszustände (pro Belastungszyklus im Rahmen der Multi-Stage Versuchsprozedur), die erwartete degressiv verlaufende Zunahme der Axialdehnungen in Abhängigkeit von der mittleren Spannung feststellbar ist, so wie dies bei „reinen“ Kompressionsversuchen der Fall ist. Vergleichend zeigt Abbildung 7-2 die isotropen Axialdehnungen, resultierend aus Multi-Stage-Versuchen mit und ohne Beanspruchungsbegrenzung.

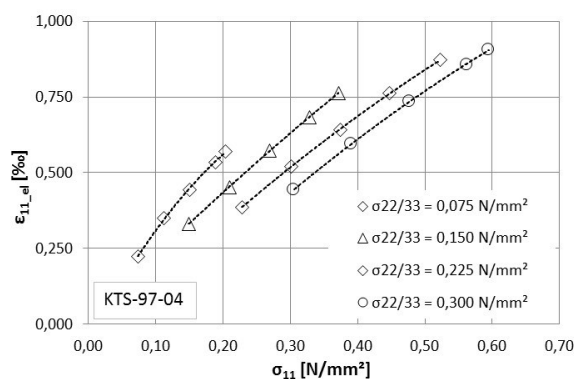


Abbildung 7-1: Elastische Axialdehnung (Messwerte) in Abhängigkeit von der Vertikalspannung bei unterschiedlichen Radialspannungen

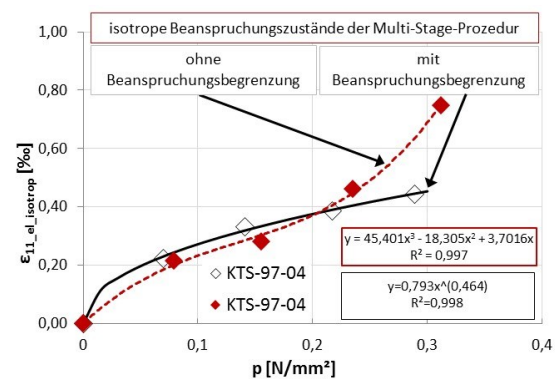


Abbildung 7-2: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Beanspruchung im Rahmen der Multi-Stage-Testprozedur ohne und mit Beanspruchungsbegrenzung

Für die Approximation der elastischen Axialdehnungen (im „quasi-elastischen“ Dehnungsbereich) in Abhängigkeit von der Beanspruchung wurde nachfolgender funktionaler Ansatz gewählt:



$$\varepsilon_{11\_el}(q; p) = b_{10} \cdot e^{(b_{11} \cdot p)} \cdot \ln(q + 1) + b_{12} \cdot p^{b_{13}} \quad (7-1)$$

Dabei setzt sich die elastische Materialantwort (elastische axiale Gesamtdehnung) aus den Dehnungsanteilen resultierend aus hydrostatischer und deviatorischer Beanspruchung zusammen, welche sich wie folgt berechnen:

$$\varepsilon_{11\_el\_isotrop}(p) = b_{12} \cdot p^{b_{13}} \quad (7-2)$$

und

$$\varepsilon_{11\_el\_dev} = \varepsilon_{11\_el} - \varepsilon_{11\_el\_isotrop} \quad (7-3)$$

Die isotrope elastische Axialdehnung als Funktion der mittleren Spannung, wird auf Basis der Versuchsergebnisse eigenständig gefittet, da die isotrope Beanspruchung Teil der Testprozedur ist. Abbildung 7-3 zeigt beispielhaft die auf Grundlage der Messdaten berechneten elastischen Axialdehnungen in Abhängigkeit von den aufgetragenen Spannungszuständen. Das Approximationsergebnis (Regressionsflächenfunktion) unter Verwendung der gewählten Ansatzfunktion zeigt Abbildung 7-4. Für die Approximationsfunktion gelten zwingend die Randbedingungen zur Begrenzung der Spannungspfade nach „Oben“, so dass Extrapolationen nicht zulässig sind. Nach „Unten“ ist der Funktionsverlauf, bedingt durch die Prüftechnik, nicht durch weitere Stützpunkte untermauerbar.

$$b_{10}=1,5521 \quad b_{12}=0,8579 \quad R^2 = 0,986$$

$$b_{11}=0,1683 \quad b_{13}=0,4998$$

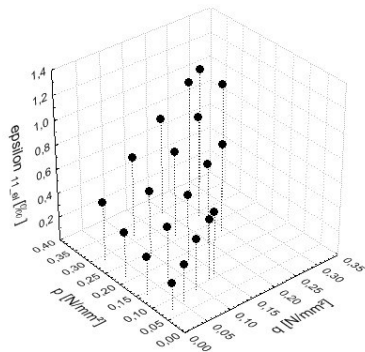


Abbildung 7-3: Elastische Axialdehnung (Messwerte) in Abhängigkeit des Spannungszustandes

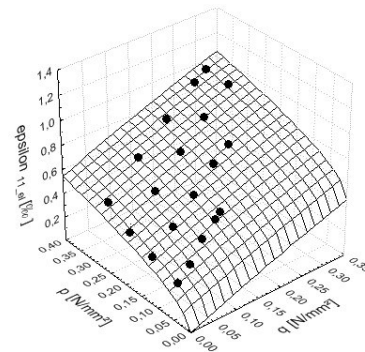


Abbildung 7-4: Elastische Axialdehnung (Messwerte und Approximationsfunktion) in Abhängigkeit des Spannungszustandes

Die elastische Materialantwort ist infolge eines definierten Spannungszustandes vom Materialzustand abhängig. Die auf der Seite 7-4 dargestellten Abbildungen verdeutlichen dies für die unterschiedlichen untersuchten Wassergehalte und Verdichtungsgrade. Abbildung

7-5, Abbildung 7-7 und Abbildung 7-9 veranschaulichen die Änderung der elastischen Axialdehnung bei gleichem Wassergehalt der Probe (4 M.-%) und steigendem Verdichtungsgrad (97 % bis 103 %  $D_{Pr}$ ). Am erkennbar veränderten Verlauf der Flächenfunktion wird die Abnahme der elastischen Axialdehnung bei steigendem Verdichtungsgrad und gleichen Beanspruchungen deutlich. Erklärbar ist dieses Phänomen bekanntermaßen dadurch, dass eine höhere Lagerungsdichte des Gesteinskorngemisches zu einer steigenden Zahl spannungsübertragender Kontaktpunkte im Korngerüst und folglich zu einem vergrößerten Verformungswiderstand führt.

Gleichermaßen erkennbar ist die deutliche Zunahme der elastischen Axialdehnungen bei steigendem Probenwassergehalt (Abbildung 7-6, Abbildung 7-8 und Abbildung 7-10). Auch dieses Verhalten musste bekanntermaßen feststellbar sein, da Wasser innerhalb von Gesteinskorngemischen zur Erhöhung der Umlagewilligkeit führt.

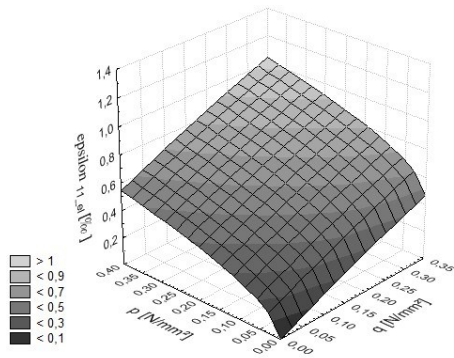
Zur besseren Darstellung der Materialzustandsabhängigkeit auf die elastische Materialantwort werden in Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 die Dehnungsunterschiede relativ dargestellt. Der exemplarische Vergleich erfolgt jeweils bei maximaler Beanspruchung pro Belastungszyklus (Lastzyklus I bis IV – Spannungspfad 5; vgl. Anlage G). Abbildung 7-11 zeigt den Unterschied zwischen Dehnungen bei einem Verdichtungsgrad von 97 % und/oder 100 % zur (auf 1 normierten) Dehnung bei einem Verdichtungsgrad von 103% (und konstantem Wassergehalt von 4 %). Bei der im Vergleich geringsten Beanspruchung I/5 (Belastungszyklus I/Spannungspfad 5) führt ein um 3 % reduzierter Verdichtungsgrad zu einer Dehnungszunahme von 12 %. Aus einem um weitere 3% reduzierten Verdichtungsgrad, resultiert eine Dehnungszunahme um 21 %. Während der relative Dehnungsunterschied unabhängig vom betrachteten Spannungspfad zwischen 103 % und 100 % Verdichtungsgrad nahezu identisch ausfiel, erhöhten sich die elastischen Dehnungen bei Verdichtungsgraden von 97 % überproportional stark.

Analog zu den Betrachtungen zum Einfluss des Verdichtungsgrades auf die spannungsabhängige elastische Dehnung, erfolgten die Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehaltes auf das Dehnungsverhalten, bei einem konstanten Verdichtungsgrad von 97 % (Abbildung 7-12). Die Referenzgröße (normiert auf 1) stellt die Probe mit einem Wassergehalt von 2 % dar. Während bei einer Steigerung des Probenwassergehaltes von 2 % auf 4 % die elastische Materialantwort bereits um 7 % bis 10% anstieg, konnte bei einer Erhöhung des Probenwassergehaltes auf 5 % eine erhebliche Dehnungszunahme um etwa 50 % beobachtet werden.

$b_{10}=1,5521$   
 $b_{11}=0,1683$

$b_{12}=0,8579$   
 $b_{13}=0,4998$

$R^2 = 0,986$



$b_{10}=1,7932$   
 $b_{11}=-0,2255$

$b_{12}=0,7376$   
 $b_{13}=0,5315$

$R^2 = 0,956$

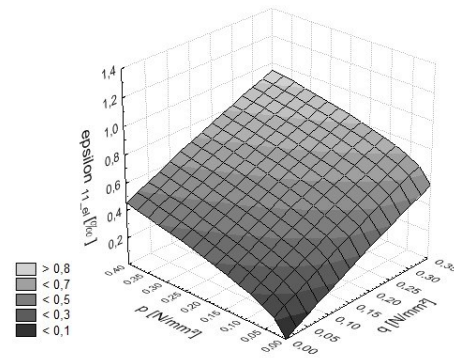


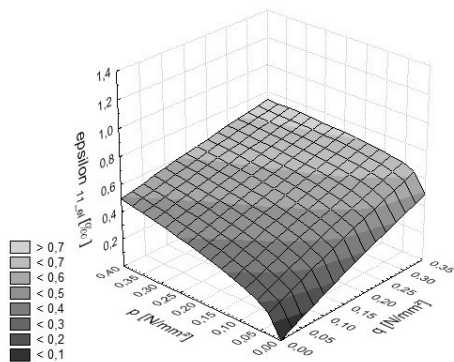
Abbildung 7-5: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

Abbildung 7-6: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 2 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

$b_{10}=1,6306$   
 $b_{11}=-0,6976$

$b_{12}=0,7423$   
 $b_{13}=0,44499$

$R^2 = 0,969$



$b_{10}=1,5521$   
 $b_{11}=0,1683$

$b_{12}=0,8579$   
 $b_{13}=0,4998$

$R^2 = 0,986$

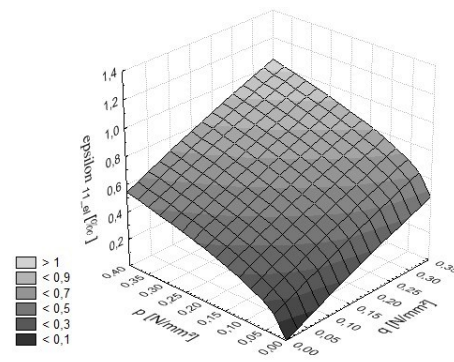


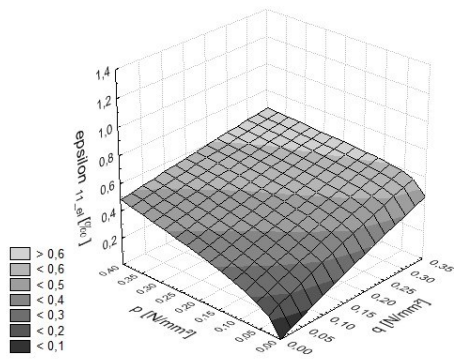
Abbildung 7-7: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 100 % Verdichtungsgrad

Abbildung 7-8: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

$b_{10}=1,5246$   
 $b_{11}=-2,2379$

$b_{12}=0,7571$   
 $b_{13}=0,4994$

$R^2 = 0,945$



$b_{10}=3,2812$   
 $b_{11}=-0,2237$

$b_{12}=0,7844$   
 $b_{13}=0,3858$

$R^2 = 0,984$

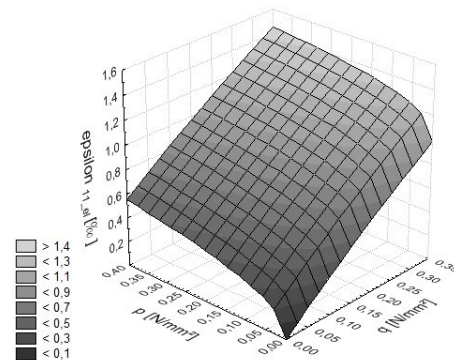


Abbildung 7-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 103 % Verdichtungsgrad

Abbildung 7-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 5 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

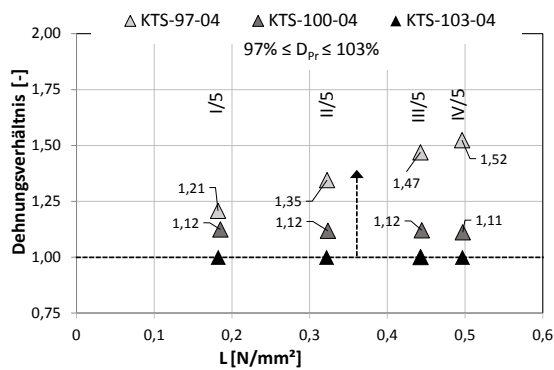


Abbildung 7-11: Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen (Belastungszyklus I bis IV – Spannungspfad 5)

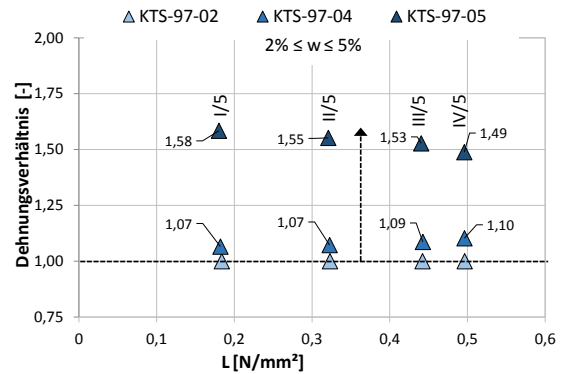


Abbildung 7-12: Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Probenwassergehalten (Belastungszyklus I bis IV – Spannungspfad 5)

Werden alle untersuchten Materialzustände bei den jeweils größten Beanspruchungen pro Belastungszyklus vergleichend gegenübergestellt, ist erkennbar, dass die geringste elastische Axialdehnung bei dem größten untersuchten Verdichtungsgrad von 103 % (und 4 M.-% Probenwassergehalt) vorlag. Im Vergleich dazu konnten die größten Dehnungen bei 5 M.-% Probenwassergehalt (und 97 % Verdichtungsgrad) festgestellt werden (Abbildung 7-13). Im Vergleich dieser beiden „Extremzustände“ kann festgestellt werden, dass bei gleicher Beanspruchung ein reduzierter Verdichtungsgrad in Kombination mit einem erhöhten Wassergehalt zu einer Dehnungszunahme um den Faktor 2 führen kann (Abbildung 7-14).

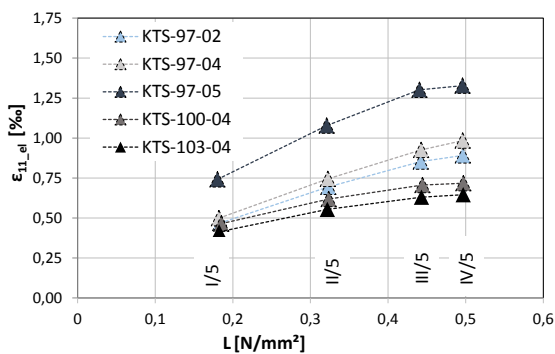


Abbildung 7-13: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei allen untersuchten Materialzuständen (Lastzyklus I bis IV – Spannungspfad 5)

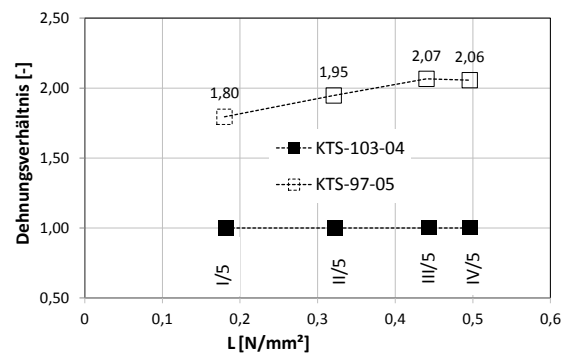


Abbildung 7-14: Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge zwischen 97 % Trockenichte und 5 % Wassergehalt sowie 103 % Trockenichte und 4 % Wassergehalt (Lastzyklus I bis IV – Spannungspfad 5)

Hierbei wird deutlich, wie stark sich Materialänderungen (bereits beginnend beim Einbau) und Materialzustandsänderungen während der Nutzungszeit der Befestigung und dabei existenter jahreszeitlicher klimatischer Veränderungen (Wassergehalt) auf die elastische Materialantwort von ToB auswirken können. Bisher wurde im Rahmen der Untersuchungen das mechanische Verformungsverhalten im Hinblick auf die elastische axiale Gesamt-

dehnung analysiert. Im Folgenden wird zusätzlich der Fokus auf die volumenändernden und gestaltändernden elastischen Dehnungen gerichtet. Abbildung 7-15 zeigt die elastischen Axialdehnungen in Abhängigkeit von der mittleren Spannung (und ausschließlich isotroper Beanspruchung) sowie den drei untersuchten Verdichtungsgraden bei konstantem Wassergehalt (4 M.-%). Erkennbar sind der degressive Dehnungszuwachs bei steigender mittlerer Spannung, infolge der zunehmenden Materialversteifung sowie die Reduzierung der elastischen Dehnungsantwort bei steigendem Verdichtungsgrad. Abbildung 7-16 zeigt bei gleicher Darstellungsart die tendenzielle Zunahme der elastischen Dehnung bei Erhöhung des Wassergehaltes im Gemisch unter dränierten Bedingungen.

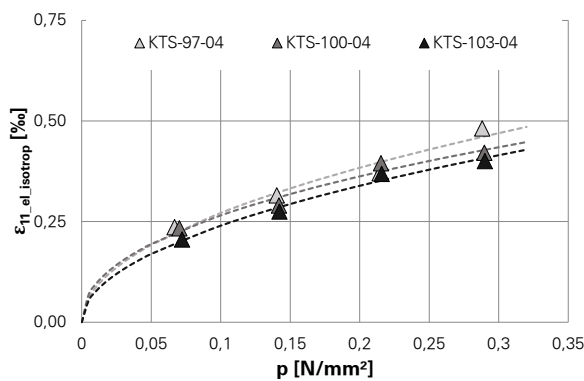


Abbildung 7-15: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung (isotrope Beanspruchung) sowie dem Verdichtungsgrad (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 1)

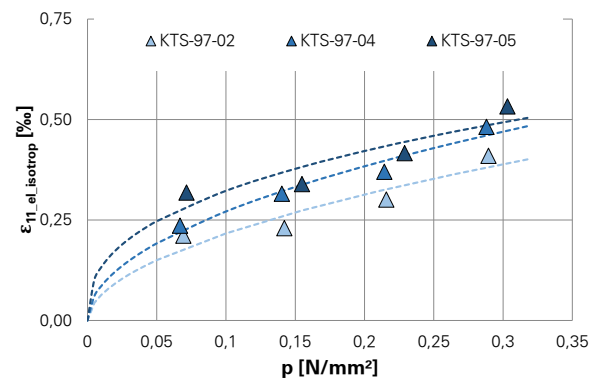


Abbildung 7-16: Isotrope elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung (isotrope Beanspruchung) sowie dem Probenwassergehalt (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 1)

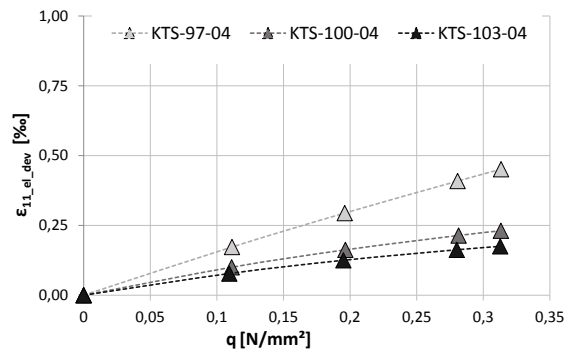


Abbildung 7-17: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator sowie dem Verdichtungsgrad (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 5)

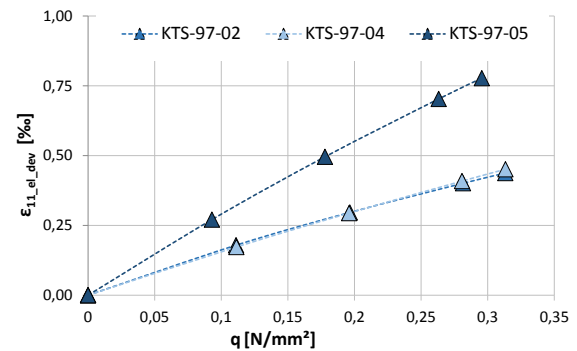


Abbildung 7-18: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator sowie dem Probenwassergehalt (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 5)

In gleicher Art und Weise, wie zuvor erläutert, werden die aus dem Deviator resultierenden elastischen Dehnungen durch den Materialzustand beeinflusst. Abbildung 7-17 zeigt die elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden. Erkennbar ist auch hier der Anstieg der gestaltändernden elastischen Dehnungen bei Reduzierung des Verdichtungsgrades (und gleicher Beanspruchung). Der Einfluss des Probenwassergehaltes ist ebenfalls feststellbar (Abbildung 7-18), so dass ge-

schlussfolgert werden kann, dass sowohl die aus volumenändernden Spannungszuständen hervorgerufenen Dehnungen als auch die aus gestaltändernden Spannungszuständen hervorgerufenen Dehnungen vom Materialzustand abhängig sind.

Nachfolgend wurden die elastischen Axialdehnungen resultierend aus mittlerer Spannung und Deviator berechnet und sowohl ins Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung (dehnungsbasiert) als auch ins Verhältnis zur Spannungspfadlänge (spannungsbasiert) gesetzt, so dass für ausgewählte Beanspruchungs- und Materialzustände Änderungen des Dehnungsverhältnisses analysiert werden konnten (Abbildung 7-19 bis Abbildung 7-22). Die Betrachtungen erfolgen am Beispiel der Spannungspfade 1 bis 5 des Belastungszyklus III.

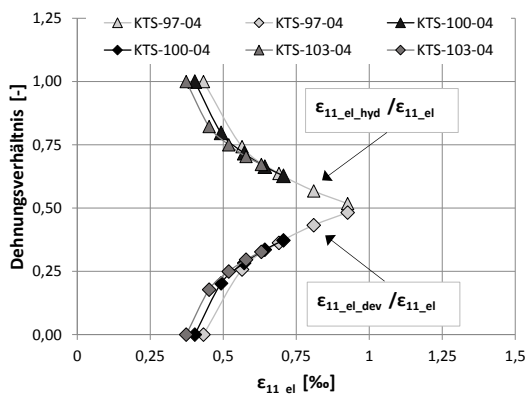


Abbildung 7-19: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III)

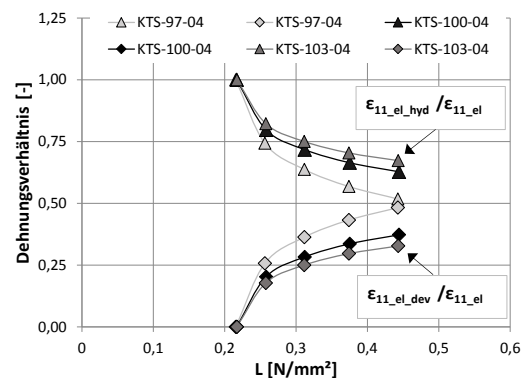


Abbildung 7-20: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III)

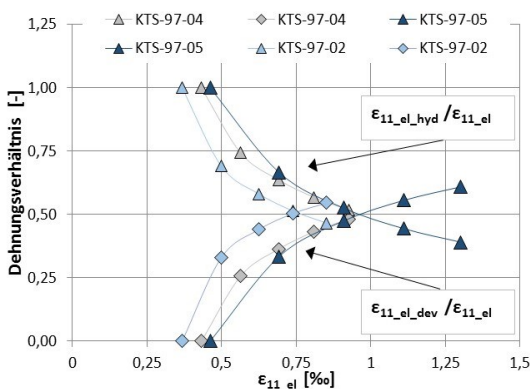


Abbildung 7-21: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III)

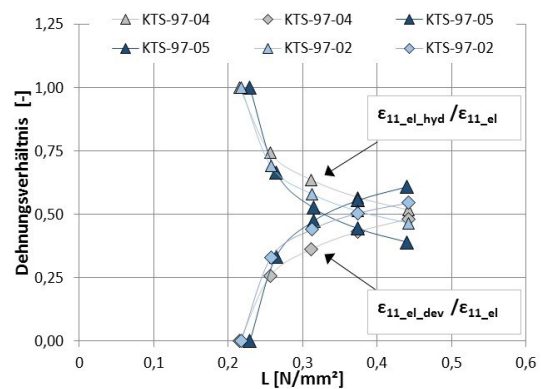


Abbildung 7-22: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III)

Abbildung 7-19 zeigt die Unterschiede der Dehnungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Gesamtdehnung (in axialer Richtung) und dem Verdichtungsgrad. Erkennbar ist, dass beginnend von dem isotropen Spannungszustand (und daraus resultierender Volumendehnung) und größer werdender deviatorischer Spannungskomponente die aus isotroper Spannung resultierende Dehnung abnimmt, während die aus deviatorischer Spannung resultierende Dehnung zunimmt. Bei spannungsbasierter Betrachtung (Abbildung 7-20) wird deutlich, dass bei gleicher Beanspruchung und steigendem Verdichtungsgrad weniger deviatorischen Dehnungsanteile mobilisiert werden. Bezogen auf die axiale Gesamtdehnung erreichen die deviatorischen Dehnungsanteile bei Verdichtungsgraden von 100 % und 103 % etwa 37 %, während bei nur noch 97 % Verdichtungsgrad bereits rd. 50 % erreicht werden.

Die gleiche Betrachtungsweise bei unterschiedlichen Probenwassergehalten zeigt sehr ähnliche Ergebnisse der Dehnungsanteile bei Probenwassergehalten von 2 % und 4 %. Sowohl die aus hydrostatischen Spannungszuständen als auch aus deviatorischen Spannungszuständen resultierenden Dehnungen betragen rd. 50 % der axialen Gesamtdehnung. Bei 5 % Probenwassergehalt nimmt, wie bereits gezeigt, die Gesamtdehnung erheblich zu, und die aus dem Deviator resultierende Dehnung erreicht etwa 60 % der Gesamtdehnung (Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Ausführungen zu Einfluss von Wassergehalt und Verdichtungsgrad ausschließlich für das Untersuchungsmaterial unter den festgelegten Untersuchungsrandbedingungen gelten. Die herstellungsbedingte Variabilität des Materialverhaltens ist hierbei nicht berücksichtigt.

### 7.2 Spannungs- und materialzustandsabhängiger Elastizitätsmodul

Die Berechnung des spannungsabhängigen Elastizitätsmoduls für verschiedene Materialzustände erfolgt wie in Kapitel 3 (Auswertung der Versuche) erläutert. Basis ist die funktionale Beschreibung der Abhängigkeit der elastischen Axialdehnung von den Hauptspannungen  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22/33}$ , welche die elastische Axialdehnung beginnend bei Extensionsbeanspruchung als auch bei Kompressionsbeanspruchung (unter der Voraussetzung der Beanspruchungsbegrenzung) geeignet nachbildet.

Die Abbildung 7-23 zeigt beispielhaft die approximierete Spannungs-Dehnungsbeziehung in der  $\sigma_{11} - \epsilon_{11\_el}$ -Ebene infolge der aufgetragenen Spannungspfade im Kompressionsbereich (bei konstanter Radialspannungsamplitude).



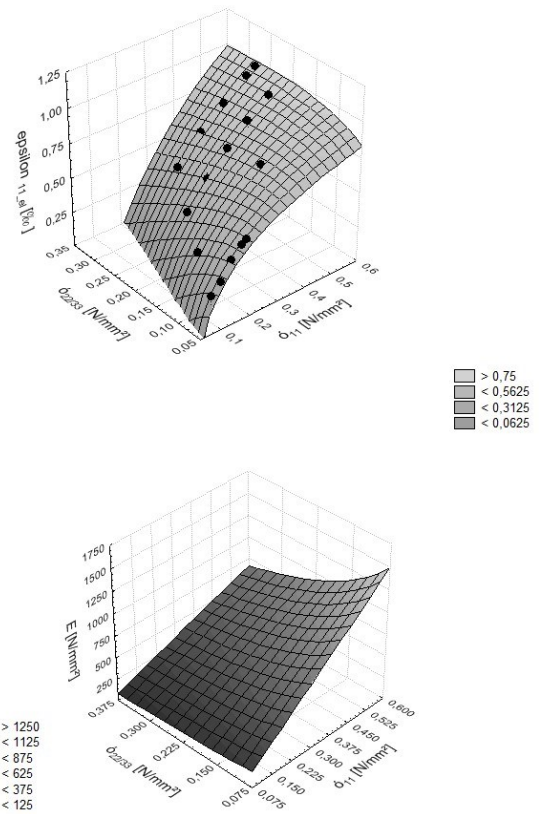
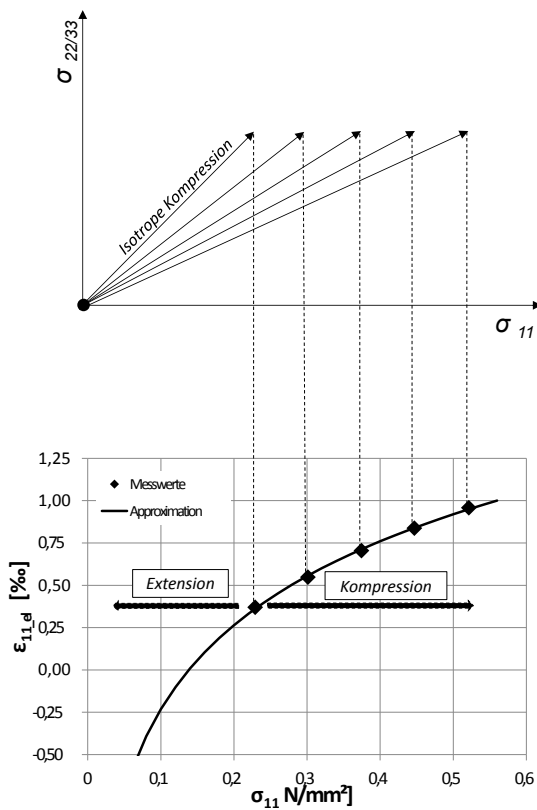


Abbildung 7-23: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kompressionsspannungspfade sowie die daraus resultierenden gemessenen und approximierten elastischen Axialdehnungen ( $\sigma_{11} - \varepsilon_{11\_el}$  Ebene)

Abbildung 7-24: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Trockendichte (oben); Elastizitätsmodul bei 4% Wassergehalt und 97 % Trockendichte (unten)

Aufbauend auf dem grundlegenden funktionalen Zusammenhang

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) \tag{7-4}$$

und der gewählten Ansatzfunktion

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) = \ln(\sigma_{11}) \cdot (b_{11} \cdot \sigma_{22/33} + b_{12}) + (b_{13} \cdot \sigma_{22/33}^{b_{14}}) \tag{7-5}$$

berechnet sich der Elastizitätsmodul nach einmaliger Differentiation nach  $\sigma_{11}$  zu

$$\frac{d\varepsilon_{11\_el}}{d\sigma_{11}} = \frac{(b_{10} \cdot \sigma_{22/33} + b_{11})}{\sigma_{11}} = \frac{1}{E} \tag{7-6}$$

Die grafische Darstellung zeigt Abbildung 7-24. Für die berechneten Elastizitätsmoduln wird der Definitionsbereich gem. dem untersuchten Beanspruchungsbereich festgelegt.



$$D_f(\sigma_{22/33}) = \left[ 0,075 \frac{N}{mm^2} \leq \sigma_{22/33} \leq 0,30 \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$D_f(\sigma_{11}) = f(\sigma_{22/33}) \text{ mit } \sigma_{22/33} \leq \sigma_{11}$$

Abbildung 7-25, Abbildung 7-27 und Abbildung 7-29 zeigen die spannungsabhängigen berechneten Elastizitätsmoduln bei gleicher Beanspruchung, gleichem Wassergehalt jedoch unterschiedlichem Verdichtungsgrad.

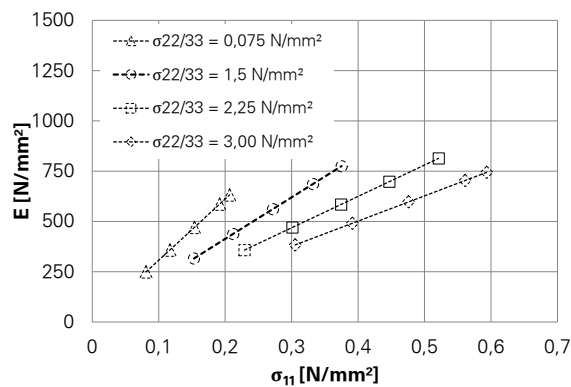


Abbildung 7-25: Elastizitätsmodul bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad

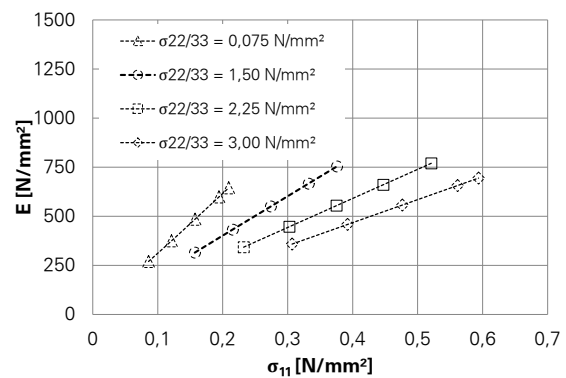


Abbildung 7-26: Elastizitätsmodul bei 2% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad

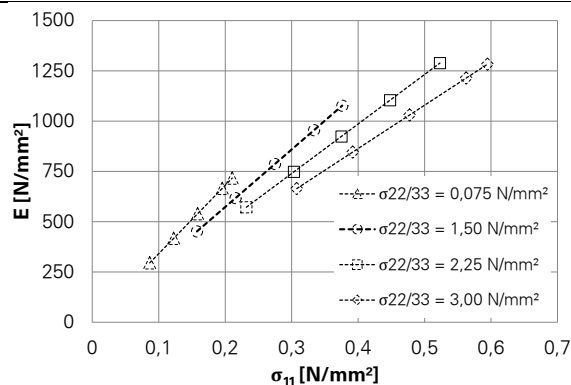


Abbildung 7-27: Elastizitätsmodul bei 4% Wassergehalt und 100% Verdichtungsgrad

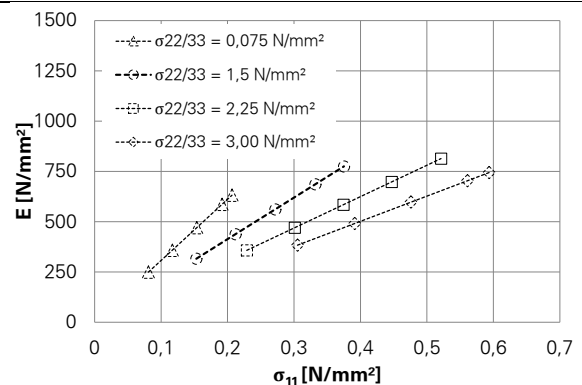


Abbildung 7-28: Elastizitätsmodul bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad

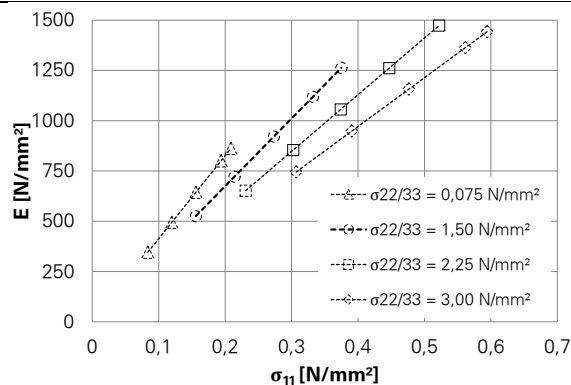


Abbildung 7-29: Elastizitätsmodul bei 4% Wassergehalt und 103% Verdichtungsgrad

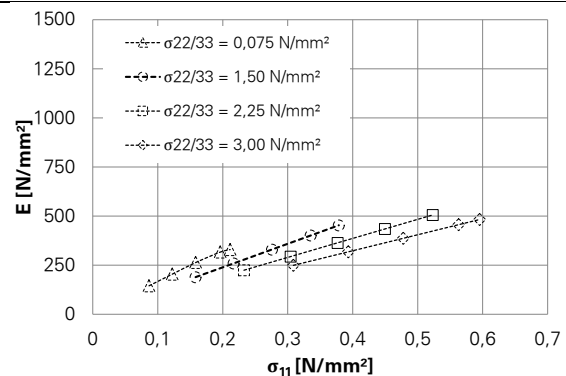


Abbildung 7-30: Elastizitätsmodul bei 5% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad

Hierbei wird neben der grundsätzlich bekannten Zunahme des Elastizitätsmoduls die starke proportionale Abhängigkeit des Dichteinflusses deutlich. In gleicher Art und Weise zeigen Abbildung 7-26, Abbildung 7-28 und Abbildung 7-30 den umgekehrt proportionalen Einfluss des Wassergehaltes auf den Elastizitätsmodul.

Abschließend werden die Elastizitätsmoduln vergleichend betrachtet, wobei die jeweils größten Beanspruchungen pro Belastungszyklus (Spannungspfad 5 / Lastzyklus I bis IV) zugrunde gelegt werden. Erkennbar ist, dass die Elastizitätsmoduln bei Reduzierung des Verdichtungsgrades abnehmen. Für den Vergleich wurde der Elastizitätsmodul der Materialprobe KTS-103-04 auf 1 normiert. Bei einer Abnahme des Verdichtungsgrades um 6 % verringern sich die Elastizitätsmoduln (bezogen auf die betrachteten Spannungspfade) um rd. 50 % bis 75 % (Abbildung 7-31). Ähnlich gestaltet sich der Einfluss des Wassergehaltes auf die berechneten Elastizitätsmoduln (Abbildung 7-32). Bei auf 1 normierten Elastizitätsmoduln der Materialprobe KTS-97-02 sind nur geringfügige Unterschiede zur Materialprobe KTS-97-04 festgestellt worden (erklärbar durch herstellungsbedingte Materialstreuungen), jedoch deutlich Reduzierungen auf etwa 50 % bis 75 % des Bezugselastizitätsmoduls bei 5 M.-% Probenwassergehalt.

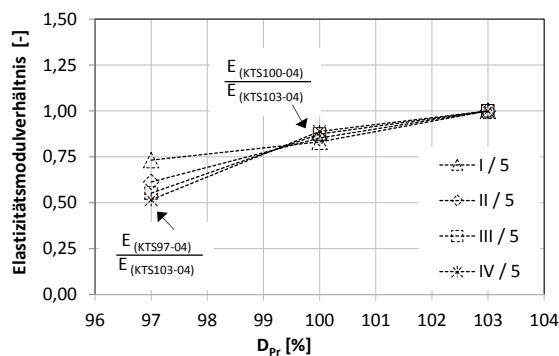


Abbildung 7-31: Elastizitätsmodulverhältnis in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad bei definierten Beanspruchungszuständen

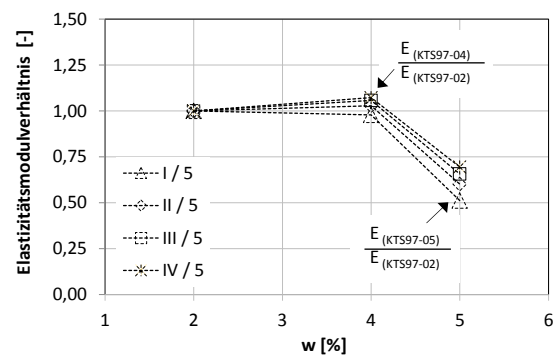


Abbildung 7-32: Elastizitätsmodulverhältnis in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei definierten Beanspruchungszuständen

Verdeutlicht wird hierbei nochmals der bekanntermaßen große Einfluss unterschiedlicher Materialzustände von ToB auf charakteristische Materialkennwerte und den daraus resultierenden Gesamtbeanspruchungszustand einer Straßenbefestigung sowie deren Nutzungsdauer.

### 7.3 Spannungs- und materialzustandsabhängige Querdehnzahl

Die Querdehnzahl kann (auch für die unterstellten isotropen Materialbedingungen) nicht direkt aus dem Verhältnis der messtechnisch erfassten Quer- und Längsdehnung bestimmt werden. Deshalb wird die Querdehnzahl auf Grundlage der Elastizitätsmoduln und inkre-

menteller Spannungsänderungen beider Hauptspannungen berechnet (vgl. Kapitel 5). Abbildung 7-33 zeigt am Beispiel einer Materialprobe KTS-97-02 die berechneten Querdehnzahlen in Abhängigkeit vom Spannungszustand sowie vom am Spannungspunkt berechneten Elastizitätsmodul.

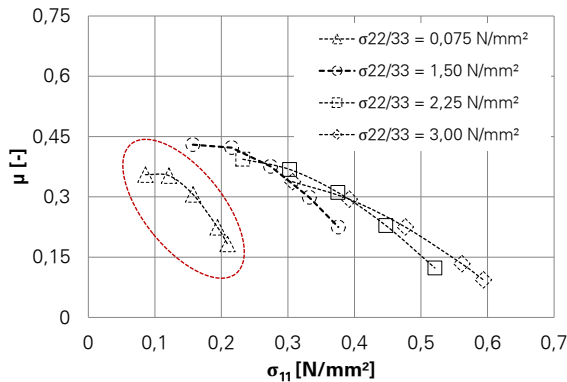


Abbildung 7-33: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und definierter Radialspannung am Beispiel der Probe KTS-97-02

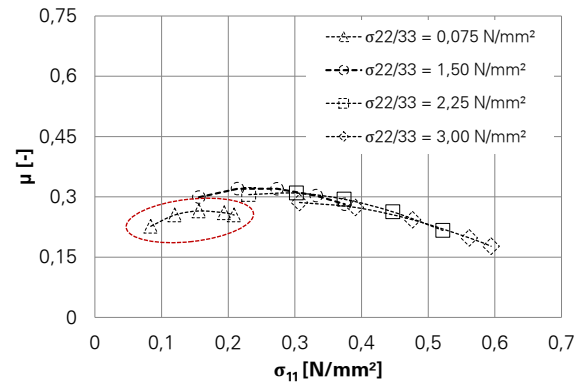


Abbildung 7-34: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und definierter Radialspannung am Beispiel einer Probe KTS-103-04

Erkennbar ist die Abnahme der Querdehnzahl bei steigender Materialbeanspruchung, welche im Rahmen der vorliegenden Messreihen grundsätzlich bestätigt werden kann. Die Ergebnisse bestätigen die in der Literatur postulierte qualitative Abhängigkeit der Querdehnzahl vom Spannungsverhältnis (vgl. Kapitel 3). Für granulare Strukturen (und damit auch Gesteinskornmische) wird im spannungsfreien Zustand von Inkompressibilität (vergleichbar einem Fluid) ausgegangen, weshalb der Wert der Querdehnzahl 0,5 beträgt. Mit steigender Materialbeanspruchung verringert sich die Querdehnzahl, und das Materialverhalten ähnelt zunehmend dem von Festkörpern. Eine Ausnahme innerhalb der Versuchsreihen stellen z. T. die Berechnungsergebnisse der Querdehnzahl bei Beanspruchungen mit der im Vergleich kleinsten Radialspannung (0,075 N/mm<sup>2</sup>) dar. Der spannungsabhängige Verlauf der Querdehnzahl ist hierbei konträr, d. h. nimmt mit steigendem Spannungsverhältnis zu (Abbildung 7-33 und Abbildung 7-34 – rote Markierung). Dieser unplausible Zusammenhang kann aus der bereits erläuterten sehr schwierigen Versuchsdurchführung bei derart kleinen Stützdrücken mit Messwerten, welche nur eingeschränkt zu verwenden sind, resultieren. Deshalb werden diese Versuchsdaten in den nachfolgenden zur Betrachtungen zur Querdehnzahl vernachlässigt.

Festgestellt werden konnte, dass bei Materialproben mit vergleichsweise hohen Verdichtungsgraden (KTS 100-04 und KTS 103-04) eine spannungsabhängige Querdehnzahl zwischen 0,35 und 0,15 berechnet werden kann. Größer fällt die Bandbreite bei den Materialproben mit den im Vergleich geringsten Verdichtungsgraden aus. Hier erreichen die Querdehnzahlen Werte zwischen etwa 0,45 und 0,1. Eine Erklärung hierfür kann die größere Kompressibilität des Materials bei abnehmendem Verdichtungsgrad sein, womit eine Ver-

ringerung der Querdehnzahl einhergeht. Dennoch bleibt auch hier darauf zu verweisen, dass bereits geringe Materialstreuungen deutlichen Einfluss auf die Berechnungswerte haben und deshalb weitere Validierungen für die spannungs- und materialzustandsabhängige Modellierung der Querdehnzahl erforderlich sind. Exemplarisch wird nachfolgend auf Grundlage der Versuchsdaten der Probe KTS 97-02 gezeigt, wie ein funktionaler Ansatz zur spannungsabhängigen Beschreibung der Querdehnzahl aussehen kann (Abbildung 7-35).

$$\begin{array}{lll} b_{10}=0 & b_{12}=-1,212 & b_{14}=0,3194 \\ b_{11}=0,5576 & b_{13}=1,7235 & R^2=0,973 \end{array}$$

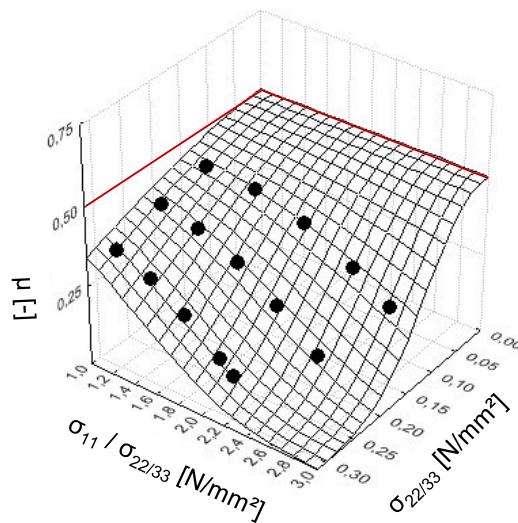


Abbildung 7-35: Querdehnzahl in Abhängigkeit von Spannungsverhältnis und Radialspannung am Beispiel der Probe KTS-97-02

Berechnet wird hierbei die Querdehnzahl als Funktion des Spannungsverhältnisses und des Stützdruckes, d. h. der kleinen Hauptspannung. Grundlage der mathematischen Formulierung ist ein Sigmoidansatz mit einseitigem Grenzwert (0,5) mit folgender Struktur

$$\mu = f\left(\sigma_{22/33}; \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}}\right) = \frac{1}{2} \cdot e^{\left(-\left(\frac{\sigma_{22/33}-b_{10}}{b_{11}}\right)^{b_{12}}\right)} \quad (7-7)$$

Die Koeffizienten werden wie folgt festgelegt/berechnet:

$$b_{10} = 0$$

$$b_{11} = f\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}}\right) = a_{11} \cdot \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}}\right)^{a_{12}} \quad (7-8)$$

$$b_{12} = f\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}}\right) = a_{13} \cdot \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22/33}}\right)^{a_{14}} \quad (7-9)$$

Würde die Materialbeanspruchung über die in den Versuchsreihen aufgebrauchten, begrenzten Beanspruchungen hinaus gesteigert (zunehmende gestaltändernde Beanspruchung), ist aufgrund von Materialdilatanz ein Anstieg der Querdehnzahl zu erwarten. Derartige Beanspruchungen werden im Rahmen der vorliegenden Versuche jedoch ausgeschlossen. Hinsichtlich der Materialzustandsabhängigkeit konnte ein wiederholbarer direkter Zusammenhang zwischen der Querdehnzahl und dem Verdichtungsgrades bzw. dem Wassergehalt (und gleichen Beanspruchungsrandbedingungen) nicht explizit festgestellt werden. Auffallend innerhalb der Versuchsreihen war jedoch die bereits genannte, deutlich stärker ausgeprägte Abnahme der Querdehnzahlen bei steigendem Elastizitätsmodul (steigender Beanspruchung) und vergleichsweise lockerer Materiallagerung, d. h.  $D_{Pr} = 97\%$  (Abbildung 7-36, Abbildung 7-37).

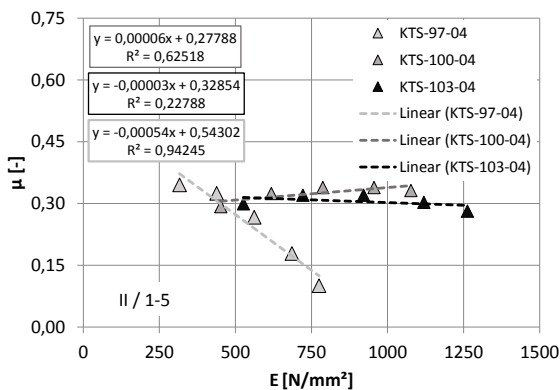


Abbildung 7-36: Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Querdehnzahl bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus II)

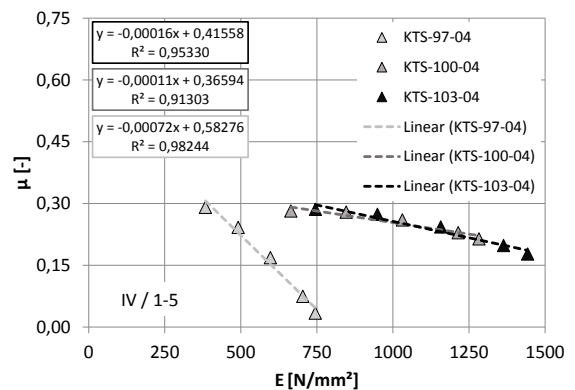


Abbildung 7-37: Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Querdehnzahl bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus IV)

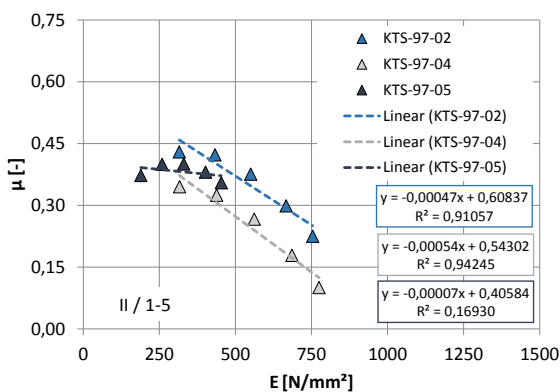


Abbildung 7-38: Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Querdehnzahl bei unterschiedlichen Wassergehalten (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus II)

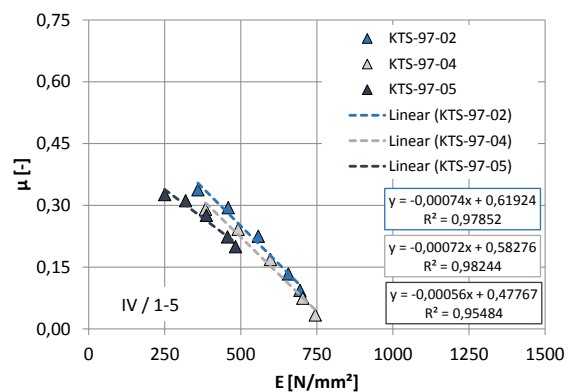


Abbildung 7-39: Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Querdehnzahl bei unterschiedlichen Wassergehalten (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus IV)

## 8 Versuche mit thermischer Beeinflussung

### 8.1 Einleitung

Im Rahmen der Untersuchung des temperaturabhängigen Materialverhaltens ungebundener Gesteinskorngemische stellte der positive Temperaturbereich ( $> 0\text{ °C}$ ) einen Zustand dar, für welchen temperaturunabhängiges Materialverhalten postuliert werden kann. Für Temperaturen  $\leq 0\text{ °C}$  sind in Gesteinskorngemischen unter der Anwesenheit von Wasser unterschiedliche, in Kapitel 2 erläuterte Phänomene zu erwarten, welche temperaturabhängiges Materialverhalten zur Folge haben können. Erschwerend kommt hinzu, dass der Temperaturverlauf durch unterschiedliche Randbedingungen wie den Wassergehalt oder den Temperaturgradienten in den ToB beeinflusst wird. Dafür ist es zwingend erforderlich, im Versuch die Temperatur innerhalb des Probekörpers (nicht nur in Zelle und Kammer) in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen zu untersuchen und auszuwerten, um darauf aufbauend einen Referenztemperaturverlauf festzulegen zu können. Ein Referenztemperaturverlauf ist deshalb erforderlich, weil Temperaturmessungen innerhalb des Probekörpers konstruktionsbedingt nicht während der Versuchsdurchführung erfolgen können. Die Analyse der Probekörperkerntemperaturen erfolgte deshalb indirekt an Probekörperdummys. Dies sind identisch hergestellte Probekörper mit gleichem Material, Wassergehalt und Verdichtungsgrad, in welchen ein zusätzlicher Temperaturfühler in Probenmitte angeordnet wird (Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2).

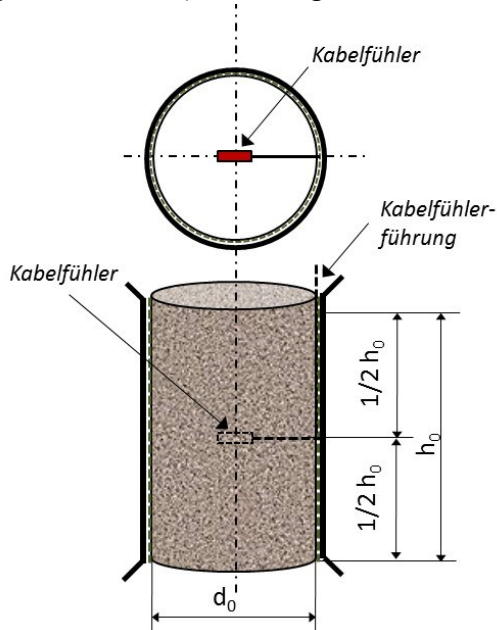


Abbildung 8-1: Position des Kabelfühlers im Probekörper einschließlich der Kabelführung innerhalb der Zelle



Abbildung 8-2: Probekörper mit Latexmembran und Kabelfühler

Im Gegensatz zu den Magneten des Axialmesssystems wird der Kabelfühler zur Temperaturmessung nicht im Zuge der Probekörperherstellung eingebaut, sondern nachträglich, um diesen nicht während der Einbauprozedur zu beschädigen. Für einen unproblematischen nachträglichen Einbau des Messfühlers ohne Störung der Gefügestruktur wird bei der Probekörperherstellung eine Kunststoffhülse in Probekörpermitte platziert, welche sich nach der Herstellung der Probekörper leicht entfernen lässt. Nach der Entnahme der Hülse wird der Messfühler im Probekörper eingesetzt und der verbleibende Hohlraum mit dem gleichem Material des Probekörpers verfüllt und verdichtet. Während des Einbaus des Temperaturmessfühlers befindet sich der Probekörper im Stahlzylinder, wie in Kapitel 4 erläutert. Im Anschluss wird der Probekörper in die Triaxialzelle eingebaut (identisch zu den Belastungsversuchen), jedoch ohne Belastungsstempel, um das Kabel des Temperaturfühlers aus der Zelle herausführen und an der Messbank anschließen zu können. Mit dieser Verfahrensweise ist es möglich, die Temperaturen bzw. die zeitabhängigen Temperaturverläufe nicht nur in Kammer und Zelle, sondern auch im Probekörperkern zu messen und Einflüsse aus unterschiedlichen Materialzuständen sowie unterschiedlichen thermischen Randbedingungen zu untersuchen.

Abbildung 8-3 zeigt die gemessenen Temperaturverläufe über einen Zeitraum von rd. 29 h für einen vollständigen Gefrier- und Auftauzyklus. Hierbei umfasst der Zeitraum A die Probekörpervortemperierung, Zeitraum B die Abkühl- bzw. Gefrierphase und Zeitraum C die Erwärmungs- bzw. Auftauphase.

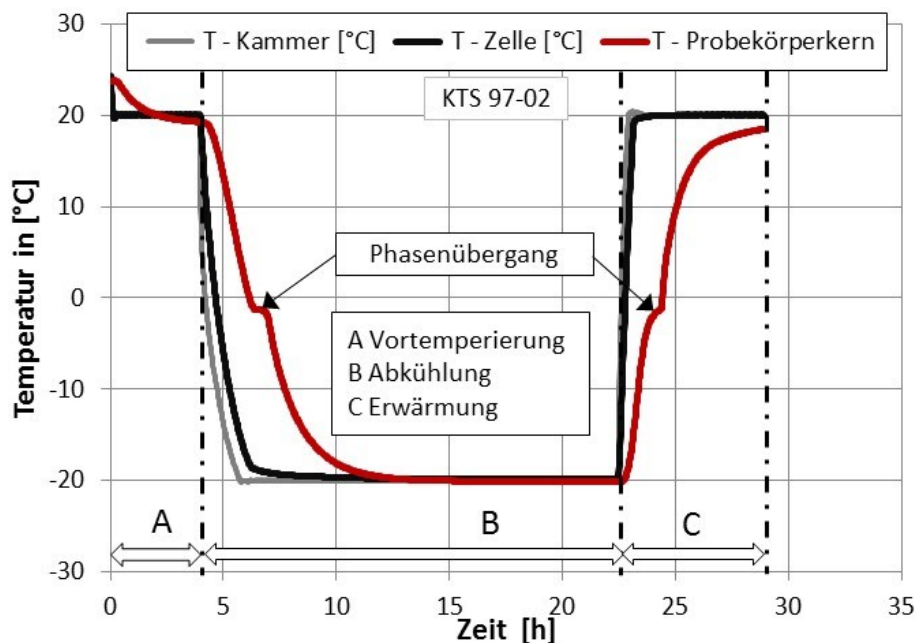


Abbildung 8-3: Tempverläufe in Kammer, Zelle und Probekörperkern während der Abkühl- und Auftauphase (Beispiel KTS 97-02,  $\Delta T=40$  K)



Deutlich erkennbar ist, dass Kammer und Zelle stetig bis zur Solltemperatur temperieren, während im Probekörperkern, wie erwartet, ein Bereich mit nahezu konstantem Verlauf unterhalb der 0°C Grenze festgestellt werden kann. Innerhalb dieses Zeitbereiches findet der Großteil des Phasenübergangs statt, innerhalb welchem Energie in Form von Wärme freigesetzt bzw. Energie benötigt wird (vgl. Kapitel 2).

Gleichermaßen ist ersichtlich, dass sich die Temperatur im Probekörper bei Abkühlung mit nahezu konstanter Abkühlrate verringert, bis unterhalb von 0 °C eine Verlangsamung einsetzt. Dies deutet auf den beginnenden Phasenwechsel hin, durch welchen Wärmeenergie frei und somit die Abkühlrate verringert wird. Unterhalb von - 1 °C nimmt die Temperatur nur noch sehr langsam ab und ist durch einen plateauähnlichen Verlauf gekennzeichnet. Zu vermuten ist, dass während dieser Zeit die Gefrierfront in Richtung Probekörperkern wandert und dabei stetig Wärmeenergie frei wird. Im Anschluss daran steigt die Abkühlrate wieder an, da ein erheblicher Teil des gebundenen Wassers von der flüssigen in die kristalline Zustandsform übergegangen ist und deshalb nur noch wenig Wärmeenergie frei werden kann.

Der Temperaturverlauf während des Phasenüberganges infolge der Erwärmungsphase unterscheidet sich qualitativ vom Temperaturverlauf während der Abkühlphase. Der Energiebedarf zum Lösen der kristallinen Struktur des Wassers verlangsamt den Erwärmungsprozess bis etwa - 1 °C. Der plateauähnliche Verlauf ist hierbei nicht so stark ausgeprägt wie während des Abkühlprozesses (Abbildung 8-4).

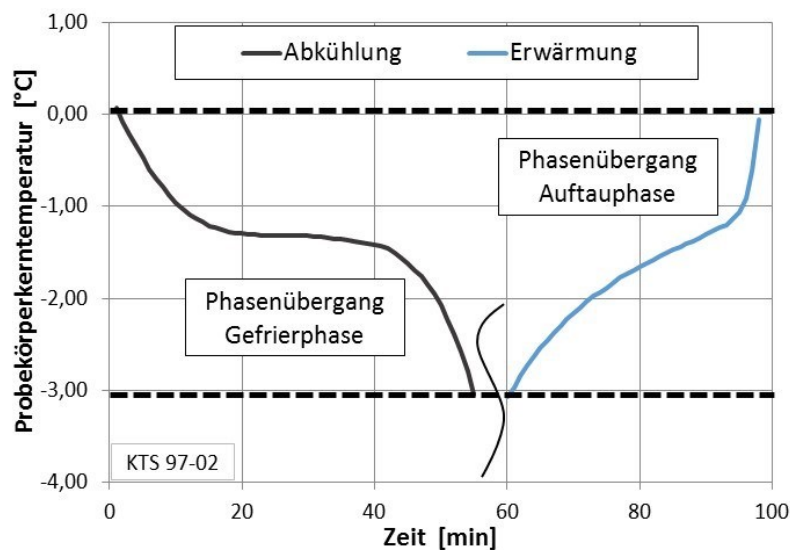


Abbildung 8-4: Probekörperkerntemperatur während des Phasenüberganges bei Abkühl- und Erwärmungsphase (Beispiel KTS 97-02,  $\Delta T=40$  K)



## 8.2 Probekörperkerntemperatur - Einfluss des Wassergehaltes

Dass die freiwerdende Wärmeenergie beim Phasenübergang des Wassers von der flüssigen zur kristallinen Zustandsform erheblich vom Wassergehalt abhängig ist, wurde bereits dargestellt. Gleiches gilt für die benötigte Energie beim Phasenübergang in umgekehrter Form. Um den Einfluss der freiwerdenden Wärmeenergie in Abhängigkeit vom vorhandenen Wassergehalt auf die Probekörperkerntemperatur untersuchen zu können, wurden Probekörper mit drei unterschiedlichen Wassergehalten (2 M.-%, 4 M.-% und 6 M.-%) hergestellt und nach Vortemperierung auf + 20 °C auf – 20 °C ( $\Delta T = 40$  K) abgekühlt. Abbildung 8-5 (links) zeigt den Temperaturverlauf in der Kammer, der Zelle und im Probekörperkern am Beispiel eines Probekörpers mit einem Wassergehalt von 4 % während der Abkühlphase.

Der Einfluss unterschiedlicher Wassergehalte auf die Probekörperkerntemperatur ist in Abbildung 8-5 für den ausgewählten Temperaturbereich zwischen 0 °C und – 3 °C dargestellt. Zum besseren Vergleich der Temperaturverläufe ist die Zeit beim Erreichen von 0 °C Probekörperkerntemperatur auf  $t = 0$  min normiert. Erkennbar ist, dass die Zeitdauer  $\Delta t$  (0 °C bis – 3 °C), über welche sich der Probekörper verlangsamt abkühlt, größer wird, desto mehr Wasser im Material existiert, da mehr Wärmeenergie infolge der Kristallisation frei wird. An dieser Stelle vereinfacht interpretiert, führt eine Erhöhung des Wassergehaltes von 2 % auf 6 % zu einer Verlängerung der Abkühlzeit im Probekörperkern auf – 3 °C um etwa 22 min. Die in Abbildung 8-5(rechts) angegebene Abkühlrate  $k$  bezieht sich hierbei auf die mittlere Abkühlrate der Zelle zwischen + 3 °C und – 3 °C. Der Temperaturgradient  $\delta_{T0}$  wird, unter der vereinfachten Annahme eines linearen Temperaturverlaufes zwischen Probekörpermantelfläche und Probekörperkern, zum Zeitpunkt des Erreichens von 0°C-Probekörperkerntemperatur berechnet. Die Temperatur der Probekörpermantelfläche wird zum genannten Zeitpunkt vereinfacht der Zelltemperatur gleichgesetzt.

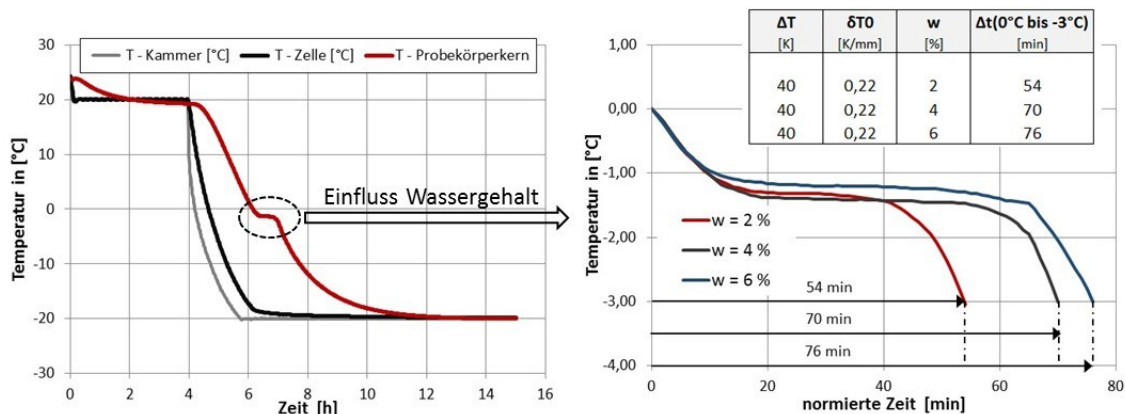


Abbildung 8-5: Einfluss des Wassergehaltes auf die Probekörperkerntemperatur (Abkühlphase)

### 8.3 Probekörperkerntemperatur - Einfluss des Temperaturgradienten

Wird die Temperaturdifferenz zwischen Start- und Zieltemperatur verändert, stellen sich ein anderer Temperaturgradient im Probekörper und damit ein veränderter Abkühlprozess des Probekörpers ein. Variiert wurden die Temperaturdifferenzen beginnend bei 10 K über 20 K bis zu 40 K. Eine Temperaturdifferenz von 10 K bedeutet hierbei, dass der Probekörper nach Vortemperierung von + 5 °C auf – 5 °C abgekühlt wurde. Um zu überprüfen, welchen Einfluss der Temperaturgradient auf die Temperatur im Probekörperkern im Bereich des Phasenübergangs hat, wurden Messreihen an Probekörpern mit 97 % Verdichtungsgrad sowie 4 M.-% Wassergehalt durchgeführt.

Abbildung 8-6 (links) zeigt den Temperaturverlauf in Kammer, Zelle und Probekörperkern bei einem Wassergehalt des Probekörpers von 4 % während der Abkühlphase von + 20 °C auf – 20 °C. Abbildung 8-6 (rechts) zeigt den Einfluss des Temperaturgradienten auf den Verlauf der Probekörperkerntemperatur, dargestellt für den Temperaturbereich von 0 °C bis – 3 °C. Zum besseren Vergleich der Probekörperkerntemperaturverläufe ist die Zeit beim Erreichen von 0 °C Probekörperkerntemperatur ebenfalls auf  $t = 0$  min normiert. Erkennbar ist, dass die Zeitdauer  $\Delta t$  (0 °C bis – 3 °C), über welche sich der Probekörper verlangsamt abkühlt, deutlich größer wird, je kleiner der Temperaturgradient wird. Das Durchfrieren des Probekörpers, d. h. die Bewegung der Gefrierfront (vom Probekörpermantel zum -kern) verläuft folglich langsamer.

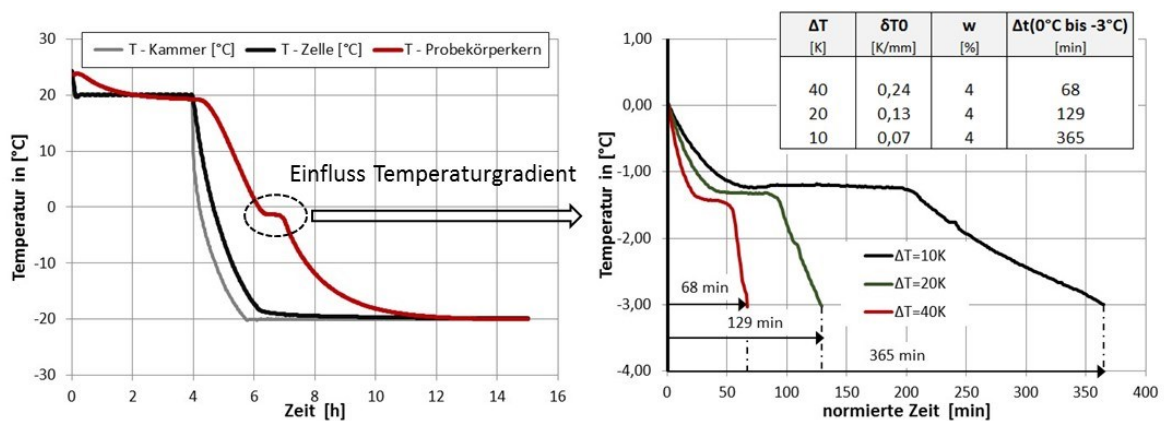


Abbildung 8-6: Einfluss des Temperaturgradienten auf die Probekörperkerntemperatur (Abkühlphase)

### 8.4 Entwicklung der Prüfprozedur

Grundsätzlich sind zwei Herangehensweisen zur Untersuchung der thermischen Beeinflussung des spannungsabhängigen Materialverhaltens denkbar. Zum einen kann der Probekörper vollständige Abkühl- und Erwärmungsphasen durchlaufen und gleichzeitig zyklisch

(mit konstanten Spannungsamplituden) beansprucht werden. Exemplarisch zeigen Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8 ein solches Vorgehen. Der Probekörper wird zyklisch (mit konstanter Vertikal- und Radialspannungsamplitude) beansprucht und dabei abgekühlt bzw. erwärmt. Nach der Vortemperierung auf +10 °C beträgt die bei dem gewählten Spannungsverhältnis berechnete elastische Axialdehnung 0,82 Promille. Mit Beginn der Abkühlung von Kammer und Zelle sowie einer Messdatenaufzeichnungspause von 100 min wird in einem Intervall von 3 min die Vertikalverformung aufgezeichnet und die elastische Axialdehnung berechnet. Erkennbar ist, dass sich die Axialdehnung stetig verringert und mit zunehmender Zeitdauer Konvergenz der elastischen Axialdehnung erreicht wird. Nachdem der Probekörperkern die Solltemperatur von -10 °C erreicht hat ( $T_{\text{Kern}}=T_{\text{Zelle}}$ ), beginnt die Erwärmungsphase. Erkennbar ist, der damit einhergehende Anstieg der elastischen Axialdehnung, welche im Beispiel nach etwa 1150 min nahezu konstant sind und bei einer Kerntemperatur von +3 °C (Versuchsabbruch) den Dehnungswert des Ausgangszustandes erreichen.

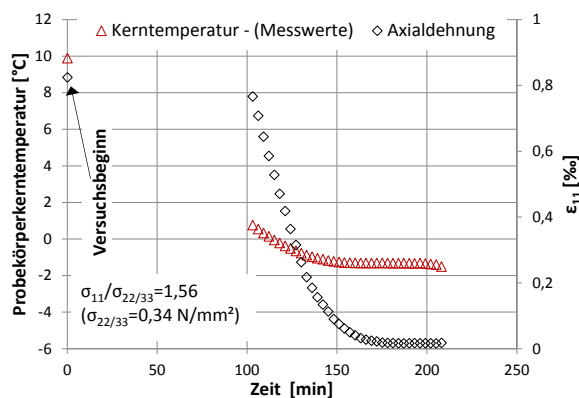


Abbildung 8-7: Elastische Axialdehnung und Probekörperkerntemperatur in Abhängigkeit von der Zeit während der Abkühlphase (Beispiel KTS 97-04)

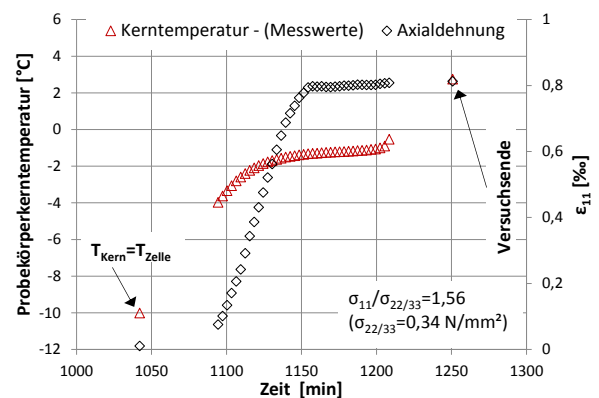


Abbildung 8-8: Elastische Axialdehnung und Probekörperkerntemperatur in Abhängigkeit von der Zeit während der Erwärmungsphase (Beispiel KTS 97-04)

Soll mit dieser Art der Versuchsprozedur der Einfluss des Spannungszustandes und des Materialzustandes auf das mechanische Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der thermischen Randbedingung analysiert werden, würde dies bedeuten, dass der genannte Ablauf entsprechend häufig (mit separaten Probekörpern) zu wiederholen ist, bis alle zu untersuchenden Kombinationen abgearbeitet sind. Die daraus resultierende Versuchsdauer ist wegen der Erheblichkeit unpraktikabel. Ziel war deshalb, das mechanische Verformungsverhalten bei thermischer Beeinflussung in gleicher Art und Weise zu untersuchen wie ohne thermische Beeinflussung. Dafür wurde in einem ersten Schritt die gleiche Versuchsprozedur wie bei thermisch unbeeinflussten Probekörpern angewandt, um Probekörper nach quasi-vollständigem Durchfrieren mit einer Abkühldauer von 20 h zu untersuchen. Als problematisch erwies sich hierbei, dass die bei diesen Belastungen auftretenden Probekörperverformungen sehr klein und mit der erforderlichen Messauflösung nur be-

dingt messbar waren. Deshalb wurden die Beanspruchungen vergrößert, jedoch grundsätzlich unter der Voraussetzung der Einhaltung der Grenzspannungskriterien. Abbildung 8-9 und Abbildung 8-10 zeigen beispielhaft den Unterschied des Materialverhaltens zwischen dem ungefrorenem und dem vollständig gefrorenem Zustand. Neben den erheblich kleineren elastischen Axialdehnungen ist (bereits vorweggreifend) die lineare Abhängigkeit der elastischen Materialantwort vom Deviator und mittlerer Spannung bei  $T = -20^\circ\text{C}$  zu erkennen.

$b_{10}= 2,6659$	$b_{12}= 0,9416$	$R^2 = 0,995$	$b_{10}=0,0222$	$b_{12}= 0,0194$	$R^2 = 0,985$
$b_{11}= -0,7852$	$b_{13}= 0,609$		$b_{11}=0,0276$		
$T = 20^\circ\text{C}$	$\delta_{T_0} = 0 \text{ K/mm}$	$\Delta t_{\text{MSP}} = 640 \text{ s}$	$T = -20^\circ\text{C}$	$\delta_{T_0} = 0 \text{ K/mm}$	$\Delta t_{\text{MSP}} = 640 \text{ s}$

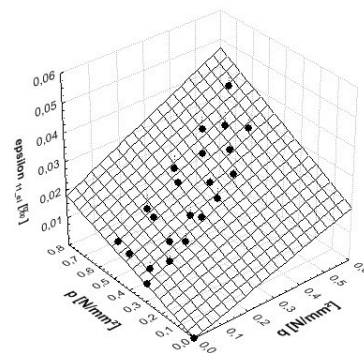
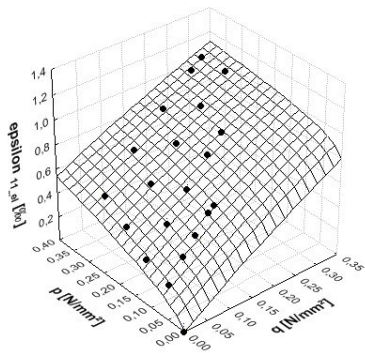


Abbildung 8-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung am Beispiel einer Probe mit 4 M.-% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad ( $T = 20^\circ\text{C}$ )

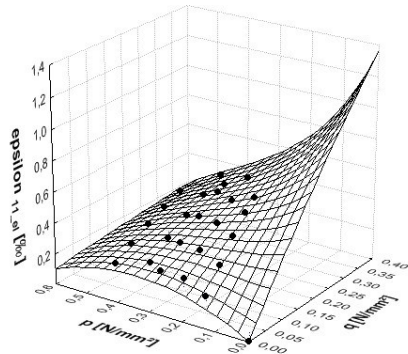
Abbildung 8-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung am Beispiel einer Probe mit 4 M.-% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad ( $T = -20^\circ\text{C}$ )

Als ebenfalls äußerst problematisch ist die Messung der Probekörperverformung während des Phasenüberganges des Wassers (sowohl bei der Gefrier- als auch bei der Erwärmungsphase) im Gesteinskornmisch. Da der Probekörper innerhalb eines definierten Zeitbereiches mit unterschiedlichen Belastungszyklen beansprucht wird, kann ein zu großes Zeitfenster (ggf. in Verbindung mit einer vergleichsweise kurzen Phasenübergangszeit infolge eines großen Temperaturgradienten) zu „Verzerrungen“ der Messergebnisse und Fehlinterpretationen führen. Abbildung 8-11 verdeutlicht diese Problematik.

Zu erkennen ist, dass die elastische Axialdehnung bei steigender Beanspruchung erheblich abnimmt. Direkt erkennbar ist die genannte Problematik am Dehnungsverlauf bei  $q=0 \text{ N/mm}^2$ , da dieser nach anfänglichem Anstieg trotz zunehmender mittlerer Spannung abnimmt. Begründet werden kann dieser Effekt aus dem während der Prüfprozedur stattfindenden fortschreitenden Phasenübergang von Wasser in die kristalline Zustandsform. Die Zeitdauer der gesamten Multi-Stage-Prozedur erstreckt sich hierbei über 800 s innerhalb welcher die unterschiedlichen Belastungszyklen aufgebracht werden. Die Temperatur im Probekörperkern verringert sich innerhalb der Prüffolge von  $T = -1,31^\circ\text{C}$  auf

$T = -1,43 \text{ }^\circ\text{C}$ , was (wie gezeigt) bereits zu erheblichen Veränderungen der Materialantwort führt (Abbildung 8-12).

$$\begin{aligned} b_{10} &= 4,0595 & b_{12} &= 1,6936 & R^2 &= 0,973 \\ b_{11} &= -4,5365 & b_{13} &= 1,1841 \end{aligned}$$



$$[\epsilon_{11,el}] = \ln(q+1) \cdot b_{10} \cdot \text{euler}^{(b_{11} \cdot p)} + (b_{12} \cdot p^2 + b_{13} \cdot p)$$

Abbildung 8-11: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung am Beispiel einer Probe mit 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad ( $T_{\text{Probekörperkern}} = -1,31$  bis  $-1,41 \text{ }^\circ\text{C}$ )

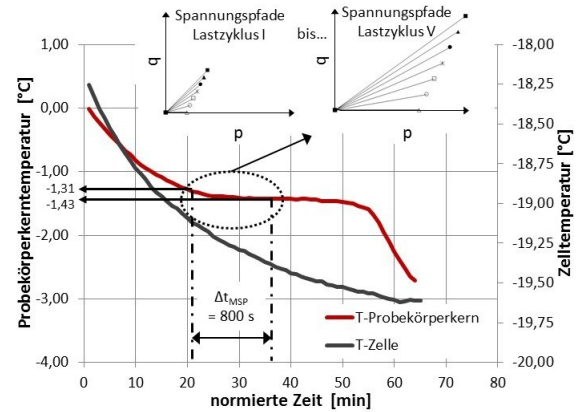


Abbildung 8-12: Probekörperkern- und Zelltemperatur in Abhängigkeit von der Zeit einschl. Beginn, Ende und Dauer der Multi-Stage-Testprozedur

Um dieses Problem weitestgehend auszuschließen, wurden unterschiedliche Veränderungen der Prüfprozedur sowie der Versuchsrandbedingungen eruiert. Im Ergebnis dieses Optimierungsprozesses wurde die Lastwechselzahl pro Beanspruchungszustand von 20 auf 15 reduziert. Zudem wurde die Temperaturdifferenz zwischen Start- und Zieltemperatur von 40 K auf 20 K reduziert. Im Ergebnis dessen waren die Effekte wie zuvor gezeigt, nicht mehr erkennbar.

Für die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verformungsverhaltens ungebundener Tragschichten wurde im Weiteren von folgenden grundsätzlichen Annahmen ausgegangen:

- I. Im positiven  $^\circ\text{C}$ -Temperaturbereich (Gebrauchsverhalten)  $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$  liegt keine Beeinflussung des mechanischen Verformungsverhaltens infolge Temperaturveränderung vor.
- II. Bei Temperaturen  $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$  (Gebrauchsverhalten) liegt nur dann keine Beeinflussung des mechanischen Verformungsverhaltens vor, wenn die Probekörperkerntemperatur einen zeitunabhängigen konstanten Wert erreicht hat (quasi-vollständiges Durchfrieren des Materials).

- III. Im Temperaturbereichen zwischen  $T \leq 0 \text{ °C}$  und des quasi-vollständigen Durchfrierens liegt temperaturabhängiges mechanisches Verformungsverhalten vor.

*Angemerkt sein an dieser Stelle, dass es sich bei diesen Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens unter triaxialen Bedingungen nicht mehr um einen klassischen Elementversuch handelt. Die thermische Beeinflussung und die daraus resultierende Strukturänderung von Wasser im Mineralkorngemisch führen zu lokal (im Probekörper) unterschiedlichen Gefügeständen. Konkret bedeutet dies, dass je nach Ort und Verlauf der Gefrierfront Bereiche im Probekörper vorliegen, in welchen unterschiedlich viel Wasser von der flüssigen in die kristalline Zustandsform übergegangen ist. Deshalb liegt ein inhomogener Materialzustand vor. Zudem entspricht das Temperaturfeld im Probekörper innerhalb der Triaxialzelle nicht dem Temperaturfeld im Element in situ.*

### 8.5 Approximation der Probekörperkerntemperatur

Um im Rahmen der Prüfprozedur einem definierten Prüfzeitpunkt eine Probekörperkerntemperatur zuordnen zu können, ist die Kenntnis des genauen Verlaufs der Kerntemperatur zwingende Voraussetzung, weshalb diese adäquat approximiert werden musste. Abbildung 8-13 und Abbildung 8-14 zeigen den Verlauf der Probekörperkerntemperatur (graue Linie und Markierung) während der Abkühlphase von  $+10 \text{ °C}$  auf  $-10 \text{ °C}$ . Abbildung 8-15 und Abbildung 8-16 zeigen den Verlauf der Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase von  $T = -10 \text{ °C}$  auf  $T = +10 \text{ °C}$  bei 97 % Verdichtungsgrad und 4 % Wassergehalt.

Zur Approximation dieser zeitabhängigen Probekörperkerntemperaturverläufe sind einfache Ansatzfunktionen ungeeignet. Die Verwendung von Polynomen kann problematisch sein, wenn der betrachtete Zeitbereich zu groß ist, was besonders während der Zeit des Phasenübergangs von Wasser im Mineralkorngemisch zur Oszillation und damit falschen Temperaturapproximationen führt. Für eine Approximation mit stetigem Verlauf wurden deshalb Spline-Funktionen mit unterschiedlicher Dichte von Stützpunktstellen (schwarze Markierung in Abbildung 8-13 bis Abbildung 8-16) im relevanten Temperaturbereich verwendet. Unterteilt wurden die Temperaturbereiche hierbei wie folgt:

#### Temperaturbereich-Abkühlphase

- |      |                       |     |                       |
|------|-----------------------|-----|-----------------------|
| I.   | $T = +10 \text{ °C}$  | bis | $T = +0,5 \text{ °C}$ |
| II.  | $T = +0,5 \text{ °C}$ | bis | $T = -3,0 \text{ °C}$ |
| III. | $T = -3,0 \text{ °C}$ | bis | $T = -10 \text{ °C}$  |

Temperaturbereich-Erwärmungsphase

- I. T = -10 °C bis T = -3,0 °C
- II. T = -3,0 °C bis T = +0,5 °C
- III. T = +0,5 °C bis T = +3,0 °C

Die deutlich größere Anzahl von Stützpunkten zwischen T= + 0,5 °C und T= - 3,0 °C während der Abkühlphase und zwischen T= - 3,0 °C und T= + 0,5 °C während der Erwärmungsphase ist notwendig, um den Temperaturverlauf während des Phasenüberganges des Wassers von der flüssigen in die kristalline Form bzw. entgegengesetzt möglichst genau nachrechnen zu können. Für den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit  $T_i=f(t_i)$  gilt

$$t_0 < t_1 < \dots < t_n$$

und damit Monotonie. Folglich sind natürliche kubische Splines der Form

$$S_i(t) = a_{11} + b_{11} \cdot (t_0 - t_i) + c_{11} \cdot (t_0 - t_i)^2 + d_{11} \cdot (t_0 - t_i)^3$$

mit dem Intervall  $[t_i, t_{i+1}]$  für jedes  $S_i(t)$  zur Approximation geeignet [WELLER, F. (1996)]. Für die im Beispiel mit n=19 (Abkühlphase) bzw. mit n=18 (Erwärmungsphase) festgelegten Stützstellen, sind folglich n-1 Polynomstücke  $S_i(t)$ , d. h. 18 Polynome für die Abkühlphase und 17 Polynome für die Erwärmungsphase zu berechnen. Als Randbedingung gelten:

$$S'_i(t_{i+1}) = S'_{i+1}(t_{i+1})$$

$$S''_i(t_{i+1}) = S''_{i+1}(t_{i+1})$$

$$S''(t_0) = S''(t_n) = 0$$

$$a_{11} = S''(t_n) = 0$$

Der vollständige Berechnungsalgorithmus der Koeffizienten aller  $S_i(t)$  ist der Anlage C zu entnehmen. Für das Betrachtungsbeispiel zeigen Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 die Koeffizientenmatrix für die Approximation der Abkühl- und Erwärmungsphase bei  $\Delta T=20K$ ,  $w=4\%$ . Die Koeffizientenmatrizen der Kerntemperaturverläufe bei verändertem Wassergehalt sind in Anlage C dargestellt.

## Kapitel 8

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1,00	1,00	9,88966942	-0,00007584	0,00000000	-0,00002982
2	26,00	1,00	9,42190083	-0,05598055	-0,00223619	0,00001784
3	46,00	1,00	7,55049587	-0,12402589	-0,00116608	0,00002730
4	71,00	1,00	4,14760331	-0,13114335	0,00088138	-0,00000209
5	106,00	1,00	0,54760331	-0,07713306	0,00066177	0,00000918
6	120,00	1,00	-0,37735537	-0,05320410	0,00104744	-0,00000909
7	135,00	1,00	-0,97041322	-0,02791498	0,00063850	-0,00000321
8	145,00	1,00	-1,18892562	-0,01610876	0,00054212	-0,00000188
9	155,00	1,00	-1,29768595	-0,00583181	0,00048557	-0,00001262
10	170,00	1,00	-1,31851240	0,00021474	-0,00008247	0,00000238
11	190,00	1,00	-1,32818182	-0,00023051	0,00006021	-0,00002942
12	200,00	1,00	-1,35388430	-0,00785178	-0,00082233	-0,00008675
13	205,00	1,00	-1,42454545	-0,02258148	-0,00212361	0,00004760
14	225,00	1,00	-2,34479339	-0,05040208	0,00073258	-0,00001069
15	246,00	1,00	-3,17917355	-0,03377714	0,00005909	-0,00000014
16	321,00	1,00	-5,44057851	-0,02733341	0,00002683	0,00000008
17	471,00	1,00	-8,67793388	-0,01410478	0,00006136	-0,00000010
18	671,00	1,00	-9,82578512	-0,00128040	0,00000276	0,00000000
19	867,00	1,00	-10,00603306	-0,01154098	0,00000000	0,00000000
20						

Tabelle 8-1: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase ( $\Delta T = 20$  K,  $w = 4$  M.-%)

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1026,00	1026,00	-10,01512397	0,00144085	0,00000000	-0,00000591
2	1040,00	1026,00	-10,01115702	-0,00203165	-0,00024804	0,00012045
3	1055,00	1026,00	-9,69090909	0,07183341	0,00517237	-0,00008729
4	1070,00	1026,00	-7,74421488	0,16808643	0,00124450	-0,00007554
5	1085,00	1026,00	-5,19785124	0,15443244	-0,00215476	0,00001000
6	1102,00	1026,00	-3,14611570	0,08983702	-0,00164497	0,00001096
7	1120,00	1026,00	-1,99809917	0,04127151	-0,00105311	0,00001292
8	1140,00	1026,00	-1,49057851	0,01464737	-0,00027809	0,00000266
9	1160,00	1026,00	-1,28760331	0,00671340	-0,00011861	0,00000227
10	1180,00	1026,00	-1,18264463	0,00468912	0,00001739	0,00000195
11	1190,00	1026,00	-1,13206612	0,00562140	0,00007584	0,00005551
12	1195,00	1026,00	-1,09512397	0,01054332	0,00090855	-0,00018625
13	1200,00	1026,00	-1,04297521	0,00565987	-0,00188524	0,00127264
14	1205,00	1026,00	-0,90272727	0,08225522	0,01720431	-0,00159851
15	1210,00	1026,00	-0,26115702	0,13441015	-0,00677332	0,00029862
16	1217,00	1026,00	0,45024793	0,08348081	-0,00050229	0,00000273
17	1230,00	1026,00	1,45661157	0,07180597	-0,00039577	0,00000507
18	1256,00	1026,00	3,14520661	0,00250415	0,00000000	0,00000000
19						
20						

Tabelle 8-2: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20$  K,  $w = 4$  M.-%)

Das Ergebnis der Spline-Interpolation zeigt den Kurvenverlauf (rote Linie) in Abbildung 8-13 bis Abbildung 8-16. Der Verlauf der Probekörperkerntemperatur wird damit stetig und mit hoher Genauigkeit nachgebildet, so dass darauf aufbauend die Temperaturverläufe berechnet werden können.



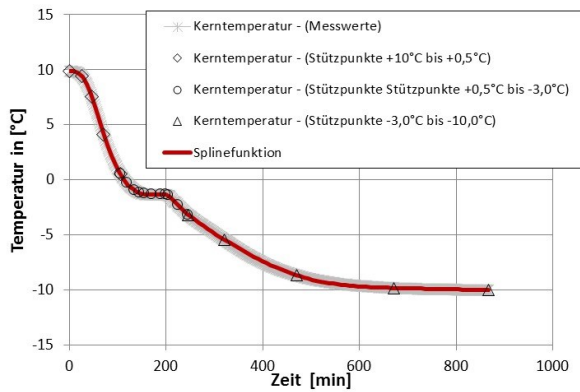


Abbildung 8-13: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T = 20\text{K}$ ,  $w = 4 \text{ M.-%}$ )

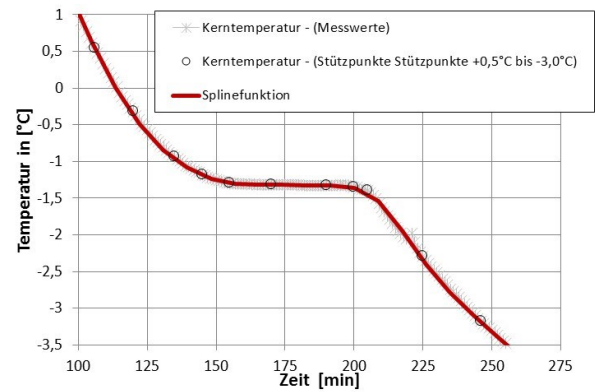


Abbildung 8-14: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase im Temperaturbereich zwischen  $+0,5 \text{ °C}$  und  $-3,0 \text{ °C}$  ( $\Delta T = 20\text{K}$ ,  $w = 4 \text{ M.-%}$ )

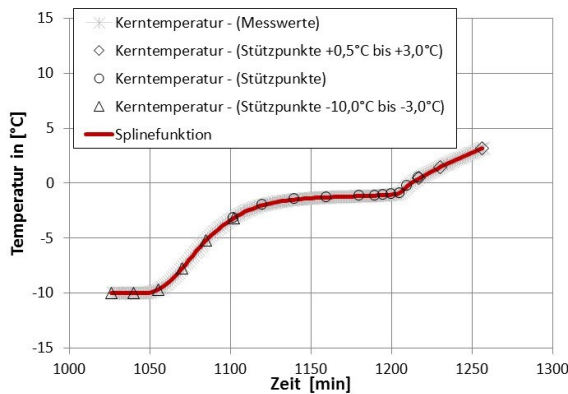


Abbildung 8-15: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20\text{K}$ ,  $w = 4 \text{ M.-%}$ )

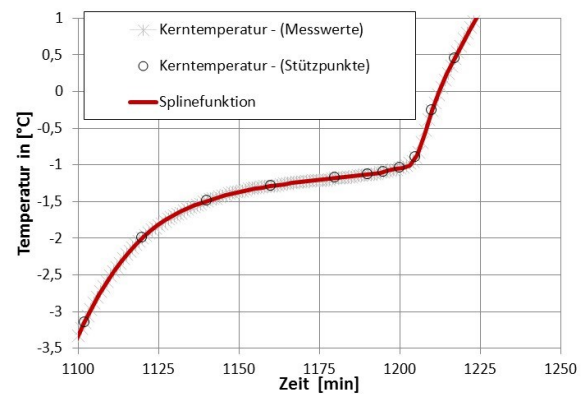


Abbildung 8-16: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase im Temperaturbereich zwischen  $-3,0 \text{ °C}$  und  $+0,5 \text{ °C}$  ( $\Delta T = 20\text{K}$ ,  $w = 4 \text{ M.-%}$ )

## 8.6 Festlegung der Prüfzeitpunkte

Theoretisch könnte die Festlegung der relevanten Prüfzeitpunkte auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Zum einen ist eine Probekörperbelastung beim Erreichen definierter Probekörperkerntemperaturen denkbar. Grundsätzliche Voraussetzung hierfür ist die Möglichkeit der prüftechnischen Umsetzung, welche nicht gegeben war. In Kapitel 8.5 wurden bereits die Solltemperatur für Abkühl- und Erwärmungsphase und damit die Temperaturdifferenz ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ ) für die Versuchsprozedur festgelegt. Als variable Größe verbleibt somit der Probekörperwassergehalt, der den Verlauf der Kerntemperatur vor allem während des Phasenübergangs des Wassers erheblich beeinflusst. Deshalb wurden die Referenzprüfzeitpunkte so festgelegt, dass diese, verteilt über einen vollständigen Abkühl- und Erwärmungsprozess, angeordnet sind und hinreichend oft innerhalb des Phasenübergangsbereiches sowohl bei Abkühlung als auch beim Erwärmen liegen; unabhängig vom unter-

schiedlich hohen Wassergehalt der Probekörper. Insgesamt wurden die Probekörper während des Durchlaufens des vollständigen Durchfrierens und Auftauens an 23 Prüfzeitpunkten (Tabelle 8-3) durch die festgelegte Prüfprozedur beansprucht.

Prüfpunkt A entspricht dem Beginn der Prüfprozedur, d. h. dem Ende der Vortemperierung mit einer Probekörperkerntemperatur von + 10 °C. Die Prüfpunkte TP-F1 bis TP-F10 sind in gleichen Zeitabständen über den Zeitbereich des Phasenübergangs des Wassers während der Abkühlphase verteilt, über welchen die thermische Beeinflussung des spannungsabhängigen Materialverhaltens zu erwarten ist. Prüfpunkt B entspricht dem Ende des Abkühlprozesses und des dabei unterstellten quasi-vollständigen Durchfrierens bei einer Probekörperkerntemperatur von – 10 °C. Die Prüfpunkte TP-T1 bis TP-T10 sind in gleichen Zeitabständen über den Zeitbereich des Phasenübergangs des Wassers während der Erwärmungsphase verteilt, über welchen ebenfalls die thermische Beeinflussung des spannungsabhängigen Materialverhaltens zu erwarten ist. Prüfpunkt C entspricht dem Abbruch der Prüfprozedur bei einer Kerntemperatur von + 3 °C und damit dem wieder vollständig aufgetautem Zustand.

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1,00	9,890	A
2	117,75	-0,219	TP-F1
3	127,75	-0,696	TP-F2
4	137,75	-1,025	TP-F3
5	147,75	-1,225	TP-F4
6	157,75	-1,308	TP-F5
7	167,75	-1,313	TP-F6
8	177,75	-1,317	TP-F7
9	187,75	-1,325	TP-F8
10	197,75	-1,329	TP-F9
11	207,75	-1,511	TP-F10
12	---	---	---

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1045,00	-10,00	B
2	1109,00	-2,59	TP-T1
3	1119,00	-2,04	TP-T2
4	1129,00	-1,72	TP-T3
5	1139,00	-1,50	TP-T4
6	1149,00	-1,37	TP-T5
7	1159,00	-1,29	TP-T6
8	1169,00	-1,23	TP-T7
9	1179,00	-1,19	TP-T8
10	1189,00	-1,13	TP-T9
11	1199,00	-1,06	TP-T10
12	1265,4500	3,73	C

Tabelle 8-3: Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ ,  $w = 4 \%$ ) (links), Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ ,  $w = 4 \%$ ) (rechts)

Im Hinblick auf den Untersuchungsumfang und die zu vermutende Einflusscharakteristik bleibt der Verdichtungsgrad bei dieser Betrachtung im Rahmen der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt.

## 8.7 Diskussion der Prüfprozedur

Grundsätzlich stellt diese Art der Versuchsdurchführung eine besondere und im ersten Moment konträre Form der Materialprüfung dar. Der Grund hierfür liegt in der Änderung der thermischen Randbedingungen während der Versuchsdurchführung. Für die Untersu-

chung des mechanischen Verformungsverhaltens temperaturabhängiger Stoffe muss der Probekörper einen bekannten thermisch homogenen Zustand aufweisen. Dies geschieht beispielsweise durch hinreichend lange Temperierungszeiten in Abhängigkeit des Materials bzw. der Probekörpergeometrie.

Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchungen liegt ausschließlich bei positiver Temperaturverteilung im Probekörper und bei quasi-vollständigem Durchfrieren ( $T_{\text{Kern}}=T_{\text{Zelle}}$ ) ein thermisch homogener Zustand vor. Für quasi-vollständiges Durchfrieren wird postuliert, dass noch nicht in die kristalline Form übergegangene Wasseranteile einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturverteilung und damit auch auf das mechanische Verformungsverhalten haben. Zwischen den zuvor genannten Zuständen liegen eine inhomogene Temperaturverteilung und gleichermaßen ein inhomogener Materialzustand im Probekörper vor, weshalb der Triaxialversuch dann nicht mehr als „klassischer“ Elementversuch interpretiert werden kann. Diese Problematik bleibt bestehen, da die 4-Phasigkeit des Gesteinskorngemisches während des Phasenübergangs kein stationärer Zustand ist. Die Gefrierfront bewegt sich innerhalb des Materials während der Abkühl- bzw. Erwärmungsphase in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten unterschiedlich schnell. Folglich sind immer fluide und kristalline Wasseranteile im Material existent, welche ungleichmäßig verteilt sind, wodurch ein inhomogener Materialzustand vorliegt.

Der Unterschied zwischen Abkühl- und Erwärmungsprozess wird besonders deutlich, wenn man die elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Zeit und der Probekörperkerntemperatur darstellt. Im Zuge der Materialabkühlung (Abbildung 8-17 und Abbildung 8-18) reduziert sich die elastische Axialdehnung stetig (in Abhängigkeit von der Zeit) und bereits schon erheblich bei einer Kerntemperatur im positiven °C-Bereich (roter Kurvenverlauf). Dies resultiert daraus, dass trotz einer positiven Kerntemperatur bereits Teile des Probekörpers, beginnend von der Mantelfläche in Richtung Probekörperkern, gefroren sind, weshalb eine deutliche Materialversteifung feststellbar ist. Je weiter die Gefrierfront in Richtung Probekörperzentrum wandert, umso geringer wird die elastische Axialdehnung (Dehnungskonvergenz), da der Verformungswiderstand zunimmt. Gleiches ist für den Erwärmungsprozess zu beobachten (Abbildung 8-19 und Abbildung 8-20). Nachdem der Probekörperkern die Zelltemperatur erreicht hat, wird die Erwärmungsphase eingeleitet, für welche mit zunehmender Dauer ein Anstieg der elastischen Dehnungsantwort zu beobachten ist. Erkennbar hierbei ist, dass Dehnungskonstanz bereits vor dem Erreichen einer positiven Kerntemperatur erreicht wird, weshalb vermutet werden kann, dass bereits erhebliche Teile des Materials im positiven °C Zustand vorliegen und nur noch der unmittelbare Kern eine negative Temperatur aufweist. Da die elastische Materialantwort nach dem Durchlaufen der Gefrier- und Auftauzyklen dem 0-Zustand entspricht (d. h. keine signifikante Änderung der elastischen Materialantwort festgestellt wurde), wird davon aus-

gegangen, dass die Änderung der elastischen Materialantwort während des Gefrier- und Auftauzyklus ausschließlich aus dem thermisch bedingten Phasenübergang des Wassers resultiert und folglich keine relevanten Dichteänderungen des Materials vorliegen.

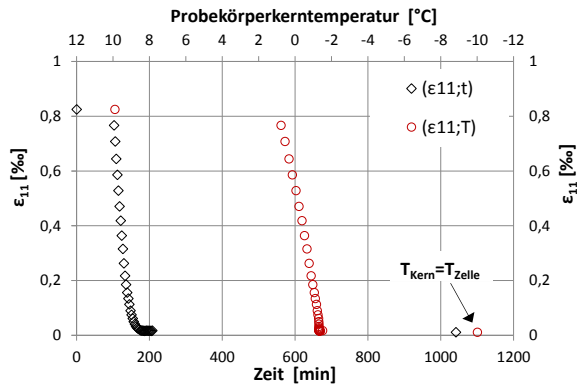


Abbildung 8-17: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit (t) und Probekörperkerntemperatur (T) während der Abkühlphase (KTS 97-04)

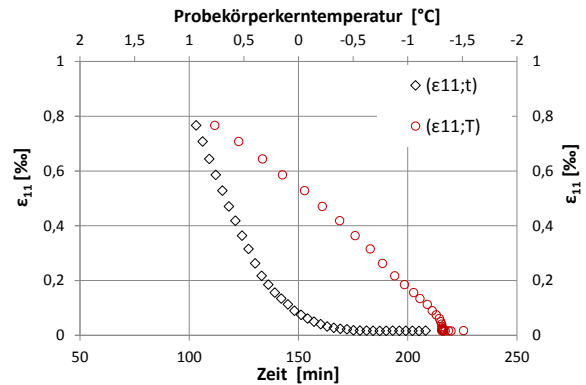


Abbildung 8-18: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit (t) und Probekörperkerntemperatur (T) während der Abkühlphase im Kerntemperaturbereich von + 2 °C bis - 2 °C (KTS 97-04)

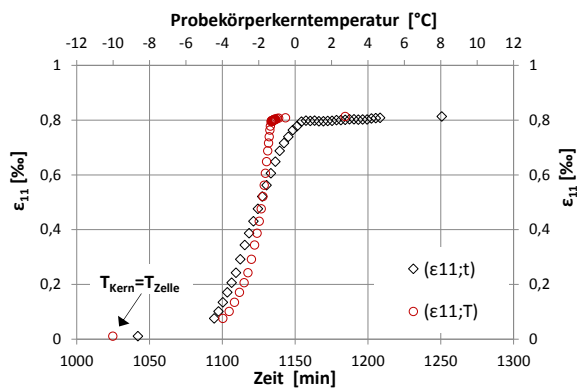


Abbildung 8-19: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit (t) und Probekörperkerntemperatur (T) während der Erwärmungsphase (KTS 97-04)

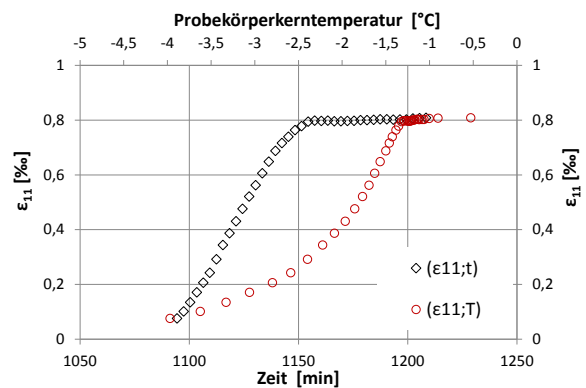


Abbildung 8-20: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit (t) und Probekörperkerntemperatur (T) während der Erwärmungsphase im Kerntemperaturbereich von - 0,5 °C bis - 5 °C (KTS 97-04)

Im Hinblick auf eine, die vorliegenden Arbeit weiterführende, möglichst exakte Erfassung dieser Phänomene sind Feuchte- und Temperaturverteilungen im Probekörper messtechnisch zu erfassen und mittels numerischer Modelle mit thermisch-mechanischer Kopplung nachzubilden. Damit kann die Bewegung der Gefrierfront in Abhängigkeit von unterschiedlichen Randbedingungen studiert werden, um mögliche relevante Einflüsse im Hinblick auf die rechnerische Dimensionierung von Straßenbefestigungen zu berücksichtigen.

## 9 Ergebnisse – Versuche mit thermischer Beeinflussung (quasi-vollständiges Durchfrieren)

### 9.1 Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten

Im untersuchten Kompressionsbeanspruchungsbereich wurde auf Grundlage der Versuchsergebnisse bei quasi-vollständigem Durchfrieren des Materials ( $T_{\text{Kem}}=T_{\text{Zelle}}$ ) von linear elastischem Materialverhalten ausgegangen. Nichtlinearitäten konnten nicht explizit festgestellt werden. Der verwendete Approximationsansatz unterscheidet sich deshalb vom verwendeten funktionalen Ansatz zur Beschreibung der elastischen Materialantwort ohne thermische Beeinflussung und wurde wie folgt beschrieben:

$$\varepsilon_{11\_el}(q; p) = b_{10} \cdot q + b_{11} \cdot p \quad (9-1)$$

Dabei setzt sich die elastische Materialantwort (elastische axiale Gesamtdehnung) aus den Dehnungsanteilen, resultierend aus hydrostatischer und deviatorischer Beanspruchung, zusammen, wobei auch für die isotrope Kompression von einer linearen Beziehung ausgegangen wurde.

$$\varepsilon_{11\_el\_isotrop} = b_{12} \cdot p \quad (9-2)$$

und

$$\varepsilon_{11\_el\_dev} = \varepsilon_{11\_el} - \varepsilon_{11\_el\_isotrop} \quad (9-3)$$

Im Vergleich des funktionalen Zusammenhanges zwischen der elastischen Axialdehnung und dem Deviator sowie der mittleren Spannung zu den Versuchen ohne thermische Beanspruchung wird zuerst deutlich, dass die elastische Materialantwort, infolge des größeren Verformungswiderstandes, erheblich reduzierte ist.

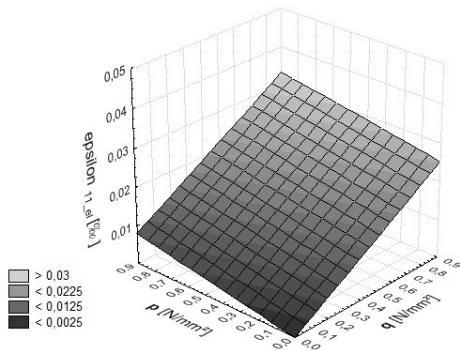
Die materialzustandsabhängige funktionale Beschreibung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von mittlerer Spannung und Deviator ist nahezu identisch (Abbildung 9-1 bis Abbildung 9-6). Eine Ausnahme stellt hierbei der Versuch mit 97 % Verdichtungsgrad und 2 % Wassergehalt (Abbildung 9-2) dar. Die elastischen Axialdehnungen erreichen hierbei deutliche größere Werte (rd. 5-fach) als bei den vergleichend betrachteten Materialzuständen (abweichende Skalierung der Ordinate). Der Grund hierfür ist in dem vergleichsweise geringem Wassergehalt des Probekörpers zu suchen. Im Zustand quasi-vollständigen Durchfrierens erhöht sich der Elastizitätsmodul mit steigendem Wasseranteil im Material.

## Kapitel 9

$b_{10} = 0,0280$

$b_{11} = 0,0088$

$R^2 = 0,973$



$b_{10} = 0,0992$

$b_{11} = 0,0969$

$R^2 = 0,996$

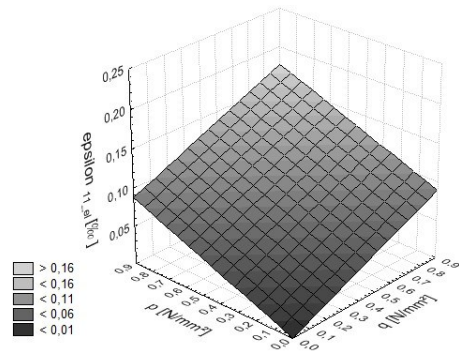


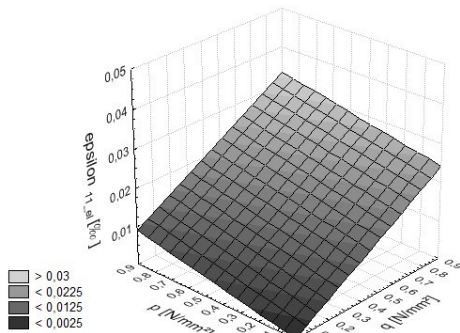
Abbildung 9-1: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

Abbildung 9-2: Elastische Axialdehnung bei 2 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

$b_{10} = 0,0269$

$b_{11} = 0,0100$

$R^2 = 0,960$



$b_{10} = 0,0280$

$b_{11} = 0,0088$

$R^2 = 0,973$

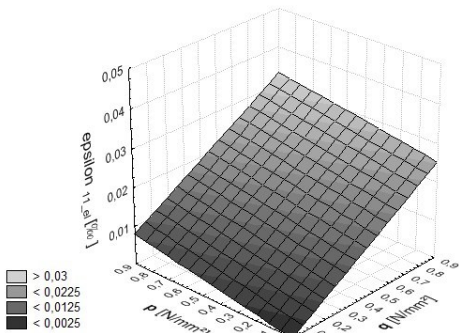


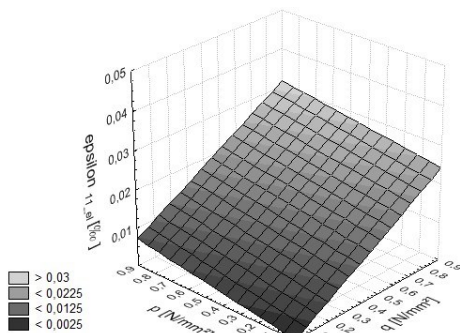
Abbildung 9-3: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 100 % Verdichtungsgrad

Abbildung 9-4: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

$b_{10} = 0,0269$

$b_{11} = 0,0080$

$R^2 = 0,980$



$b_{10} = 0,0232$

$b_{11} = 0,0103$

$R^2 = 0,988$

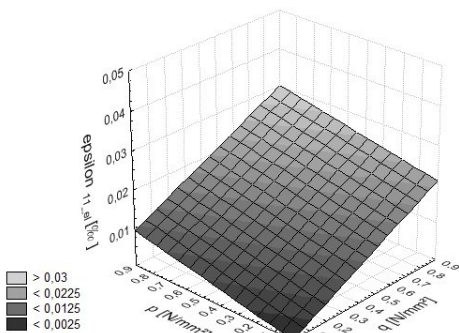


Abbildung 9-5: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 103 % Verdichtungsgrad

Abbildung 9-6: Elastische Axialdehnung bei 5 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad

Neben den bereits genannten, stark verkleinerten elastischen Dehnungen infolge des Durchfrierens des Materials, wird ein zweiter wichtiger Sachverhalt erkennbar. Während bei ToB im positiven Temperaturbereich höhere Wasseranteile im Probenbereich bekann-

termaßen zur Vergrößerung der elastischen Dehnungen führen (dränierte Bedingungen), kehrt sich dieser Zusammenhang bei quasi-vollständigem Durchfrieren um. In gleicher Art und Weise wie bereits in Kapitel 7 (Versuche ohne thermische Beeinflussung) gezeigt, werden die materialzustandsabhängigen Dehnungsunterschiede relativ und vergleichend dargestellt. Abbildung 9-7 zeigt das Dehnungsverhältnis bei Verdichtungsgraden von 97 % und 100 % zu einem Verdichtungsgrad von 103 % (auf 1 normiert) in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge. Im vollständig gefrorenen Zustand muss von einer nahezu identischen Materialantwort ausgegangen werden. Die geringfügige Dehnungszunahme bei abnehmendem Verdichtungsgrad (100 % bzw. 97 %) könnte zwar in gleicher Art und Weise interpretiert werden wie bei den Versuchen ohne thermische Beeinflussung, jedoch sind bei derartig kleinen absoluten Dehnungsamplituden Messungenauigkeiten und die Variabilität der Probekörper für die festgestellten Unterschiede nicht auszuschließen.

Deutlich ausgeprägter ist der Einfluss des Wassergehaltes auf die elastische Materialantwort. Die Abbildung 9-8 zeigt den Einfluss des Wassergehaltes auf die elastische Axialdehnung bei einem konstanten Verdichtungsgrad von 97 %.

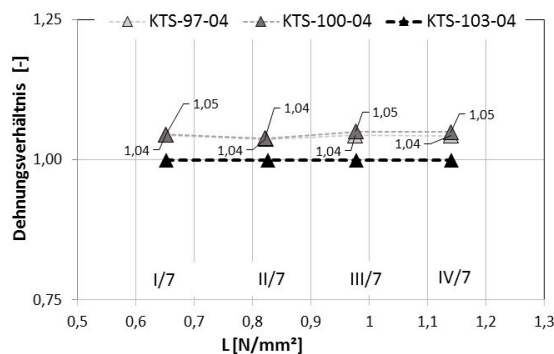


Abbildung 9-7: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen und konstantem Wassergehalt

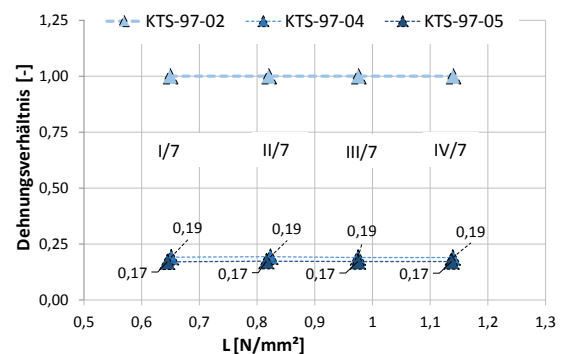


Abbildung 9-8: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei gleichem Verdichtungsverhältnis und unterschiedlichem Wassergehalt

Die Referenzgröße (normiert auf 1) stellt hierbei die Probe mit einem Wassergehalt von 2 % dar. Bei einer Steigerung des Wassergehaltes in der Probe von 2 % auf 4 % bzw. 5 % reduziert sich die elastische Materialantwort auf rd. 17 % bis 19 % der Vergleichsdehnung. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass in situ existente Schwankungen des Wassergehaltes (gerade in den Wintermonaten infolge Niederschlags- und Frost-Tauwechselbelastung) erhebliche Unterschiede des elastischen Materialverhaltens mit sich bringen. Neben der Berechnung der spannungsabhängigen elastischen Axialdehnungen in Abhängigkeit von mittlerer Spannung und Deviator wurden, in gleicher Art und Weise wie bereits bei den Versuchsergebnissen ohne thermische Beeinflussung dargestellt, die Dehnungen resultierend aus isotropen und deviatorischen Spannungszuständen berechnet und ins Verhältnis



zur axialen Gesamtdehnung gesetzt, so dass für ausgewählte Spannungszustände die Änderung des Dehnungsverhältnisses untersucht werden kann. Wesentlicher Unterschied zur elastischen Materialantwort ohne thermische Beeinflussung sind die deutlich größeren gestaltändernden Dehnungsanteile bei steigender axialer Gesamtdehnung. Unabhängig vom Verdichtungsgrad des Materials (Abbildung 9-9 und Abbildung 9-10) erreicht die aus deviatorischer Spannung resultierende Dehnung bei der im Vergleich größten Beanspruchung etwa 65 % bis 75 % der axialen Gesamtdehnung und liegt damit deutlich über den Dehnungen resultierend aus dem isotropen Spannungszustand.

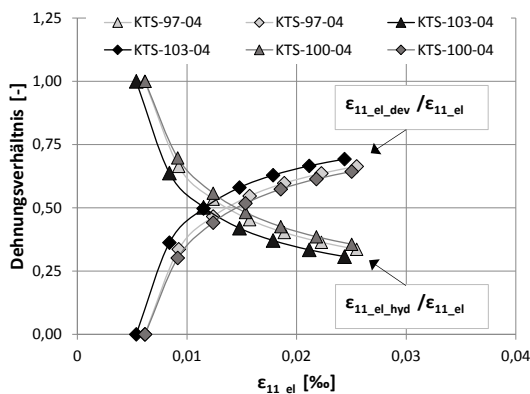


Abbildung 9-9: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III)

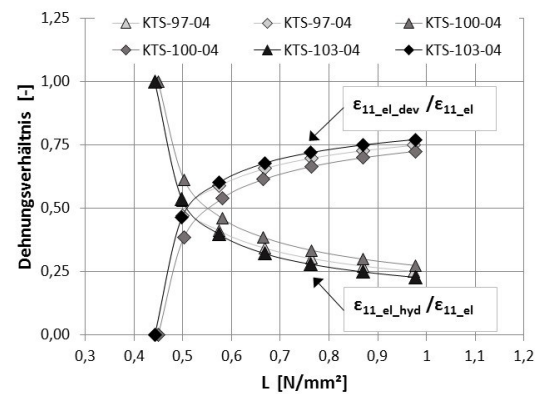


Abbildung 9-10: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III)

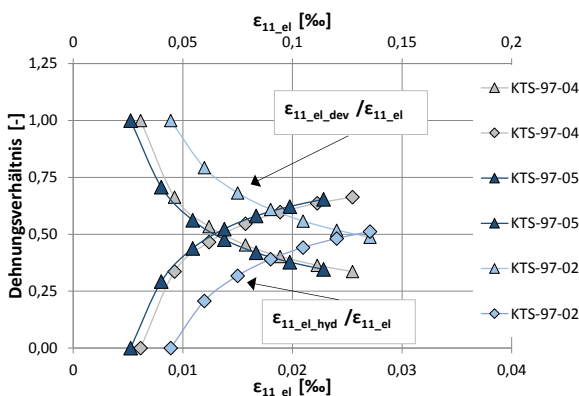


Abbildung 9-11: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III)

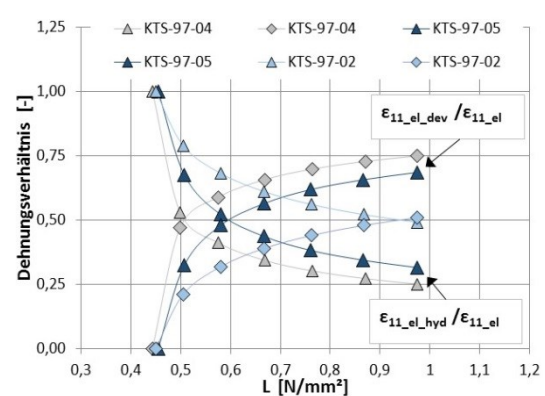


Abbildung 9-12: Aus mittlerer Spannung und Deviator resultierende Dehnung ( $\epsilon_{11\_el\_hyd}$  bzw.  $\epsilon_{11\_el\_dev}$ ) im Verhältnis zur axialen Gesamtdehnung ( $\epsilon_{11\_el}$ ) in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III)

Zu vermuten ist deshalb, dass der gefrorene Wasseranteil im Gemisch das volumenändernde Dehnungsvermögen erheblich reduziert. Neben der prinzipiell abnehmenden elastischen Axialgesamtdehnung bei steigendem Wassergehalt nehmen die aus den isotropen Span-



nungen resultierenden Dehnungen bei 4 % und 5 % Wassergehalt im Vergleich zu Proben mit 2 % Wassergehalt deutlich ab (Abbildung 9-11 und Abbildung 9-12). Eine Erklärung hierfür kann die durch die gebildete Eisphase stark behinderte Bewegung der Teilchen gegeneinander (Schwerpunktannäherung) sein. Infolge dessen vergrößert sich der gestaltändernde Dehnungsanteil, wenn der Wasseranteil im Gemisch vergrößert wird (dränierter Zustand). Zur besseren Darstellung ist in Abbildung 9-11 die obere horizontale Diagrammachse gesondert skaliert und gilt ausschließlich für die Werte der KTS-97-02.

Zum abschließenden Vergleich der elastischen Axialdehnung wurden diese für alle untersuchten Materialzustände ohne thermische Beeinflussung (und mit thermischer Beeinflussung (quasi-vollständiges Durchfrieren) gegenübergestellt (Abbildung 9-13; Versuchsdaten gem. Anlage H). Die Skalierung der linken Ordinate gilt für Axialdehnungen thermisch unbeeinflusster Materialien, die der rechten Ordinate für Axialdehnungen bei quasi-vollständiger Materialdurchfrierung. Nochmals verdeutlicht wird hierbei, dass quasi-vollständig kristallisierte Wasseranteile im Gesteinskorngemisch zu einer erheblichen Reduzierung der elastischen Dehnung bei gleicher Beanspruchung führen.

Exemplarisch vergleichend beträgt die Axialdehnung der Probe KTS 97-04 bei einem Spannungsverhältnis von 2 im thermisch unbeeinflussten Zustand rd. 0,98 ‰. Bei gleicher Beanspruchung, jedoch quasi-vollständigem Durchfrieren, beträgt die Dehnung nur noch 0,01 ‰ und damit etwa 1 % der Vergleichsdehnung.

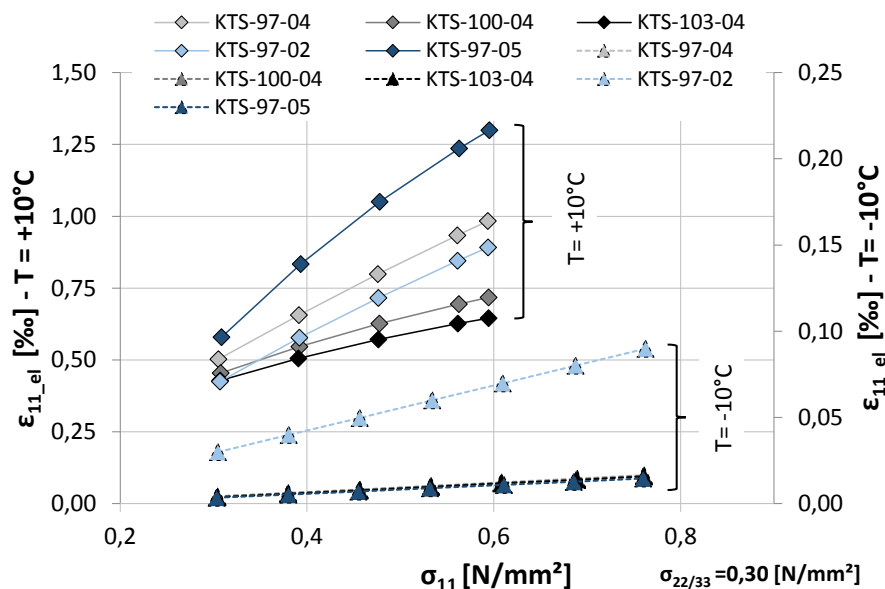


Abbildung 9-13: Vergleich elastischer Axialdehnungen aller untersuchter Materialzustände bei + 10 °C (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus IV ) und – 10 °C (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus I)

## 9.2 Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, kann für den untersuchten Beanspruchungsbereich eine erheblich reduzierte Materialverformung sowie ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten postuliert werden. Folglich liegen bei quasi-vollständigem Durchfrieren deutlich größere Elastizitätsmoduln des Materials als bei Beanspruchung ohne thermische Beeinflussung vor. Für die Berechnung der Elastizitätsmoduln bei quasi-vollständigem Durchfrieren wurde für die funktionale Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung im untersuchten Beanspruchungsbereich

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) \quad (9-4)$$

ein linearer Zusammenhang folgender Form verwendet:

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) = b_{10} \cdot \sigma_{11} + b_{11} \cdot \sigma_{22/33} \quad (9-5)$$

Neben der elastischen Materialantwort im Kompressionsbereich (Abbildung 9-14 und Abbildung 9-16) wurde zusätzlich überprüft, ob die Annahme linearer Elastizität auch bestätigt werden kann, wenn die Beanspruchung aus Kompressionsbeanspruchung in Extensionsbeanspruchung übergeht. Dies wurde derart überprüft, als dass die Extensionsbeanspruchung (für jede untersuchte Radialspannung) so lange gesteigert wurde, bis ein auswertbares Messsignal vorlag, da zu geringe Belastungen zu nicht mess- bzw. auswertbaren Materialantworten führen (Abbildung 9-15). Im Ergebnis dessen kann festgestellt werden, dass ein linearer funktionaler Ansatz der Spannungs-Dehnungsbeziehung anwendbar ist, auch für Spannungsverhältnisse mit  $\sigma_{11} < \sigma_{22/33}$  (ausschließlich geltend für den untersuchten Spannungsbereich). Aus Glg. 9-4 sowie einmaliger Differentiation nach  $\sigma_{11}$  berechnet sich der Elastizitätsmodul als konstante Größe zu

$$\frac{d\varepsilon_{11\_el}}{d\sigma_{11}} = b_{10} = \frac{1}{E} \quad (9-6)$$

Dabei gilt sowohl für die Berechnung der elastischen Axialdehnung (Glg. 9-5) als auch des Elastizitätsmoduls (Glg. 9-6) nachfolgender Definitionsbereich der kleinen Hauptspannung:

$$D_f = \left[ 0,30 \frac{N}{mm^2} \leq \sigma_{22/33} \leq 0,55 \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$D_f(\sigma_{11}) = f(\sigma_{22/33}) \text{ mit } \sigma_{22/33} \leq \sigma_{11}$$

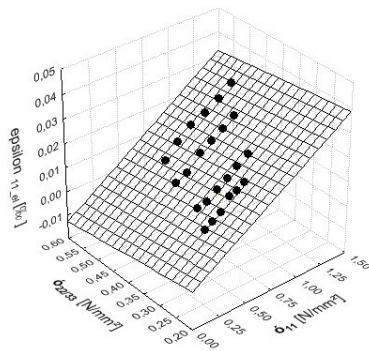


Abbildung 9-14: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22/33}$  am Beispiel der Materialprobe KTS 103-04

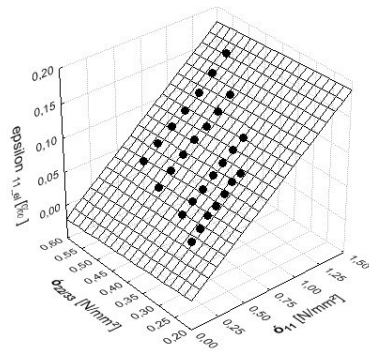


Abbildung 9-16: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22/33}$  am Beispiel der Materialprobe KTS 97-02

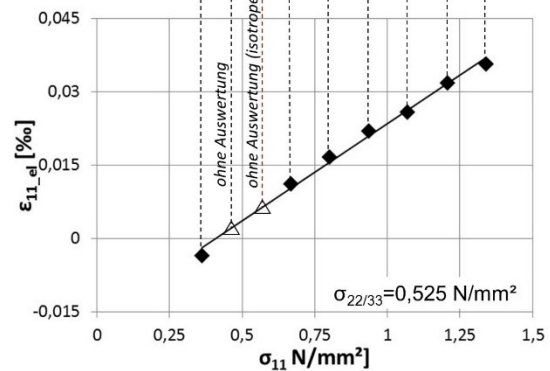
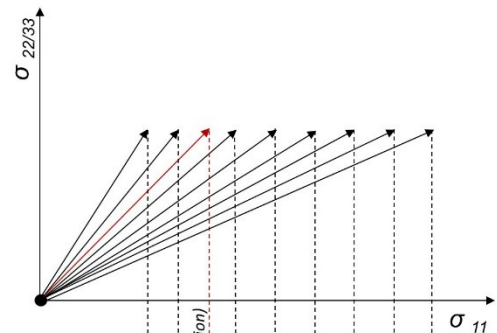


Abbildung 9-15: Prinzipdarstellung der Spannungspfade sowie der elastische Axialdehnung bei Extensions- und Kompressionsbeanspruchung am Beispiel einer Materialprobe KTS 97-04

Die Elastizitätsmoduln erreichen in Abhängigkeit vom Materialzustand Berechnungswerte zwischen etwa 7.500 N/mm<sup>2</sup> und 35.500 N/mm<sup>2</sup>. Diese Werte sind hierbei durchaus vergleichbar mit Steifigkeitstangentenmoduln von Asphaltgemischen im gleichen Temperaturbereich (Abbildung 9-17 und Abbildung 9-18).

Wie der Elastizitätsmodul entspricht auch die Querdehnzahl infolge linear-elastischen Materialverhaltens einer konstanten Größe. Die Werte der Querdehnzahl bei thermischer Beeinflussung und bei quasi-vollständigem Durchfrieren erreichen Werte zwischen etwa 0,13 und 0,36 (Abbildung 9-19 und Abbildung 9-20), wobei auch hier die Probe mit nur 2 M.-% Wassergehalt im Gesteinskornmisch neben dem bereits vergleichsweise geringen Elastizitätsmodul auch eine deutlich kleine Querdehnzahl aufweist. Vermutet werden kann, dass die größerer Kompressibilität dieser Probe aus einer größeren Mobilität des Gesteinskornmisches infolge der geringeren gefrorenen Wasseranteile im Gemisch resultiert.

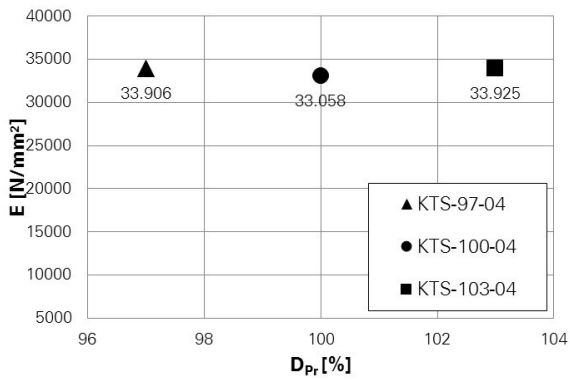


Abbildung 9-17: Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden und konstantem Wassergehalt; quasi-vollständige Materialdurchfrierung

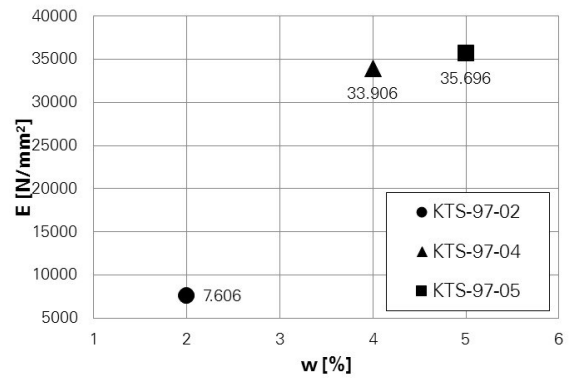


Abbildung 9-18: Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Wassergehalten und konstantem Verdichtungsgrad; quasi-vollständige Materialdurchfrierung

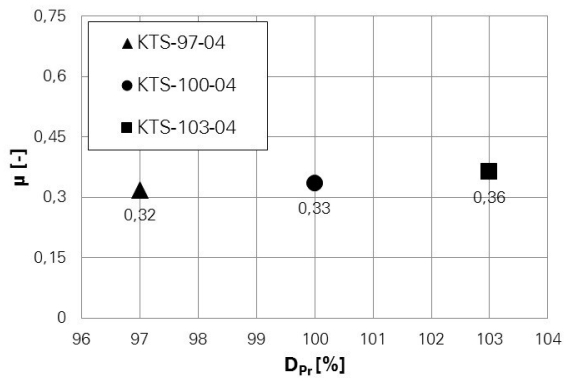


Abbildung 9-19: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad und konstantem Wassergehalt; quasi-vollständige Materialdurchfrierung

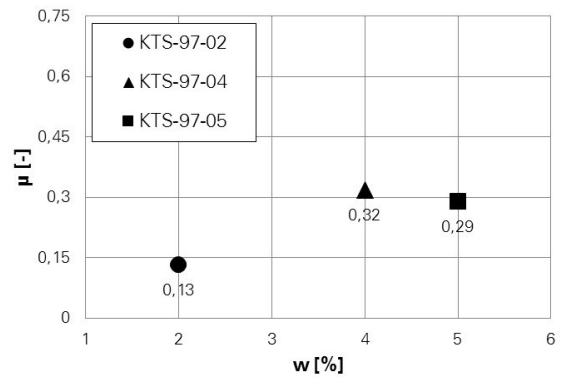


Abbildung 9-20: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Wassergehalt und konstantem Verdichtungsgrad; quasi-vollständige Materialdurchfrierung

## 10 Ergebnisse – Versuche mit thermischer Beeinflussung (Phasenübergang Abkühlung/Erwärmung)

### 10.1 Spannungs- und materialzustandsabhängiges Verformungsverhalten

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Materialverhalten für den thermisch unbeeinflussten Zustand sowie den thermisch beeinflussten Zustand (mit quasi-vollständigem Durchfrieren) dargelegt. Diese beiden Zustände stellen, wie erläutert, Grenzzustände dar, da das Wasser entweder vollständig in fluider Form oder quasi-vollständig in kristalliner Form vorliegt. Im vorliegenden Kapitel wird abschließend überprüft, wie sich die Materialantwort während des Aggregatzustandswechsels von Wasser im Gesteinskornkornemisch im relevanten Beanspruchungsbereich ändert.

Anknüpfend an Kapitel 8 wird in einem ersten Schritt auf die Änderung der elastischen Materialantwort während des Phasenübergangs von Wasser eingegangen. Hierfür wird die Dehnung infolge Lastzyklus III (Spannungspfad 1 bis 5) über alle 10 Prüfzeitpunkte (TP-F1 bis TP-F10; Versuchsdaten gem. Anlage H) und damit über einen Temperaturbereich von etwa rd.  $-0,219\text{ °C}$  bis  $-1,511\text{ °C}$  betrachtet. Im Rahmen dieser Betrachtung wird die elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge und der Temperatur, zuerst vereinfacht (linear), durch den Ansatz

$$\varepsilon_{11\_el} = b_{11} \cdot L + b_{12} \quad (10-1)$$

approximiert. Wird des Weiteren unterstellt, dass sowohl im positiven  $^{\circ}\text{C}$ -Temperaturbereich ( $> 0\text{ °C}$ ) als auch bei quasi-vollständigem Durchfrieren eine temperaturunabhängige Materialantwort vorliegt, können die Koeffizienten  $b_{11}$  und  $b_{12}$  als Konstanten (Grenzwerte) angesetzt werden. Für die temperaturabhängige Koeffizientenapproximation wird sowohl für die Abkühlungs- als auch für die Erwärmungsphase nachfolgender funktionaler Ansatz verwendet:

$$b_{11} = a_{10} + a_{11} \cdot e^{-\left(\frac{-T-a_{12}}{a_{13}}\right)^{a_{14}}} \quad (10-2)$$

Als Grenzwertbetrachtung für  $T \rightarrow -\infty$  wird unterstellt, dass Temperaturunabhängigkeit bereits bei  $-10\text{ °C}$  vorliegt und damit der Koeffizient  $b_{11}$  den Wert des Parametersatzes bei  $-10\text{ °C}$  annimmt. Folglich gilt

$$\lim_{T \rightarrow -\infty} b_{11} = a_{10} + a_{11} \cdot e^{-\left(\frac{-T-a_{12}}{a_{13}}\right)^{a_{14}}} \quad (10-3)$$

und im Weiteren

$$\lim_{T \rightarrow -\infty} b_{11} = a_{10} \quad (10-4)$$

Als Grenzwertbetrachtung für  $T \rightarrow 0$  im positiven Temperaturbereich und dafür unterstelltes temperaturunabhängiges Materialverhalten wird angenommen, dass Temperaturunabhängigkeit bereits bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  vorliegt und damit der Koeffizient  $b_{11}$  den Wert des Parameters bei  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  annimmt. Folglich gilt

$$\lim_{T \rightarrow 0} b_{11} = a_{10} + a_{11} \cdot e^{-\left(\frac{-T-a_{12}}{a_{13}}\right)^{a_{14}}} \quad (10-5)$$

und im Weiteren

$$\lim_{T \rightarrow 0} b_{11} = a_{10} + a_{11} \quad (10-6)$$

Mit  $a_{12} = 0$  verbleiben die beiden durch Regression zu bestimmenden Koeffizienten  $a_{13}$  und  $a_{14}$ . Der Koeffizient  $b_{12}$  wird als Funktion von  $b_{11}$  berechnet und für die Abkühlphase nach

$$b_{12} = a_{15} \cdot b_{11}^{a_{16}} \cdot (-1) \quad (10-7)$$

sowie für die Erwärmungsphase nach

$$b_{12} = a_{15} \cdot b_{11}^2 + a_{16} \cdot b_{11} \quad (10-8)$$

berechnet. Die freien Parameter  $a_{15}$  und  $a_{16}$  sind ebenfalls mittels Regression zu ermitteln. Beispielhaft für die Probe KTS 97-04 zeigen die Abbildung 10-1 und Abbildung 10-2 die temperaturabhängige Änderung der elastischen Axialdehnung für die betrachteten Prüfzeitpunkte (TP-F1 bis TP-F10). Erkennbar ist die vergleichsweise starke Abnahme der elastischen Materialantwort während der Abkühlphase bereits bei geringer Unterschreitung der  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -Grenze im Probekörperkern. Dies resultiert, wie bereits in Kapitel 8 erläutert, daraus, dass bereits ein Großteil des Probekörpers durchgefroren ist, wenn die Gefrierfront die Nähe des Probekörperkerns erreicht. Auf Grund der geringen Wasseranteile im Gemisch vollzieht sich der Kristallisationsprozess vergleichsweise schnell. Nach dem Aggregatzustandswechsel von Wasser ist die elastische Materialantwort im untersuchten Beanspruchungsbereich nahezu konstant. Während der Erwärmungsphase nehmen die Dehnungen bereits bei niedrigeren Kerntemperaturen deutlich zu, da bereits wesentliche Teile des Probekörpers wieder aufgetaut sind.

$a_{10}=0,035$   
 $a_{13}=0,157$   
 $a_{15}=0,086$

$a_{11}=2,271-a_{10}$   
 $a_{14}=0,596$   
 $a_{16}=0,608$

$a_{12}=0$   
 $R^2 = 0,897$

$a_{10}=0,035$   
 $a_{13}=2,211$   
 $a_{15}=0,079$

$a_{11}=2,271-a_{10}$   
 $a_{14}=2,052$   
 $a_{16}=-0,198$

$a_{12}=0$   
 $R^2 = 0,943$

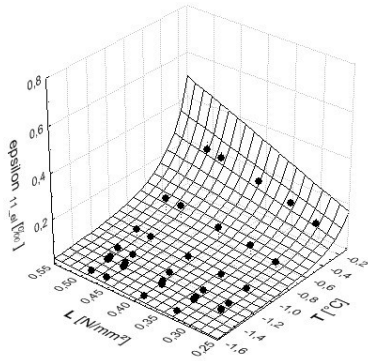


Abbildung 10-1: Elastische Axialdehnungen in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und Temperatur während des Phasenübergangs von Wasser (Abkühlphase); Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus III

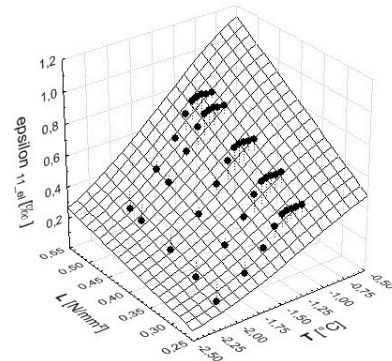


Abbildung 10-2: Elastische Axialdehnungen in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und Temperatur während des Phasenübergangs von Wasser (Erwärmungsphase); Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus III

Betrachtet man die elastischen Axialdehnungen zu den festgelegten Prüfzeitpunkten während des Abkühl- und Erwärmungsprozesses für die unterschiedlichen untersuchten Materialzustände, ist die Bedeutung des Verdichtungsgrades im Vergleich zum Probenwassergehalt als untergeordnet einzustufen. Aus einem größeren Verdichtungsgrad resultieren bei gleicher Beanspruchung auch während des Aggregatzustandswechsels von Wasser geringere elastische Dehnungen, wobei der absolute Dehnungsunterschied mit abnehmender Temperatur kleiner wird (Abbildung 10-3 und Abbildung 10-4).

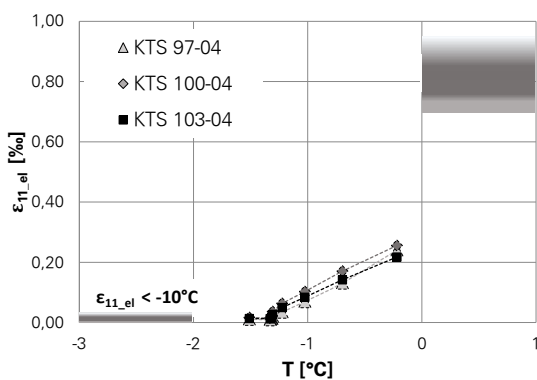


Abbildung 10-3: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III)

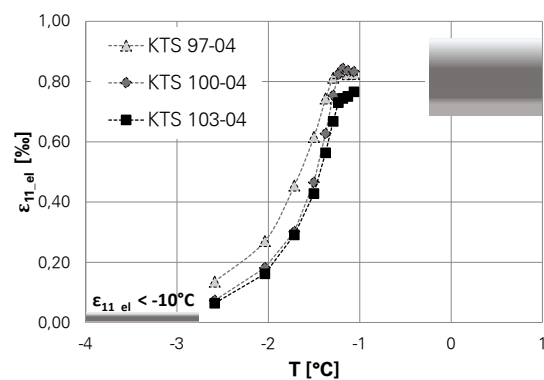


Abbildung 10-4: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Erwärmungsphase bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III)

Die feststellbaren Unterschiede hinsichtlich der elastischen Materialantwort bei unterschiedlichen Wassergehalten im Gesteinskornmisch zeigen sich auch innerhalb des Pha-

senübergangsprozesses von Wasser. Je größer der Wassergehalt im Gemisch, desto größer ist der absolute Dehnungsunterschied zwischen den betrachteten Grenzzuständen, d. h. ohne thermische Beeinflussung bzw. quasi-vollständigem Durchfrieren (Abbildung 10-5 und Abbildung 10-6).

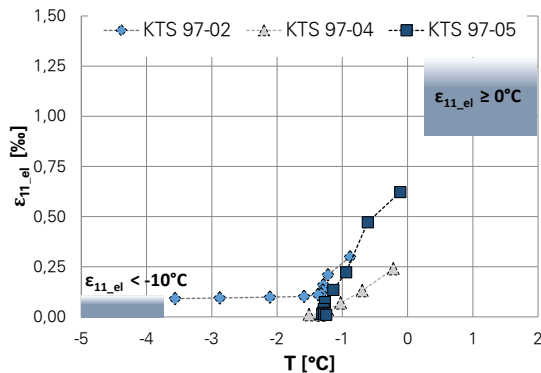


Abbildung 10-5: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III)

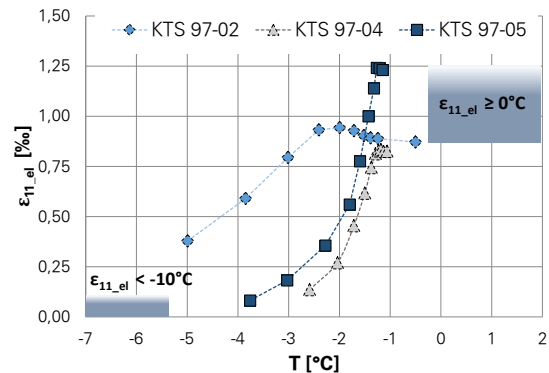


Abbildung 10-6: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Erwärmungsphase bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III)

Im nächsten Schritt wurde überprüft, wie sich die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungsbeziehung im positiven °C-Temperaturbereich verändert, wenn der Aggregatzustandswechsel von Wasser einsetzt; unabhängig vom jeweiligen Materialzustand. Nach der Auswertung aller 10 Prüfpunkte der Abkühlphase (TP-F1 bis TP-F10) konnte festgestellt werden, dass mit Abnahme der fluiden Wasserphase, neben der Reduzierung der elastischen Axialdehnung, die elastische Materialantwort immer „festkörperähnlicher“ wird, d. h. sich zunehmend linear elastisch verhält. Am Beispiel von Probe KTS 97-04 zeigen die Abbildung 10-7 bis Abbildung 10-10 das linear elastische Materialverhalten bereits bei Prüfpunkt TP-F3 angenommen werden konnte. Entgegengesetztes Verhalten kann, wie erwartet, im Rahmen des Erwärmungsprozesses festgestellt werden. Bei Temperaturanstieg wandert die Tautfront in Richtung Probekörperkern. Wenn die Randbereiche beginnen aufzutauen, steigt die elastische Dehnung an. Linear elastisches Materialverhalten kann zu diesem Zeitpunkt noch unterstellt werden, obwohl die Dehnungen bereits zunehmen. Bereits ab dem Prüfzeitpunkt TP-T3 konnten die erwarteten Nichtlinearitäten erneut festgestellt werden.

Ausnahmen innerhalb der Prüferien war zum einen die Materialprobe mit dem geringsten Wassergehalt von 2 M.-%, für welche bereits zum ersten Prüfzeitpunkt (TP-F1) die Kristallisation von Wasser derart fortgeschritten war, weshalb ausschließlich lineare Elastizität festgestellt werden konnte.



## Kapitel 10

$b_{10}=0,5494$   
 $b_{11}=-0,8345$

$b_{12}=-0,2133$   
 $b_{13}=0,5809$

$R^2 = 0,974$   
 $T = -0,219^\circ\text{C}$

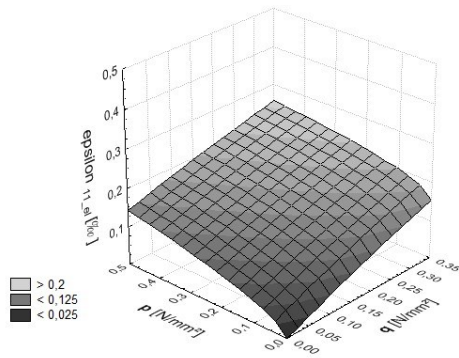


Abbildung 10-7: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-F1 Abkühlphase)

$b_{10}=-0,3181$

$b_{11}=-0,1162$

$R^2 = 0,950$   
 $T = -2,59^\circ\text{C}$

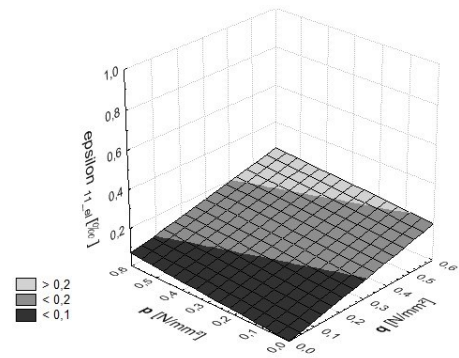


Abbildung 10-8: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-T1 Erwärmungsphase)

$b_{10}=0,1487$

$b_{11}=0,0654$

$R^2 = 0,972$   
 $T = -1,025^\circ\text{C}$

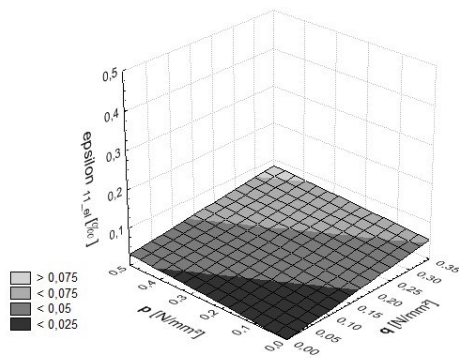


Abbildung 10-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-F3 Abkühlphase)

$b_{10}=0,8274$

$b_{12}=0,5039$

$R^2 = 0,990$   
 $T = -1,72^\circ\text{C}$

$b_{11}=0,0020$

$b_{13}=0,8429$

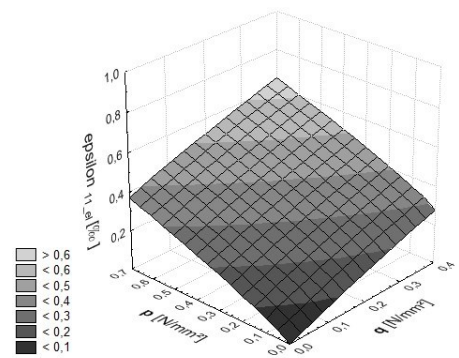


Abbildung 10-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-T3 Erwärmungsphase)

$b_{10}=0,0251$

$b_{11}=0,0104$

$R^2 = 0,921$   
 $T = -1,511^\circ\text{C}$

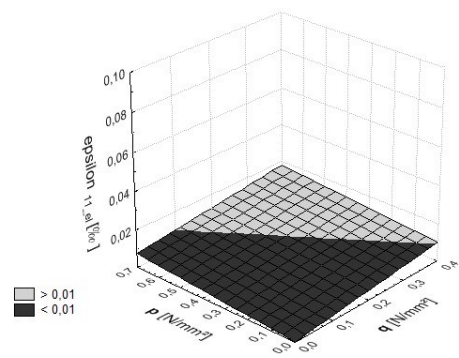


Abbildung 10-11: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-F10 Abkühlphase)

$b_{10}=1,9456$

$b_{12}=0,7656$

$R^2 = 0,985$   
 $T = -1,06^\circ\text{C}$

$b_{11}=-1,5396$

$b_{13}=0,3966$

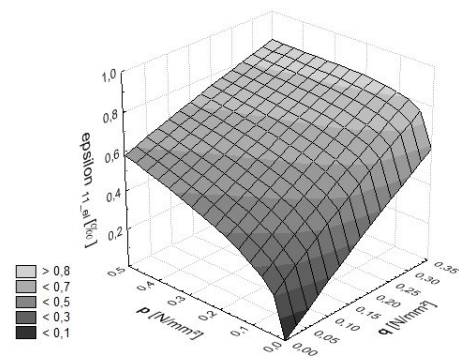


Abbildung 10-12: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; (TP-T10 Erwärmungsphase)

Zum anderen konnte bei den Materialproben mit dem im Vergleich größten Wassergehalt von 5 M.-% die anfängliche Nichtlinearität zu Beginn der Abkühlphase bis Prüfzeitpunkt TP-F3 festgestellt werden, also über den längsten Zeitraum. Daraus folgt, dass die Spannungsabhängigkeit des Materialverhaltens bei thermischer Beeinflussung maßgebend durch den Wassergehalt im Gesteinskorngemisch mitbestimmt wird.

Von wesentlicher Bedeutung an dieser Stelle ist, dass der inhomogene Materialzustand während der Bewegung einer Gefrier- bzw. Tautfront im Element zu völlig unterschiedlichem Materialverhalten führt. Die Abbildung 10-13 und Abbildung 10-14 verdeutlichen diesen Sachverhalt. Bei einer nahezu identischen Probekörperkerntemperatur unterscheiden sich sowohl die elastische Materialantwort (am Spannungspunkt) als auch die Spannungsabhängigkeit. Denkbar ist, dass Vergleichbarkeit bzw. identisches mechanisches Materialverhalten nur dann erwartet werden kann, wenn gleiche fluide und kristalline Wasseranteile in einem „fiktiven Betrachtungselement“ vorliegen (dränierte Bedingungen). Die alleinige Bezugsgröße der Kerntemperatur ist hierfür unzureichend, da Ort, geometrische Ausprägung und Wanderung der 0 °C-Isotherme im Zuge der thermischen Beeinflussung nicht erfasst werden können.

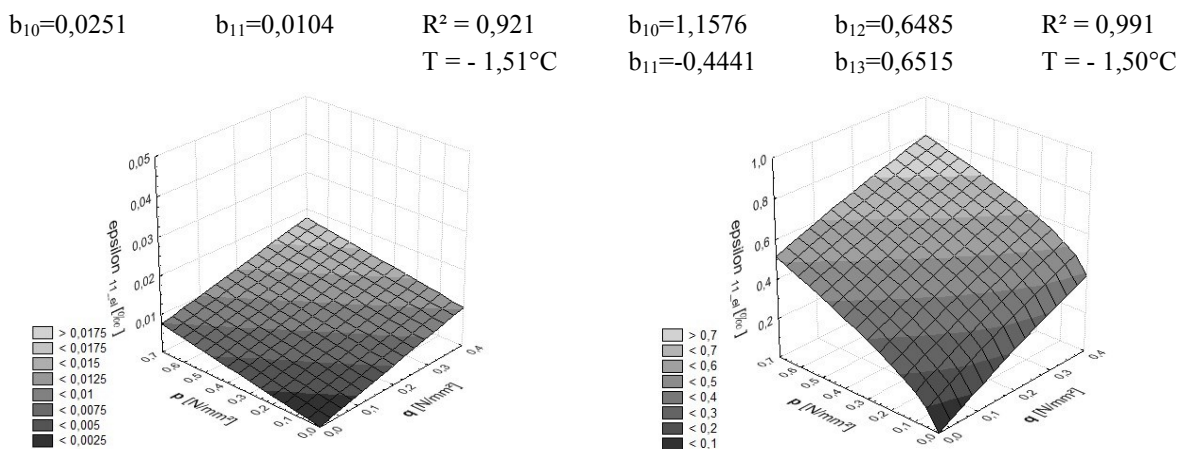


Abbildung 10-13: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad bei einer Probekörperkerntemperatur von -1,51 °C (TP-F10 Abkühlphase)

Abbildung 10-14: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad bei einer Probekörperkerntemperatur von -1,50 °C (TP-T4 Erwärmungsphase)

## 10.2 Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

Wie in Kapitel 10.1 erläutert, können während des Aggregatzustandswechsels von Wasser in der ToB (im Probekörper) in Abhängigkeit von der Probekörperkerntemperatur (bzw. vom Anteil noch nicht gefrorenen Wassers) sowohl eine nichtlinear-elastische als auch

linear-elastische Materialantwort festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass in Folge des Phasenüberganges von Wasser im Gesteinskorngemisch die Kohäsion ansteigt, was durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird. Deshalb wird für die Berechnung des Elastizitätsmoduls während des temperaturabhängigen Übergangs von der nichtlinear- zur linear-elastischen Materialantwort (Abbildung 10-16) sowohl für den Abkühl- als auch den Erwärmungsprozess für die Beziehung

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) \quad (10-9)$$

folgende Ansatzfunktion verwendet.

$$\varepsilon_{11\_el} = f(\sigma_{11}; \sigma_{22/33}) = \ln(\sigma_{11} + 1) \cdot (b_{11} \cdot \sigma_{22/33} + b_{12}) + (b_{13} \cdot \sigma_{22/33}^{b_{14}}) \quad (10-10)$$

Neben dem nicht-elastischen Materialverhalten (Abbildung 10-15) liegt bei fortschreitender Abkühlung linearere Elastizität vor (Abbildung 10-17). Bei fortschreitender Erwärmung kehrt sich der Sachverhalt um. Der Elastizitätsmodul bei nicht-linearem Materialantwortverhalten während des Phasenübergangs von Wasser berechnet sich nach einmaliger Differentiation nach  $\sigma_{11}$  zu

$$\frac{d\varepsilon_{11\_el}}{d\sigma_{11}} = \frac{(b_{10} \cdot \sigma_{22/33} + b_{11})}{\sigma_{11} + 1} = \frac{1}{E} \quad (10-11)$$

Für die Prüfzeitpunkte, bei welchen linear elastisches Materialverhalten unterstellt werden kann, gelten die Ausführungen nach Kapitel 9.2.

Dabei gilt sowohl für die Berechnung der elastischen Axialdehnung (Glg. 9-5) als auch des Elastizitätsmoduls (Glg. 9-6) nachfolgender Definitionsbereich der kleinen Hauptspannung:

$$D_f = \left[ 0,15 \frac{N}{mm^2} \leq \sigma_{22/33} \leq 0,45 \frac{N}{mm^2} \right) \quad \text{bzw.} \quad D_f = \left[ 0,225 \frac{N}{mm^2} \leq \sigma_{22/33} \leq 0,55 \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$D_f(\sigma_{11}) = f(\sigma_{22/33}) \text{ mit } \sigma_{22/33} \leq \sigma_{11}$$

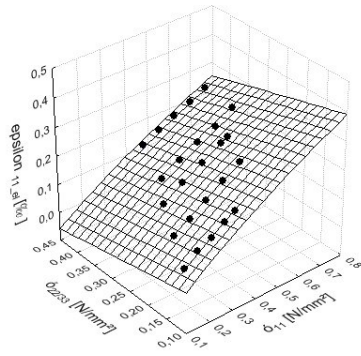


Abbildung 10-15: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22/33}$  am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04

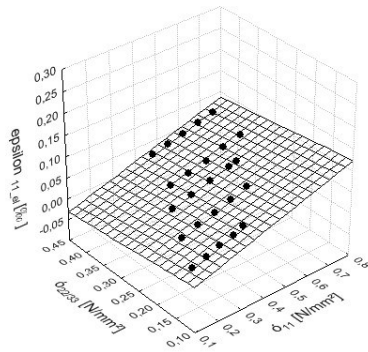
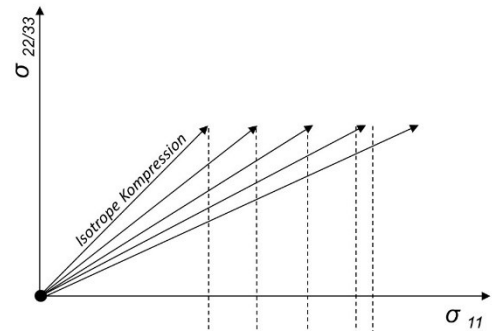


Abbildung 10-17: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von  $\sigma_{11}$  und  $\sigma_{22/33}$  am Prüfzeitpunkt TP-F3 (-1,025 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04

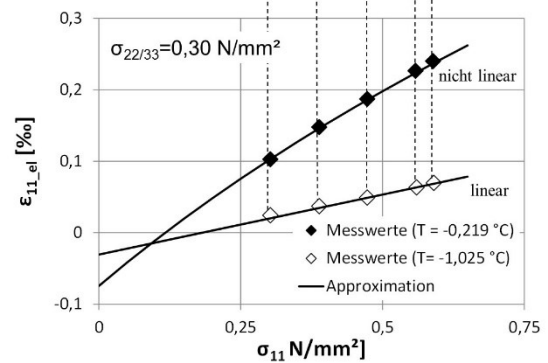


Abbildung 10-16: Prinzip Darstellung der Spannungspfade sowie der elastische Axialdehnung am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) und TP-F3 (-1,025 °C) am Beispiel einer Materialprobe KTS 97-04

Nachfolgend zeigen die Abbildung 10-18 und Abbildung 10-19 den Elastizitätsmodul bzw. die Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand bei einer Probekörperkerntemperatur von -0,219 °C, d. h. im ersten Bereich des Phasenübergangs. Erkennbar ist - neben dem vergleichsweise geringen Anstieg des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Axialspannung - die nur noch geringe Abhängigkeit von der Radialspannung. Auffallend dabei ist der spannungsabhängige Anstieg der Querdehnzahl infolge der geringen Änderung (Zunahme) des Elastizitätsmoduls.

Da dieses Phänomen ausschließlich bei Materialproben mit 4 M.-% bzw. 5 M.-% Wassergehalt festgestellt wurde und bei geringeren Wassergehalten nicht auftrat (vgl. Kapitel 10.1) sind lokale Porendrücke im unmittelbaren Bereich der Gefrier- bzw. Taufront als Ursache für die spannungsabhängige Zunahme der Inkompressibilität nicht auszuschließen. Für das genauere Studium dieses Effektes sind weitere, über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgehende, Untersuchungen erforderlich.

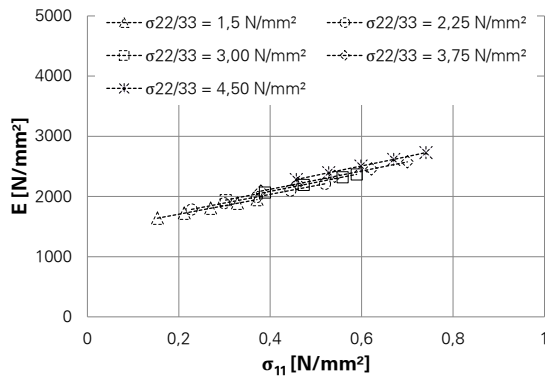


Abbildung 10-18: Elastizitätsmodul am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04

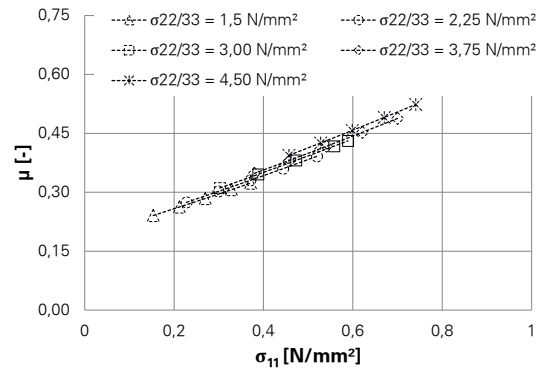


Abbildung 10-19: Querdehnzahl am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04

Abschließend werden die berechneten Elastizitätsmoduln und Querdehnzahlen während der Zeitspanne des Aggregatzustandswechsels dargestellt. Abbildung 10-20 und Abbildung 10-21 zeigen die temperaturabhängige Zunahme des Elastizitätsmoduls bei den unterschiedlichen untersuchten Verdichtungsgraden und Wassergehalten. Infolge der bereits erläuterten, sehr schnellen Abnahme der elastischen Dehnungen bei fortschreitendem Durchfrieren, steigt der Elastizitätsmodul ebenfalls vergleichsweise schnell und erheblich an. Am Ende des Phasenübergangs von Wasser (Prüfzeitpunkt TP-F10) erreicht der Elastizitätsmodul nahezu identische Werte wie bei quasi-vollständigem Durchfrieren (vgl. Kapitel 9).

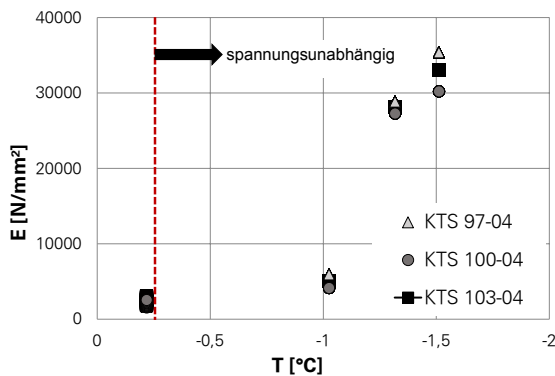


Abbildung 10-20: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Verdichtungsgraden

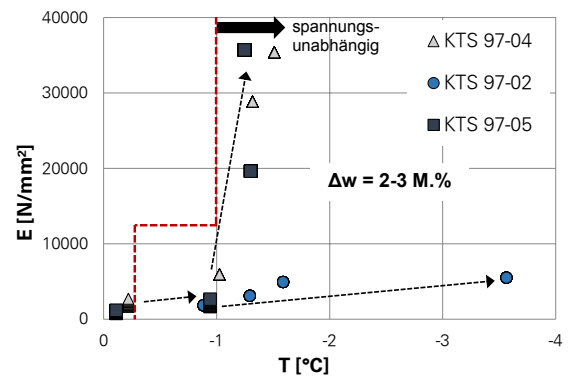


Abbildung 10-21: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Wassergehalten

Signifikante Unterschiede hinsichtlich des Einflusses des Verdichtungsgrades konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Sehr deutlich erkennbar ist, dass auch innerhalb der Zeitspanne, in welcher der größte Teil des Aggregatzustandswechsels stattfindet, der Wassergehalt den Wert des Elastizitätsmoduls erheblich

beeinflusst. Eine Differenz des Wassergehaltes im Gemisch von 2 bis 3 M.-% bewirkt im Beispiel einen Unterschied der berechneten Elastizitätsmoduln zwischen Faktor 3 und 4.

Die Querdehnzahl konnte bei Materialproben mit 4 M.-% und 5 M.-% Wassergehalt sowie Probekörperkerntemperaturen, bei welchen lineare Elastizität angenommen wurde, mit etwa 0,3 berechnet werden. Die Ausnahme stellt auch hier die Probe mit dem im Vergleich geringsten Wasseranteil von 2 M.-% dar (vgl. Kapitel 9). Die berechneten Querdehnzahlen sind infolge größerer Kompressibilität geringer und liegen im Bereich zwischen 0,1 und 0,2. Die rote Markierung in der Abbildung 10-20 und der Abbildung 10-23 trennt, vereinfacht zur besseren Anschauung, die Temperaturbereiche/Prüfzeitpunkte, zwischen welchen lineare bzw. nicht lineare Elastizität festgestellt wurde und damit den spannungsabhängigen vom spannungsunabhängigen Bereich.

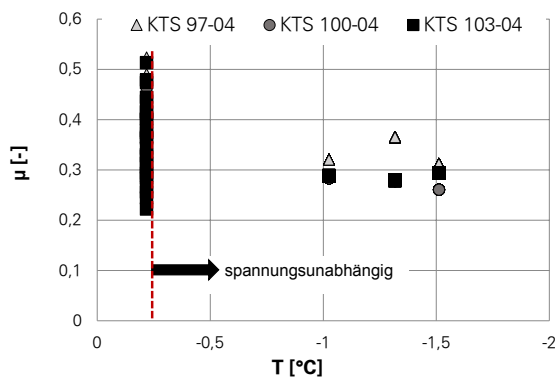


Abbildung 10-22: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Verdichtungsgraden

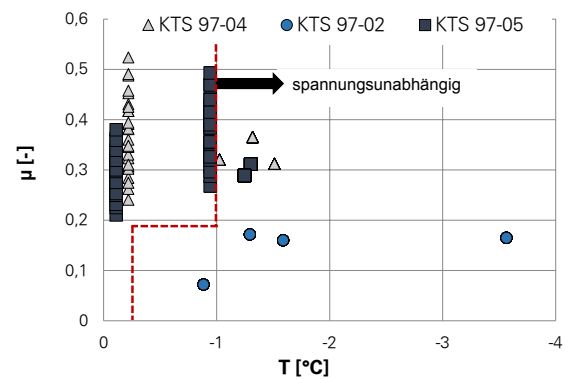


Abbildung 10-23: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Wassergehalten

## 11 Zusammenfassung

Für die rechnerische Dimensionierung von Straßenbefestigungen ist die Kenntnis des mechanischen Verformungsverhaltens der verwendeten Baustoffe von essentieller Bedeutung. Gesteinskornmischungen sind seit Langem Gegenstand der Forschung, da deren Materialverhalten von unterschiedlichsten Randbedingungen beeinflusst wird und deshalb sehr komplex ist. Die Bedeutung des Einflusses der Temperatur auf das mechanische Verformungsverhalten, wird häufig in Verbindung mit spezifischen regionalen Besonderheiten (beispielsweise Permafrostböden) oder aber spezifischen bautechnischen Anwendungen (beispielsweise Baugrundvereisungen) gesehen. Da aus den klimatischen Bedingungen in Deutschland sowohl positive als auch negative Temperaturen [°C] im ungebundenen Straßenoberbau (und im Untergrund/Unterbau) resultieren, ist temperaturabhängiges Materialverhalten die zwangsläufige Folge. Im Vergleich zu Asphalt unterscheidet sich die Temperaturabhängigkeit von ToB im Gebrauchstemperaturbereich im Wesentlichen dadurch, dass diese für einen begrenzten Bereich innerhalb des negativen °C-Temperaturbereiches vorliegt. Deshalb ist ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit die Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens von Gesteinskornmischungen unter triaxialen Bedingungen und zyklischer Beanspruchung sowie zusätzlicher thermischer Beeinflussung des Materialgemisches.

Essentielle Voraussetzung für die Untersuchung des mechanischen Verformungsverhaltens unter derartigen Randbedingungen war die Erarbeitung eines geeigneten Untersuchungsverfahrens. Im Vorfeld des eigentlichen Untersuchungsprogramms wurde deshalb in einem ersten Schritt ein eigenständiges Konditionierungsverfahren erarbeitet, abweichend von den Empfehlungen der DIN EN 13286-7. Grund hierfür ist, dass die Berechnung der Volumenänderung infolge zyklischer Beanspruchung essentiell erforderlich ist, um den Materialzustand adäquat charakterisieren zu können. Die ausschließliche Betrachtung nur einer der drei Raumrichtungen wird (nicht nur für Konditionierungszwecke) als unzureichend angesehen, da Pyknotropie zwingende Voraussetzung für die Charakterisierung des mechanischen Verformungsverhaltens ist.

Um quasi-elastisches Materialverhalten unterstellen und untersuchen zu können, wurde in einem zweiten Schritt, vor der Durchführung der Versuchsreihen, ein Bewertungskriterium erarbeitet, auf dessen Grundlage materialspezifisch und materialzustandsabhängig die elastische Materialantwort als primäre Zielgröße angesprochen werden kann.

Neben der bekannten Temperaturunabhängigkeit von ToB im positiven °C-Temperaturbereich (Gebrauchstemperaturbereich) konnte im Ergebnis der vorliegenden Arbeit festgestellt

werden, dass Gleiches gilt wenn das im Gesteinskorngemisch existente Wasser quasi-vollständig kristallisiert ist und dieser Zustand unverändert erhalten bleibt (bzw. eine weitere Abkühlung vorliegt), d. h. die Massenanteile von Wasser in fluider und kristalliner Form als konstant angesehen werden können. Temperaturzustände, welche zwischen den beiden zuvor genannten Sachverhalten eingeordnet werden können (unabhängig davon, ob ein Abkühlungs- oder Erwärmungsprozess vorliegt), beeinflussen das mechanische Verformungsverhalten des Materials. Von besonderer Bedeutung hierbei ist der Zeitraum des Phasenüberganges von Wasser, da sich infolge des fortlaufenden Aggregatzustandswechsels (fluid-kristallin) die Materialstruktur und damit die Materialantwort erheblich verändern.

Der Verdichtungsgrad, welcher ohne thermische Beeinflussung, bekanntermaßen große Bedeutung für die elastische Materialantwort besitzt, konnte als relevante Einflussgröße bei thermischer Beeinflussungen (sowohl während des Phasenübergangs als auch bei vollständiger Durchfrörierung) nicht herausgearbeitet werden. Streuungen der Materialeigenschaften sowie die geringen Probekörperdeformationen infolge der thermischen Beeinflussung sind mögliche Gründe hierfür.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte herausgearbeitet werden, dass nicht nur ohne thermische Beeinflussung, sondern auch bei thermischer Beeinflussung der Wassergehalt dominanten Charakter aufweist. Ein steigender Wassergehalt führt bei thermisch unbeeinflusstem Material zur bekannten Zunahme der elastischen Materialantwort (dränierete Bedingungen) bei gleicher Beanspruchung. Bei thermischer Beeinflussung tritt ein gegenteiliges Phänomen auf. Die elastische Dehnung nimmt bei gleichen Beanspruchungsrandbedingungen und steigendem Wassergehalt (dränierete Bedingungen) erheblich ab und kann mit dem ansteigenden kristallinen Wasseranteil im Gesteinskorngemisch begründet werden.

Die Spannungsabhängigkeit des Gesteinskorngemisches, welche für den thermisch unbeeinflussten Zustand bekannt ist, konnte hierbei für den thermisch beeinflussten Zustand nur zu Beginn der Abkühlphase bzw. am Ende der Erwärmungsphase festgestellt werden. Bereits bei vergleichsweise geringer Abkühldauer konnte im Rahmen der festgelegten Prüfbedingungen, der festgelegten Prüfprozedur und der definierten Beanspruchungsniveaus linear elastisches Materialverhalten unterstellt werden. Infolgedessen gilt, dass die charakteristischen Materialkennwerte, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl, vereinfacht als konstante, spannungsunabhängige Größen angesehen werden können.

In den vorliegenden Untersuchungen lagen definierte thermische Bedingungen in Kammer und Zelle der Prüfeinrichtung vor, um vergleichend analysieren zu können. Für die Berücksichtigung realitätsnaher thermischer Randbedingungen sind reale Abkühlraten zu berücksichtigen.



Der Kerntemperaturverlauf während des Phasenübergangs zeigte auf Grundlage der Messungen den charakteristischen, zeitlich verzögerten Abkühl- bzw. Erwärmungsprozess des Elementes, infolge des Aggregatzustandswechsels von Wasser unterhalb von 0 °C. In wenigen Postulaten, beispielsweise in SRES (2009) wird zusätzlich auf das Phänomen des „supercooling“ verwiesen, aus welchem ein sprunghafter Temperaturanstieg nach vorangegangener Unterkühlung resultiert. Dieser metastabile Zustand, in welchem sich Wasser befinden kann, konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ein möglicher Grund hierfür ist der vergleichsweise geringe Probenwassergehalt aber auch die punktuelle Temperaturmessung. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass sich der Probekörper infolge der zyklischen Beanspruchung während des Phasenübergangs nicht in Ruhe befindet, so dass der metastabile Zustand nicht existent oder frühzeitig gestört ist.

## 12 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen die Grundlage für weitere Forschungen sein, um das mechanische Verformungsverhalten von ToB sowohl im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung als auch bei der Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen möglichst realitätsnah zu berücksichtigen.

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit das elastische Materialverhalten Untersuchungsgegenstand war ist der weiterer Untersuchungsfokus auf das plastische Verformungsverhalten von Gesteinskornmischen unter triaxialen Bedingungen und zyklischer Beanspruchung sowie zusätzlicher thermischer Beeinflussung des Gesteinskornmischens zu legen.

Eine weitere essentielle Notwendigkeit sind Untersuchungen zu den zeitabhängigen Temperaturbedingungen und dem zeitabhängigen Wassergehalt im ungebundenen Oberbau in situ. Darauf aufbauende numerische Simulationen von Temperaturfeldern und Feuchtigkeitsverteilungen sowie deren Kopplung sind erforderliche Schritte für weiterführende Strukturanalysen.

Grundsätzlich sind ungebundene Konstruktionsschichten sowie der Untergrund/Unterbau des Bauwerks „Straße“ als ein gekoppelt mechanisch-hydraulisch-thermisches System, welches auf Grund der in situ existierenden Temperaturbedingungen instationären Charakter besitzt, zu verstehen. Eine adäquate numerische Modellierung eines solchen Systems ist sowohl ein ambitioniertes als auch notwendiges Ziel, um die Beanspruchungen im Straßenkörper bei unterschiedlichsten Randbedingungen berechnen, verstehen sowie deren mögliche Auswirkungen prognostizieren zu können.

Zu vermuten ist dass die Komplexität der im Rahmen der Modellierung zu beschreibenden, materialspezifischen Phänomene infolge hochzyklischer Beanspruchung zusätzlich erhöht wird.

## Literaturverzeichnis

- ANDERSLAND, O. B./LADANYI, B. (2003)  
Frozen Ground Engineering. Wiley & Sons Verlag
- ARNOLD et al. (2007)  
The effect of grading on the performance of basecourse aggregate.  
Land Transport New Zealand Research Report 325
- BALKE, H. (2014)  
Einführung in die Technische Mechanik.  
3. aktualisierte Auflage, Springer Vieweg
- BARKSDALE, R.D. (1972)  
Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials.  
Proceedings, 3 rd International Conference on Structural Design of  
Asphalt Pavements, London, UK. pp 161-174
- BARKSDALE, R. D./ITANI, S. Y. (1989)  
Influence of aggregate shape on base behavior.  
Transportation Research Record, No. 1227, pp. 173-182
- BECKER, P. (2009)  
Zeit- und spannungspfadabhängiges Verformungsverhalten bei  
Baugruben in weichen Böden.  
Schriftenreihe Geotechnik, Heft 22, Universität Kassel
- BERG, L. et al. (1996)  
Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/Road, Phase 1.  
CRREL, Final Report
- BIRKERT, A. et al. (2013)  
Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile:  
Auslegung von Ziehanlagen. Springer Vieweg
- BISHOP, A. W./HENKEL, D. J. (1964)  
The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test.  
Ed. E. Arnold Ltd. London.
- BOLEY, C. (2012)  
Handbuch Geotechnik. Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen.  
1. Auflage, Vieweg Teubner Verlag
- BRECCIAROLI/KOLISOJA (2006)  
Deformation behaviour of railway embankment materials under  
repeated loading. Literature review. Publications of Finnish  
Rail Administration, A 5/2006

- BÜRCEL, R. et al. (2014)  
Werkstoffmechanik. Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen. 2. überarbeitete Auflage, Springer Vieweg
- BURSTEN, B. E. et al. (2011)  
Chemie. Studieren kompakt. Pearson Studium Verlag
- CHARLEZ, Ph. A. (1997)  
Rock Mechanics. Volume 2, Petroleum Applications, Editions Techniq, Paris
- CHAUVER, E. W. V. (2013)  
Notes on Continuum Mechanics. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences. Springer
- CHEN, W.F./LIU, X. L. (1990)  
Limit Analyses in Soil Mechanics. Elsevier Science Publishers B. V.
- COLLINS, I. F. et al. (1993)  
SHAKEDOWN-Theory and the design of unbound pavements.  
Vol. 2, No. 4, December 1993, Road & Transport Research.
- COLLINS, I. F. et al. (2000)  
Geomechanical Analyses of unbound pavements based on shakedown theory.  
JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOINVIROMENTAL  
ENGENEERING.
- CHUNG, T. J. (2007)  
General Continuum Mechanics. 2. Auflage, Cambridge University Press
- DANKERT, J. (2014)  
Vorlesung Informatik 2.  
Department Maschinenbau und Produktion, HAW Hamburg
- DANKERT, J./DANKERT, H. (2013)  
Technische Mechanik.  
Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik. 7. Auflage, Springer Vieweg
- DAVIS, R. O./SELVADURAI, A. P. S. (1996)  
Elasticity and Geomechanics. Cambridge University Press
- DAWSON, A.R. (1990)  
Introduction to Soils and Granular Materials. Lecture Notes from  
Residential Course, Bituminous Pavements. Materials, Design and  
Evaluation. University of Nottingham, Nottingham, UK
- DAWSON, A. R. et al. (1993)  
Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function  
of condition. Proceedings, European Symposium on Flexible  
Pavements (EUROFLEX), Lisbon, pp. 1/49-1/70

- DAWSON, A. R. et al. (1996)  
Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition. Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp. Euroflex 1993, A. G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 35–44.
- DAWSON, A. R. (2008)  
Water in Road Structures. Movement, Drainage and Effects;  
Springer Science & Business Media
- DAWSON, WELLNER, 1999  
Plastic Behaviour of Granular Materials, Final Report ARC Project 933, University of Nottingham Reference PRG99014, April 1999.
- DOEGE, E./BEHRENS, B.-A. (2010)  
Handbuch der Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen.  
2. Auflage. Springer Heidelberg Dordrecht London New York
- EHLER, C. (1978)  
Grundzüge eines Verfahrens zur Bestimmung des E-Moduls von  
Straßenbaustoffen. Die Straße, Heft 4, S. 115-117
- EKBLAD/ISACSSON (2006)  
Influence of water on resilient properties of coarse granular materials.  
International Journal on Road Materials and Pavement Design, 7(3), 369-404.
- FAROUKI, O. T. (1986)  
Thermal Properties of Soils. Series of Soils. Series of Soil Mechanics Vol. 11
- GE, L. et al. (2009)  
Soil and Rock Instrumentation, Behavior, and Modeling. Geotechnical  
Special Publication No. 194. American Society of Civil Engineers
- GIESECKE, J. et al. (2009)  
Wasserkraftanlagen / Planung, Bau und Betrieb.  
5. aktualisierte u. erweiterte Aufl., Springer Verlag
- GILLOTT; G: E. (2012)  
Clay in Engineering Geology. Elsevier Science Publishers B.V.
- GLEITZ, T. (1996)  
Beitrag zur rechnerischen Erfassung des nichtlinearen Spannungs-  
Verformungsverhaltens ungebundener Tragschichtmaterialien in  
flexiblen Straßenkonstruktionen. Dissertation, TU Dresden, 1996.
- GHADIMI et al. (2014)  
Simulation of Shakedown Behavior in Pavement's Granular Layer.  
IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 7, No. 3

- GOTSCHOL, A. (2002)  
Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung.  
Schriftenreihe Geotechnik, Heft 12, Universität Kassel
- GOTSCHOL, A./KEMPFERT, H.G.(2004)  
Zyklisch viskoelastisch-viskoplastischer Stoffansatz nichtbindiger Böden und Schotter. Bautechnik 81, Ernst&Sohn
- GÜTTLER (1984)  
Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebundenen Mineralstoffen. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau Wasserwesen und Verkehrswesen Ruhr- Universität Bochum, Heft 8
- GUDENFELS, R. (1996)  
Die Alterung von Bahnschotter aus bodenmechanischer Sicht.  
Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der ETH Zürich, Band 209
- HASS, H. (2012)  
North American Tunneling.  
Proceeding. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc.
- HAYNES, J. G./YODER, E. J. (1963)  
Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO Road Test; Highway Research Record, No. 39
- HERLE, I./MASIN, D. (2005)  
Einfluss von bodenmechanischen Aspekten auf numerische Ergebnisse.  
In J. Grabe (Ed.), Veröffentlichungen des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb, TU Hamburg - Harburg, Germany; Heft 10
- HERTZ (1882)  
Journal für reine und angewandte Mathematik; Band 92, S. 156 ff.
- HETTLER (1987)  
Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf.  
ETR 36, S. 399-405
- HORNYCH et al. (1998)  
Influence de l'eau sur la comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées. Symposium international AIPCR sur le drainage des Chaussées, Published by l'AIPCR. Grenade, Espagne, pp 249-257.
- HICKS (1970)  
Factors influencing the resilient properties of granular materials.  
PhD thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, Calif.
- HICKS, R. G./MONISMITH, C. L. (1971)  
Factors influencing the resilient properties of granular materials.  
Hwy. Res. Rec. 345, 15–31.

- HÖLTING, B./COLDEWEY, W. G. (2013)  
Hydrogeologie - Einführung in die allgemeine und angewandte  
Hydrogeologie. 8. Aufl. Springer Verlag
- JESSBERGER, H. L. (1981)  
A state-of-art report. Ground freezing: Mechanical Properties, Processes and  
Design. International Symposium on Ground Freezing. Proceedings, 1980
- JÜTTNER, M. (2011)  
Bodenwasser in seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität.  
GRIN Verlag GmbH
- KHALILI, N. (2014)  
Unsaturated Soils: Research & Applications. Crc Pr Inc Verlag
- KEMPFERT, H. G. et al. (2000)  
Kombiniert zyklische und dynamische Elementversuche zur Beschreibung  
des Kurz- und Langzeitverhaltens von Schotter und granularen Böden.  
In: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und  
Forschungsergebnisse. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und  
Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 32
- KOLYMBAS, D. (1998)  
Bodenmechanik und Grundbau. Springer Verlag
- KOLYMBAS (2011)  
Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau,  
Springer Verlag 2011
- KOLISOJA (1998)  
Large Scale Dynamic Triaxial Tests III. Institute of Foundations and Earth  
Structures, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- KUNA, M. (2010)  
Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen. Finite Elemente in  
der Bruchmechanik. 2. verb. Auflage, Vieweg Teubner
- LANDGRAF, G. (1963)  
Räumliche Probleme der Elastizitätstheorie. Autorisierte ergänzte Ausgabe  
in deutscher Sprache hrsg. von Günther Landgraf.  
Akademie-Verlag. Berlin 1963.
- LESNY, K./RICHWIEN, W.(2004)  
Mindestanforderungen an die Baugrunderkundung. In: 3. Tagung  
Offshore-Windenergie, Hamburg, Germanischer Lloyd, 2004, 29–39
- LEKARP, F./DAWSON, A. (1998)  
Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials.  
Construction and Building Materials, Vol.12, No.1, pp.9-18

- LEKARP, F. et al. (2000/1)  
STATE OF THE ART.I:  
RESILIENT RESPONSE OF UNBOUND  
AGGREGATES. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING
- LEKARP, F. et al. (2000/2)  
STATE OF THE ART.II:  
PERMANENT STRAIN RESPONSE OF UNBOUND AGGREGATES.  
JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING
- LOTTMANN, A. (2003)  
Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden  
im Planumbereich von Verkehrsflächen. Dissertation.  
Technische Universität Cottbus
- MANCUSO, C. et al. (2012)  
Unsaturated Soils: Research and Applications. 2. Aufl. Springer Verlag
- MEY, A./VON WOLFFERSDORF, P.A. (2008)  
Die Bedeutung der Stoffmodelle für dynamische Berechnungen zur  
Standsicherheit von Staudämmen mit der FiniteElement-Methode,  
Kolloquium "Bodenmechanik, Grundbau und bergbauliche Geotechnik"  
anl. 75. Geburtstag Prof. Förster, TU Bergakademie Freiberg,  
Veröffentl. Inst. Geotechnik
- MEYWERT, M. (2007)  
CAE-Methoden in der Fahrzeutechnik. Springer Verlag Berlin Heidelberg
- MONISMITH et al. (1967)  
Prediction of pavement deflections from laboratory tests. Proceedings,  
2nd International conference on the structural design of asphalt pavements,  
Volume 1, pp. 109-140, Ann Arbor, USA
- MOORE et al. (1970)  
A laboratory study of the relation of stress to strain for a crushed limestone  
base material; Research Report 99-5F, Study 2-8-65-99, Texas Transportation  
Institute, Texas A & M University, College Station
- MÖLLER, G. (2013)  
Geotechnik – Bodenmechanik. 2., vollst. überarb. Aufl., Ernst & Sohn
- MÜLLERSCHÖN (2000)  
Spannungs-Verformungsverhalten granularer Materialien am Beispiel von  
Berliner Sand. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Mechanik
- MAGNUSDOTTIR/ERLINGSSON (2002)  
Repeated load triaxial testing for quality assessment of unbound granular base  
course material. Proceedings from the 9<sup>th</sup> Nordic Aggregate Research  
Conference. Reykjavik, Iceland



- NUMRICH, R. (2003)  
Untersuchung zum nichtlinear-elastischen Spannungs-Verformungsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel. Dissertation, TU Dresden
- OERTEL, H./RUCK, S. (2012)  
Bioströmungsmechanik. Grundlagen, Methoden, Phänomene.  
2. überarb. und erw. Aufl., Vieweg Teubner
- PAUTE et al. (1993)  
Repeated Load Triaxial Testing of Granular Materials in the French Network of Laboratories des Ponts et Chaussées. Flexible Pavements.  
Edited by A.G. Correia. Proceedings, European Symposium on Flexible Pavements, Euroflex. pp. 53-64.
- PAPPIN, J. W. (1979)  
Characteristics of a granular material for pavement analysis. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham
- PARAMESWARAN, V. R./JONES, S. J. (1981)  
Triaxial testing of frozen sand. Journal of Glaciology, Vol. 27, No. 95
- POWRIE, W. (2014)  
Soil Mechanics, Concepts and Applications. Third Edition.  
Taylor & Francis Group
- QUECK, U. (1992)  
Grundlagen zur Berechnung der Spannungs-Verformungszustände ungebundener Konstruktionsschichten als Teil flexibler Befestigungen im Straßenbau. Dissertation. Technische Universität Dresden
- RAAD et al. (1992)  
Characterization of saturated granular bases under repeated loads.  
Transp. Res. Rec. 1369, Transportation Research Board,  
Washington, D.C., 73–82
- RACKWITZ (2005)  
Entwicklungen in der Bodenmechanik.  
Bodendynamik und Geotechnik; Springer-Verlag; 2005
- RICHARD, H. A./SANDER, M. (2012)  
Ermüdungsrisse Erkennen - Sicher beurteilen - Vermeiden.  
3., erw. Auflage, Springer Vieweg
- RÖSLER, J. et al. (2012)  
Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 4. Auflage, Springer Vieweg
- SELKE, P. (2013)  
Höhere Festigkeitslehre. Grundlagen und Anwendungen.  
Gruyter de Oldenbourg

- SHARP, R. W./BOOKER, J. R. (1984)  
Shakedown of pavements under moving surface loads. Journal of Transportation Engineering, vol. 110, p. 1
- SHENTON, M. J. (1978)  
Deformation of Railway Ballast under Repeated Loading Conditions. Railroad Track Mechanics and Technology, Pergamon Press, pp. 405-425
- SIMONSEN, E. et al. (2002)  
Resilient Properties of Unbound Road Materials during Seasonal Frost Conditions. Journal of Cold Regions Engineering, Volume 16, Issue 1
- SMITH, W. S./NAIR, K. (1973)  
Development of procedures for characterization of untreated granular base course and asphalt-treated base courses materials. Federal Highway Administration, Washington D.C., Final Report, Report No. FHWA-RD-74-61
- SHIBUYA et al. (1995)  
Strain Rate Effects on Shear Modulus and Damping of Normally Consolidated Clay. Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J, vol. 18, no. 3, 1995
- SRES (2009)  
Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser. Dissertation, ETH Zürich
- STOECKER, T. (2002)  
Zur Modellierung von granularen Materialien bei nichtruhenden Lasteinwirkungen. Dissertation, Universität Kassel
- STUDER, JOST A. et al. (2007)  
Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. 3. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag
- STROPPE, H. (2008)  
Physik für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften. 14., erweiterte Aufl., Carl-Hanser-Verlag
- SZEWZYK, U. et al. (2011)  
Wasser. Chemie, Mikrobiologie und nachhaltige Nutzung. Walter de Gruyter Verlag
- THOM, N. H./BROWN, S. F. (1987)  
Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base. Transp. Res. Rec. 1121, Transportation Research Board, Washington, D.C., 50–56.

- THOM, N. H./BROWN, S. F. (1988)  
The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone; Proceedings, 14th Australian Road Research Board Conference, Part 7, pp. 94-100
- UNOLD, F. (2006)  
Der Gefriersog bei der Bodenfrostung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens. Dissertation.  
Universität der Bundeswehr München
- VAN NIEKERK et al. (1998)  
Estimation of mechanical behaviour of unbound road building materials from physical material properties; Proceedings, 5th International Conference on the bearing Capacity of roads and airfields, R. S. NORDAL and G. RAFSDAL, eds., VOL. 3, pp. 1221-1233
- WANG/MASAD (2007)  
Analyses Of Asphalt Pavement Materials and Systems. Emerging Methods. American Society of Civil Engineers, Virginia
- WEBER, M. (2007)  
Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen.  
Dissertation. ETH Zürich
- WEHNERT, M. (2006)  
Ein Beitrag zur dränierten und undränierten Analyse in der Geotechnik.  
Dissertation. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart
- WELLNER, F. (1993)  
Grundlagen zur Bemessung flexibler Straßenkonstruktionen mit Tragschichten ohne Bindemittel.  
Habilitation, Technische Universität Dresden
- WERKMEISTER, S. (2003)  
Plastisches Verformungsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen. Dissertation. Technische Universität Dresden
- WERKMEISTER, S. (2007)  
Abschätzung des Verformungsverhaltens von niedrig beanspruchten Straßenbefestigungen auf der Grundlage von CAPTIF Rundlaufversuchen in Neuseeland. Habilitation. Technische Universität Dresden
- WELLER, F. (1996)  
Numerische Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler.  
Vieweg Verlag
- WITT, K. J. (Hrsg. 2009)  
Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren.  
7. überarb. u. aktualis. Auflage. Ernst & Sohn Verlag

CAR (2001)

International Center For Aggregates Research. Characterization of unbound granular layers in flexible pavements. Research Report ICAR – 502-3

EA-Pfähle

Empfehlung des Arbeitskreises „Pfähle“  
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., John Wiley & Sons, 2007

EAB (2012)

Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben". 5. Aufl., Wiley & Sons

EUROCODE 7

Geotechnische Bemessung - 2: Erkundung und Untersuchung.  
1. Aufl., vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung, Beuth, 2011

DIN EN 13286-7:2004-04

Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 7:  
Dreiaxialprüfung mit zyklischer Belastung für ungebundene Gemische

FGSV (2010)

Überprüfung und Bewertung der Frostdimensionierung nach RStO.  
Wellner, F.; Kayser, S.; Patzak, J. FGSV-Nr. Heft 1045

## Abbildungsverzeichnis

### Kapitel 1:

Abbildung 1-1: Tagesmitteltemperatur der Luft am Beispiel der Station Aachen im Zeitraum vom 21.12.1996 bis 22.01.1997 .....	3
Abbildung 1-2: Schematische Darstellung der zeitabhängigen vollständigen Durchfrierung der ungebundenen Tragschicht (FSS) .....	3
Abbildung 1-3: Numerisch simulierter Isothermenverlauf innerhalb des Betrachtungszeitraumes .....	3
Abbildung 1-4: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Auftauprozesses der ungebundenen Tragschicht (FSS) – Isothermenschnittpunkt unterhalb des Planums.....	3
Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Isothermenverläufe mit Schnittpunkten innerhalb und unterhalb der FSS .....	3
Abbildung 1-6: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Auftauprozesses der ungebundenen Tragschicht (FSS) – Isothermenschnittpunkt innerhalb der FSS.....	3
Abbildung 1-7: Prinzipielle Untersuchungssystematik .....	5

### Kapitel 2:

Abbildung 2-1: Schematisches Spannungs-Dehnungsdiagramm für: a monotone, b zyklische Belastungen [STUDER, JOST A. et al. (2007)].....	3
Abbildung 2-2: Näherungsweise Einstufung der Beanspruchungsarten nach dem Frequenzbereich [GOTSCHOL, A. (2002)] .....	4
Abbildung 2-3: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der mittleren Spannung sowie der Versuchsdurchführung [LEKARP et al. (2000)].....	7
Abbildung 2-4: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis sowie der Versuchsdurchführung [LEKARP et al. (2000)].....	7
Abbildung 2-5: Schubmodul in Abhängigkeit von der Scherdehnung [MEY, A./VON WOLFFERSDORF, P.A. (2008)] .....	8
Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung der Volumendehnungskurven einer dichten Sandprobe [KOLYMBAS (2011)] .....	9
Abbildung 2-7: Beispielhafte Darstellung der Spannungs-Dehnungslinie einer dichten Sandprobe [KOLYMBAS (2011)] .....	9
Abbildung 2-8: Einfluss des Wassergehaltes auf ungebundene granulare Materialien unterschiedlicher Herkunft [DAWSON, A. R. (2008) mit Verweis auf HORNYCH et al. (1998)] .....	10
Abbildung 2-9: Elastische Materialantwort bei unterschiedlichen Wassergehalten, Einfluss des Wassergehaltes auf ungebundene granulare Materialien [DAWSON, A. R. (2008) mit Verweis auf EKBLAD/ ISACSSON (2006)].....	11

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2-10: Einfluss der Lastwechselzahl und des Spannungsverhältnisses auf die plastische Dehnung [BARKSDALE (1972)] .....	18
Abbildung 2-11: Materialantwortverhalten elastisch-plastischer Strukturen infolge zyklischer Belastung [Collins, I. F. (2000)] .....	20
Abbildung 2-12: Formen des „ratchetings“ [LESNY, K./RICHWIEN, W. (2004)].....	21
Abbildung 2-13: Volumen und Porenzahlentwicklung zyklisch-dynamisch beanspruchter Gleisschotterproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen [GOTSCHOL, A./KEMPFERT, H. G. (2004)] .....	24
Abbildung 2-14: Einfluss der Dränagewirkung auf die bleibende Dehnungsentwicklung [DAWSON (1990)] .....	25
Abbildung 2-15: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Dehnungsakkumulation [YOUNG (1992)] .....	26
Abbildung 2-16: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die die bleibende Dehnungsanteile [GOTSCHOL(2002)] .....	27
Abbildung 2-17: Einfluss der Belastungsfrequenz auf den Kurvenanstieg [GOTSCHOL (2002)] .....	27
Abbildung 2-18: Vergleich zwischen den berechneten hyperbolischen plastischen Dehnungs- Spannungskurven und den Versuchsdaten [aus BRECCIAROLI/KOLISOJA (2006) in BARKSDALE, R. D. (1972)].....	30
Abbildung 2-19: Wassergehalt $w$ bei nichthomogenen Bodenfrost [MÖLLER, G. (2013)] .....	33
Abbildung 2-20: Bodenkörner mit Porenwinkel-wasser [MÖLLER, G. (2013)] .....	35
Abbildung 2-21: Verlauf der Anziehungsspannungen in der diffusen Hülle [MÖLLER, G. (2013)] .....	35
Abbildung 2-22: Qualitativer Temperaturverlauf eines Stoffes in Abhängigkeit von der ihm zugeführten Wärmeenergie [STROPPE, H. (2008)] .....	37
Abbildung 2-23: Abkühlkurve von Wasser unter Normaldruck in Abhängigkeit der abgeführten Energiemenge bzw. der Zeit $t$ [STROPPE, H. (2008)] .....	37
Abbildung 2-24: Frosthebung in einer idealisierten ein-dimensionalen Bodensäule [ANDERSLAND, O. B./LADANYI, B. (2003)] .....	39
Abbildung 2-25: Ungefrorenes Wasser (WU) im Boden für verschiedene Bodenarten (1 Ton, 2 pleistozäner Ton, 3 toniger schwachsandiger Schluff, 4 schwachtoniger schluffiger Sand, 5 Sand) und für verschiedene spezifische Oberflächen $S$ (10 bis 400 $m^2/g$ bei $0^\circ C$ ) [WITT, K. J. (Hrsg. 2009)].....	40
Abbildung 2-26: Druck- und Zugfestigkeit von gefrorenem Sand ( $w=28\%$ ) [nach JESSBERGER, H. L. (1981) aus ZELENNIN et al. (1958)].....	41
Abbildung 2-27: Variation von Scherspannung und Normalspannung [PARAMESWARAN, V. R./ .....	42
Abbildung 2-28: Elastizitätsmodul für New Hampshire Böden als Funktion der Temperatur [SIMONSEN, E. et al. (2002)] .....	43
Abbildung 2-29: Typisches „festgestelltes“ Spannungs-Dehnungs Verhalten vor und nach dem Frost-Tau Zyklus [SIMONSEN, E. et al. (2002)] .....	43

---

Abbildung 2-30: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur (links) sowie der Sättigung (rechts) [BERG, L. et al. (1996)] .....	44
--	----

Kapitel 3:

Abbildung 3-1: Haigh-Westergaard stress space [CHAUVER, E. W. V. (2013)].....	3
Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung verschiedener realisierbarer Spannungspfade (ausgehend von einem isotropen Spannungszustand ) bei triaxialer Beanspruchung .....	7
Abbildung 3-3: Prinzipdarstellung der Spannungspfade bei CCP und VCP Versuchsdurchführung.....	7
Abbildung 3-4: Prinzip Darstellung der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung .....	7
Abbildung 3-5: Prinzipdarstellung der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung im $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm unter Dränierten Bedingungen .....	8
Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung im s-t-Diagramm unter Dränierten Bedingungen .....	8
Abbildung 3-7: Winkel der Scherfuge; Prinzipdarstellung im $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm unter Dränierten Bedingungen.....	10
Abbildung 3-8: Winkel der Scherfuge; Prinzipdarstellung am rotationssymmetrischen Triaxial-Probekörper .....	10
Abbildung 3-9: Abgescherte Triaxialproben a) vor dem Versuch; b) Bruch in einer Bruchfuge; c) Bruch in mehreren Bruchfugen; d) vollständig plastifizierte Probe [BISHOP, A. W./HENKEL, D. J. (1964)].....	10
Abbildung 3-10: Von-Mises-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)]..	12
Abbildung 3-11: Mohr-Coloumb-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)] .....	13
Abbildung 3-12: Drucker-Prager-Fließfläche im Hauptspannungsraum [RUST, W. (2011)] .....	14

Kapitel 4:

Abbildung 4-1: Triaxialprüfstand der TU Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Professur für Straßenbau .....	2
Abbildung 4-2: Anordnung des axialen Messsystems (AMS) und des radialen Messsystemes (RMS) sowie die grundsätzliche Belastungssituation bei „unechter“ triaxialer Belastung...	3
Abbildung 4-3: Korngrößenverteilung des untersuchten 0/45 FSS-Gemisches.....	4
Abbildung 4-4: Polierter Stahlzylinder mit Grundplatte .....	5
Abbildung 4-5: Stahlzylinder und Kunststoffinnenzylinder sowie eingefülltem Untersuchungs-material.....	5
Abbildung 4-6: Stahlzylinder und Kunststoff-innenzylinder mit bis zur oberen Messebene verdichtetem Material und positionierten Magneten .....	5

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 4-7: Ausgeschalter Probekörper mit Kunststoffinnenzylinder.....	5
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Probekörperherstellung.....	6
Abbildung 4-9: Fertiger Probekörper und Latexmembran vor dem Einbau in Triaxialzelle	7
Abbildung 4-10: Fixierter Magnet der oberen Messebene im Probekörper.....	7
Abbildung 4-11: Prinzipdarstellung der Belastung einer Probe im „unechten“ Triaxialversuch (Kompression). Vertikalkraft und Radialdruck (links), Vertikalspannung und Radialspannung (rechts) .....	8
Abbildung 4-12: Axialverformung (Messdaten) bei thermisch unbeeinflusstem Material...	8
Abbildung 4-13: Messdatenauswertung bei thermisch unbeeinflusstem Material.....	8
Abbildung 4-14: Messdaten bei thermisch beeinflusstem Material ( $-T=-10^{\circ}$ ).....	9
Abbildung 4-15: Messdatenauswertung bei thermisch unbeeinflusstem Material.....	9

### Kapitel 5:

Abbildung 5-1: Schematische Darstellung eines Kompressionsspannungspfades bei einer CCP-Testprozedur .....	8
Abbildung 5-2: Schematische Darstellung eines Kompressionsspannungspfades bei einer VCP-Testprozedur .....	8
Abbildung 5-3: Materialantwort (Hystereseschleife) infolge eines Kompressionsspannungspfades bei einer CCP-Testprozedur .....	8
Abbildung 5-4: Materialantwort (Hystereseschleife) infolge eines Kompressionsspannungspfades bei einer VCP-Testprozedur.....	8
Abbildung 5-5: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Deviator und mittlerer Spannung .....	10
Abbildung 5-6: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und $-$ winkel .....	10
Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Spannungspfade sowie der daraus resultierenden funktionalen Abhängigkeit der elastischen Axialdehnung .....	11
Abbildung 5-8: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und $-$ winkel.....	11
Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Spannungs- Dehnungsbeziehung sowie der daraus resultierenden Definition von Elastizitätsmoduln (uniaxial) .....	11
Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Spannungspfade sowie der daraus resultierenden funktionalen Abhängigkeit der elastischen Axialdehnung .....	13
Abbildung 5-11: Beispielhafte Darstellung der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von Deviator und mittlerer Spannung .....	13



Kapitel 6:

Abbildung 6-1: Spannungsabhängige akkumulierte plastische Dehnungen bis Lastwechsel 20.000 (Versuchsreihe A).....	3
Abbildung 6-2: Spannungsabhängige akkumulierte plastische Dehnungen bis Lastwechsel 330.000 (Versuchsreihe A).....	3
Abbildung 6-3: Spannungsabhängige plastische Dehnungsrate über 20.000 Lastzyklen (Versuchsreihe A).....	3
Abbildung 6-4: Spannungsabhängige plastische Dehnungsrate über 330.000 Lastzyklen (Versuchsreihe A).....	3
Abbildung 6-5: Plastische Dehnungsrate in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis nach 20.000 und 330.000 Lastzyklen.....	5
Abbildung 6-6: Spannungsabhängige plastische Dehnungsrate bis Lastwechsel 300.000 (Versuchsreihe A).....	5
Abbildung 6-7: Spannungsabhängige relative Volumenänderung während der ersten 25 Lastwechsel (Versuchsreihe A).....	8
Abbildung 6-8: Spannungsabhängige relative Volumenänderung nach dem 1. Lastwechsel (Versuchs.....	8
Abbildung 6-9: Lastwechselzahl zum Erreichen von 100 % Ausgangsvolumen am Bsp. der Versuch Nr. A-1.3 .....	10
Abbildung 6-10: Lastwechselzahl zum Erreichen von 100 % Ausgangsvolumen in Abh. vom Spannungsverhältnis für Versuchsreihe A .....	10
Abbildung 6-11: elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl und des Spannungsverhältnisses (Versuchsreihe A) .....	11
Abbildung 6-12: Approximation der elastischen Axialdehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl am Beispiel von Versuchsnummer A-1.3 .....	11
Abbildung 6-13: elastische Axialdehnung vs. Volumenverhältnis (Zeitfenster 300.000 Lastzyklen; Versuchsreihe A) .....	12
Abbildung 6-14: Volumendifferenz und relatives Probekörpervolumen nach 300.000 LW in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis (Versuchsreihe A).....	12
Abbildung 6-15: Lastwechselzahl für das Erreichen von 50 % Dehnungsdifferenz der elastischen Axialdehnung am Beispiel von Versuch A-1.3 .....	13
Abbildung 6-16: Lastwechselzahl für das Erreichen von 50 % Dehnungsdifferenz der elastischen Axialdehnung sowie das dazugehörige Volumenverhältnis in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses (Versuchsreihe A) .....	13
Abbildung 6-17: Triaxiale Spannungspfade (VCP) mit Extensions-, Kompressions- und isotroper Materialbeanspruchung .....	16
Abbildung 6-18: Elastische Axialdehnung resultierend aus der Beanspruchung nach Abb. 6-1 .....	16
Abbildung 6-19: Folge triaxialer Spannungspfade (VCP) mit Extensions-, Kompressions- und isotroper Beanspruchung .....	16

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-20: Axiale elastische Dehnungen in Abhängigkeit von Deviator bei unterschiedlichen Radialspannungsamplituden.....	17
Abbildung 6-21: Axiale elastische Dehnungen in Abhängigkeit von Deviator und mittlerer Spannung.....	17
Abbildung 6-22: Multi-Stage Testprozedur mit wiederholter Lastzyklenfolge.....	18
Abbildung 6-23: Spannungs-Dehnungsbeziehung bei wiederholter Lastzyklenfolge.....	18
Abbildung 6-24: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression.....	19
Abbildung 6-25: Vergleich der elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung und der Spannungspfadfolge.....	19
Abbildung 6-26: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression und unterschiedlichem Wassergehalt.....	19
Abbildung 6-27: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Kompression und unterschiedlichem Verdichtungsgrad.....	19
Abbildung 6-28: Abgrenzung der Verformungsarten für den Hauptspannungsraum und gewählten Stoffansatz [STOECKER, T (2002)].....	21
Abbildung 6-29: Darstellung der elastischen Axialgrenzdehnungen in Abhängigkeit der Hauptspannungen.....	24
Abbildung 6-30: Grenzspannungsverhältnisse in Abhängigkeit des Materialzustandes.....	25
Abbildung 6-31: Vergleich der Grenzspannungsverhältnisse zu charakteristischen Bruchspannungsverhältnissen.....	25
Abbildung 6-32: Grenzreibungswinkel $\beta^{\text{GRZ}}$ in Abhängigkeit des Probenwassergehaltes.....	26
Abbildung 6-33: Grenzreibungswinkel $\beta^{\text{GRZ}}$ in Abhängigkeit des Verichtungsgrades... 26	26
Abbildung 6-34: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Axialspannung sowie unterschiedlichen Radialspannungen (Proben-wassergehalt 6,0 M.%).....	28
Abbildung 6-35: Relative Volumenänderung in Abhängigkeit des Wassergehaltes; Vergleich im Rahmen der Vorbelastungsprozedur.....	28

### Kapitel 7:

Abbildung 7-1: Elastische Axialdehnung (Messwerte) in Abhängigkeit von der Vertikalspannung bei unterschiedlichen Radialspannungen.....	3
Abbildung 7-2: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung bei isotroper Beanspruchung im Rahmen der Multi-Stage-Testprozedur ohne und mit Beanspruchungsbegrenzung.....	3
Abbildung 7-3: Elastische Axialdehnung (Messwerte) in Abhängigkeit des Spannungszustandes.....	4
Abbildung 7-4: Elastische Axialdehnung (Messwerte und Approximationsfunktion) in Abhängigkeit des Spannungszustandes.....	4

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7-5: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-6: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 2 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-7: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 100 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-8: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 103 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 5 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	6
Abbildung 7-11: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen (Belastungszyklus I bis IV – Spannungspfad 5) .....	7
Abbildung 7-12: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Probenwassergehalten (Belastungszyklus I bis IV – Spannungspfad 5) .....	7
Abbildung 7-13: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei allen untersuchten Materialzuständen (Lastzyklus I bis IV – Spannungspfad 5).....	7
Abbildung 7-14: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge zwischen 97 % Trockendichte und 5 % Wassergehalt sowie 103 % Trockendichte und 4 % Wassergehalt (Lastzyklus I bis IV – Spannungspfad 5) .....	7
Abbildung 7-15: Isotrope elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung sowie dem Verdichtungsgrad (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 1) ...	8
Abbildung 7-16: Isotrope elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der mittleren Spannung sowie dem Probenwassergehalt (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 1)	8
Abbildung 7-17: Deviatorische elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator sowie dem Verdichtungsgrad (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 5) .....	8
Abbildung 7-18: Deviatorische elastische Axialdehnung in Abhängigkeit vom Deviator sowie dem Probenwassergehalt (Belastungszyklus I bis IV - Spannungspfad 5).....	8
Abbildung 7-19: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III).....	9
Abbildung 7-20: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III).....	9
Abbildung 7-21: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III) .....	9
Abbildung 7-22: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 5 – Belastungszyklus III) .....	9

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7-23: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kompressionsspannungspfade sowie die daraus resultierenden gemessenen und approximierten elastischen Axialdehnungen ( $\sigma_{11} - \varepsilon_{11\_el}$ Ebene).....	11
Abbildung 7-24: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Trockendichte (oben); Axiale Steifigkeit bei 4% Wassergehalt und 97 % Trockendichte (unten).....	11
Abbildung 7-25: Steifigkeitsmodul bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad .....	12
Abbildung 7-26: Steifigkeitsmodul bei 2% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad .....	12
Abbildung 7-27: Steifigkeitsmodul bei 4% Wassergehalt und 100% Verdichtungsgrad ...	12
Abbildung 7-28: Steifigkeitsmodul bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad .....	12
Abbildung 7-29: Steifigkeitsmodul bei 4 % Wassergehalt und 103 % Verdichtungsgrad .	12
Abbildung 7-30: Steifigkeitsmodul bei 5 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad ...	12
Abbildung 7-31: Normiertes Steifigkeitsmodulverhältnis in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad bei ausgesuchten Beanspruchungszuständen.....	13
Abbildung 7-32: Normiertes Steifigkeitsmodulverhältnis in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei ausgesuchten Beanspruchungszuständen.....	13
Abbildung 7-33: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und definierter Radialspannungsamplitude am Beispiel einer Probe KTS-97-02 .....	14
Abbildung 7-34: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und definierter Radialspannungsamplitude am Beispiel einer Probe KTS-103-04 .....	14
Abbildung 7-35: Querdehnzahl in Abhängigkeit von Spannungsverhältnis und Radialspannung am Beispiel einer Probe KTS-97-02.....	15
Abbildung 7-36: Korrelation zwischen Steifigkeitsmodul und Querdehnzahl sowie unterschiedlichen Verdichtungsgraden.....	16
Abbildung 7-37: Korrelation zwischen Steifigkeitsmodul und Querdehnzahl sowie unterschiedlichen Verdichtungsgraden.....	16
Abbildung 7-38: Korrelation zwischen Steifigkeitsmodul und Querdehnzahl sowie unterschiedlichen Wassergehalten (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus II).....	16
Abbildung 7-39: Korrelation zwischen Steifigkeitsmodul und Querdehnzahl sowie unterschiedlichen Wassergehalten (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus IV) .....	16

### Kapitel 8:

Abbildung 8-1: Position des Kabelfühlers im Probekörper einschließlich der Kabelführung innerhalb der Zelle.....	2
Abbildung 8-2: Probekörper mit Latexmembran und Kabelfühler .....	2
Abbildung 8-3: Tempverläufe in Kammer, Zelle und Probekörperkern während der Abkühl- und Auftauphase (Beispiel KTS 97-02, $\Delta T=40$ K).....	3
Abbildung 8-4: Probekörperkerntemperatur während des Phasenüberganges bei Abkühl- und Auftauphase (Beispiel KTS 97-02, $\Delta T=40$ K) normierte Zeit bei 0°C .....	4

---

Abbildung 8-5: Einfluss des Wassergehaltes auf die Probekörperkerntemperatur (Abkühlphase) .....	5
Abbildung 8-6: Einfluss des Temperaturgradienten auf die Probekörperkerntemperatur (Abkühlphase) .....	6
Abbildung 8-7: Elastische Axialdehnung und Probekörperkerntemperatur in Abhängigkeit von der Zeit während der Abkühlphase (Beispiel KTS 97-04).....	7
Abbildung 8-8: Elastische Axialdehnung und Probekörperkerntemperatur in Abhängigkeit von der Zeit während der Erwärmungsphase (Beispiel KTS 97-04) .....	7
Abbildung 8-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad ( $T = 20\text{ °C}$ ).....	8
Abbildung 8-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4% Wassergehalt und 97% Verdichtungsgrad ( $T = -20\text{ °C}$ ) .....	8
Abbildung 8-11: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad ( $T_{\text{Probekörperkern}} = -1,31\text{ bis } -1,41\text{ °C}$ ) .....	9
Abbildung 8-12: Probekörperkern- und Zelltemperatur in Abhängigkeit von der Zeit einschl. Beginn, Ende und Dauer der Multi-Stage-Testprozedur .....	9
Abbildung 8-13: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T=20\text{K}$ , $w = 4\text{ %}$ ).....	11
Abbildung 8-14: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase im Temperaturbereich zwischen $+0,5\text{ °C}$ und .....	11
Abbildung 8-15: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20\text{K}$ , $w=4\text{ %}$ ) .....	11
Abbildung 8-16: Messwerte und Splineapproximation der Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase im Temperaturbereich zwischen $-3,0\text{ °C}$ und $+0,5\text{ °C}$ ( $\Delta T = 20\text{K}$ , $w = 4\text{ %}$ ).....	11
Abbildung 8-17: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase ( $\Delta T = 20\text{ K}$ , $w = 4\text{ %}$ ).....	12
Abbildung 8-18: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20\text{ K}$ , $w = 4\text{ %}$ ) .....	12
Abbildung 8-19: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase (KTS 97-04) .....	16
Abbildung 8-20: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase im Kerntemperaturbereich von $+2\text{ °C}$ bis $-2\text{ °C}$ (KTS 97-04).....	16
Abbildung 8-21: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase (KTS 97-04).....	16
Abbildung 8-22: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von Zeit und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase im Kerntemperaturbereich von $-0,5\text{ °C}$ bis $-5\text{ °C}$ (KTS 97-04).....	16

Kapitel 9:

Abbildung 9-1: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-2: Elastische Axialdehnung bei 2 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-3: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 100 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-4: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-5: Elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 103 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-6: Elastische Axialdehnung bei 5 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad .....	3
Abbildung 9-7: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen und konstantem Wassergehalt.....	4
Abbildung 9-8: Normiertes Dehnungsverhältnis in Abhängigkeit von der Spannungspfadlänge bei gleichem Verdichtungsverhältnis und unterschiedlichem Wassergehalt.....	4
Abbildung 9-9: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III) .....	5
Abbildung 9-10: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III) .....	5
Abbildung 9-11: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der axialen Gesamtdehnung bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III) .....	5
Abbildung 9-12: Dehnungsverhältnis von isotroper bzw. deviatorischer Dehnung zur axialen Gesamtdehnung in Abhängigkeit von der spannungspfadlänge bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus III) .....	5
Abbildung 9-13: Vergleich elastischer Axialdehnungen aller untersuchter Materialzustände bei + 10 °C (Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus IV ) und – 10 °C (Spannungspfade 1 bis 7 – Lastzyklus I) .....	6
Abbildung 9-14: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von $\sigma_{11}$ und $\sigma_{22/33}$ am Beispiel der Materialprobe KTS 103-04.....	8
Abbildung 9-15: Prinzipdarstellung der Spannungspfade sowie der elastische Axialdehnung bei Extensions- und Kompressionsbeanspruchung am Beispiel einer Materialprobe KTS 97-04 .....	8
Abbildung 9-16: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von $\sigma_{11}$ und $\sigma_{22/33}$ am Beispiel der Materialprobe KTS 97-02.....	8

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 9-17: Steifigkeitsmodul bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden und konstantem Wassergehalt .....	9
Abbildung 9-18: Steifigkeitsmodul bei unterschiedlichen Wassergehalten und konstantem Verdichtungsgrad .....	9
Abbildung 9-19: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad und konstantem Wassergehalt.....	9
Abbildung 9-20: Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Wassergehalt und konstantem Verdichtungsgrad .....	9

### Kapitel 10:

Abbildung 10-1: Elastischer Axialdehnungen in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und Temperatur während des Phasenübergangs von Wasser (Abkühlphase); Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus III .....	4
Abbildung 10-2: Elastischer Axialdehnungen in Abhängigkeit von Spannungspfadlänge und Temperatur während des Phasenübergangs von Wasser (Erwärmungsphase); Spannungspfade 1 bis 5 – Lastzyklus III.....	4
Abbildung 10-3: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III).....	5
Abbildung 10-4: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III).....	5
Abbildung 10-5: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III).....	5
Abbildung 10-6: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur während der Abkühlphase bei unterschiedlichem Probenwassergehalt (Spannungspfad 5 – Belastungszyklus III).....	5
Abbildung 10-7: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-F1 (Abkühlphase) .....	6
Abbildung 10-8: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-T1 (Erwärmungsphase).....	6
Abbildung 10-9: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-F3 (Abkühlphase) .....	6
Abbildung 10-10: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-T3 (Erwärmungsphase).....	6
Abbildung 10-11: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-F10 (Abkühlphase) .....	7
Abbildung 10-12: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad; Prüfzeitpunkt TP-T10 (Erwärmungsphase).....	7

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 10-13: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad bei einer Probekörperkerntemperatur von -1,51 °C (TP-F10 Abkühlphase).....	8
Abbildung 10-14: Spannungsabhängige elastische Axialdehnung bei 4 % Wassergehalt und 97 % Verdichtungsgrad bei einer Probekörperkerntemperatur von -1,50 °C (TP-T4 Erwärmungsphase) .....	8
Abbildung 10-15: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von $\sigma_{11}$ und $\sigma_{22/33}$ am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04 .....	9
Abbildung 10-16: Prinzipdarstellung der Spannungspfade sowie der elastische Axialdehnung am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) und TP-F3 (-1,025 °C) am Beispiel einer Materialprobe KTS 97-04.....	9
Abbildung 10-17: Elastische Axialdehnung in Abhängigkeit von $\sigma_{11}$ und $\sigma_{22/33}$ am Prüfzeitpunkt TP-F3 (-1,025 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04 .....	9
Abbildung 10-18: Steifigkeitsmodul am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04.....	10
Abbildung 10-19: Querdehnzahl am Prüfzeitpunkt TP-F1 (-0,219 °C) am Beispiel der Materialprobe KTS 97-04.....	10
Abbildung 10-20: Steifigkeitsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Verdichtungsgraden.....	11
Abbildung 10-21: Steifigkeitsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Wassergehalten.....	11
Abbildung 10-22: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Verdichtungsgraden.....	12
Abbildung 10-23: Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur und unterschiedlichen Wassergehalten.....	12



## Tabellenverzeichnis

### Kapitel 8:

Tabelle 8-1: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ , $w = 4 \text{ \%}$ ).....	12
Tabelle 8-2: Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ , $w = 4 \text{ \%}$ ) .....	12
Tabelle 8-3: Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ , $w = 4 \text{ \%}$ ) (links), Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T = 20 \text{ K}$ , $w = 4 \text{ \%}$ ) (rechts) .....	13

### **Anlagenverzeichnis:**

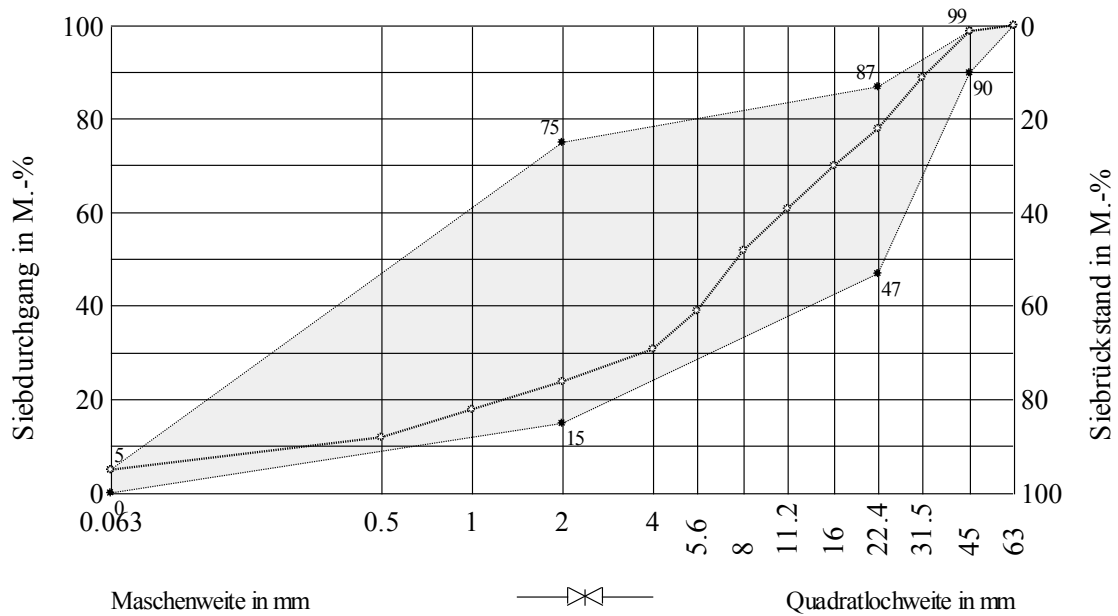
- A. KGV-Probenmaterial**
- B. Probekörperherstellung**
- C. Interpolation der Kerntemperaturverläufe  
Koeffizientenmatrizen der Spline-Funktionen  
Prüfzeitpunkte**
- D. Übersicht der Versuchsdaten- Long Term-Versuche  
(Versuchsreihe A, B und C)**
- E. Relative Volumenänderung in Abh. von LW-Zahl und Spannungsverhältnis  
Long Term-Versuche (Versuchsreihe A, B und C)**
- F. Übersicht der Versuchsdaten - Festlegung der Grenzspannungsverhältnisse**
- G. Übersicht der Spannungspfade (zu Anlage G und H)**
- H. Übersicht der Versuchsdaten - Multi-Stage-Versuche**
  - ohne thermische Beeinflussung
  - mit thermischer Beeinflussung (quasi-vollständiges Durchfrieren)
  - mit thermischer Beeinflussung (Phasenübergang - Abkühlung/Erwärmung)

## Korngrößenverteilung



Anlage – A

Baustoffgemisch [mm] Prüfsieb [mm]	0/45		
	Ist	Soll	
		FSS 0/45 (TL SoB-StB)	
	Durchgang [M.-%]		
63		100	
56	100		
45	99	90-99	
31,5	89		
22,4	78	47-87	
16	70		
11,2	61		
8	52		
5,6	39		
4	31		
2	24	15-75	
1	18		
0,5	12		
≤ 0,063	5,0	≤ 5	



## Probekörperherstellung



Anlage - B



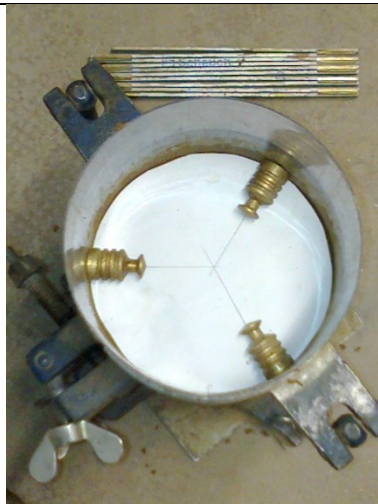
Polierter Stahlzylinder mit Grundplatte



Lagenweise  
Verdichtung

Materialeinbringung

und



Positionierung der Magnete des Axialmesssystems



Fertig hergestellter, eingeschalteter Probekörper



Probekörper für triaxiale Prüfung mit Magneten in Latexmembran



Probekörper für Temperaturmessungen mit Messfühler und Latexmembran



Interpolation der Kerntemperaturverläufe mit natürlichen  
kubischen Splines

Koeffizientenmatrizen

Prüfzeitpunkte

Grundlage: für  $T_i=f(t_i)$  gilt

$$t_0 < t_1 < \dots < t_n$$

### Interpolationsansatz

$$S_i(t) = a_{11} + b_{11} \cdot (t_0 - t_i) + c_{11} \cdot (t_0 - t_i)^2 + d_{11} \cdot (t_0 - t_i)^3$$

mit dem Intervall  $[t_i, t_{i+1}]$  für jedes  $S_i(t)$

Randbedingungen

$$S'_i(t_{i+1}) = S'_{i+1}(t_{i+1})$$

$$S''_i(t_{i+1}) = S''_{i+1}(t_{i+1})$$

$$S''(t_0) = S''(t_n) = 0$$

$$a_{11} = S''(t_n) = 0$$

### Koeffizientenberechnung

$a_{11}$  bis  $d_{11}$  für jedes  $S_i(t)$

$$a_{11} = y_i$$

$$b_{11} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{y''_{i+1} + 2 \cdot y''_i}{6} \cdot h_i$$

$$c_{11} = \frac{y''_i}{2}$$

$$d_{11} = \frac{y''_{i+1} - y''_i}{6 \cdot h_i}$$

mit:

$$y_{i+1} = S_i(t_{i+1}) = d_i \cdot h_i^3 + c_i \cdot h_i^2 + b_i \cdot h_i + a_i$$

## Anlage - C

---

$$h_i = t_{i+1} - t_i$$

$$h_i = t_{i+1} - t_i$$

Gleichungssystem zur Bestimmung der 2. Ableitung  $y_1''$  bis  $y_n''$ .

$$\begin{pmatrix} 2 & q_0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1 & 2 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 2 & q_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & p_{n-1} & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1'' \\ y_2'' \\ \vdots \\ y_n'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 - p_0 \cdot y_0'' \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{n-1} - q_{n-1} \cdot y_{n+1}'' \end{pmatrix}$$

**97 % Verdichtungsgrad; 2 % Wassergehalt**

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1	1,00	10,22305685	-0,00953703	0,00000000	-0,00001513
2	10	1,00	10,12619735	-0,01321243	-0,00040838	-0,00003073
3	30	1,00	9,45272691	-0,06642816	-0,00225241	0,00001858
4	50	1,00	7,37181765	-0,13423190	-0,00113778	0,00002613
5	70	1,00	4,44107398	-0,14839218	0,00042976	0,00000717
6	100	1,00	0,56975170	-0,10324081	0,00107528	0,00000837
7	112	1,00	-0,49983464	-0,07381834	0,00137659	0,00003496
8	120	1,00	-0,98438002	-0,04508056	0,00221563	-0,00003712
9	130	1,00	-1,25074364	-0,01190427	0,00110200	-0,00003636
10	140	1,00	-1,29595041	-0,00077348	0,00001108	-0,00000193
11	160	1,00	-1,32239669	-0,00264157	-0,00010448	-0,00003024
12	170	1,00	-1,38950387	-0,01380416	-0,00101177	-0,00003392
13	180	1,00	-1,66264463	-0,04421615	-0,00202942	0,00004103
14	200	1,00	-3,03049535	-0,07615681	0,00043239	-0,00000156
15	250	1,00	-5,95190074	-0,04459026	0,00019894	-0,00000039
16	340	1,00	-8,63545371	-0,01817581	0,00009455	-0,00000021
17	420	1,00	-9,59347026	-0,00713835	0,00004341	-0,00000016
18	510	1,00	-10,00148724	-0,01961076	0,00000000	0,00000000
19						
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1182,00	1182,00	-10,24082569	-0,01151271	0,00000000	0,00008041
2	1200,00	1182,00	-9,97909087	0,06664790	0,00434226	-0,00003170
3	1210,00	1182,00	-8,91008234	0,14398420	0,00339137	-0,00014328
4	1220,00	1182,00	-7,27437963	0,16882866	-0,00090693	-0,00001490
5	1240,00	1182,00	-4,37975159	0,11467545	-0,00180073	0,00001469
6	1255,00	1182,00	-3,01520613	0,07056916	-0,00113969	0,00000804
7	1275,00	1182,00	-1,99537165	0,03463060	-0,00065724	0,00000588
8	1295,00	1182,00	-1,51859478	0,01540013	-0,00030428	0,00000899
9	1305,00	1182,00	-1,38603298	0,01201112	-0,00003462	0,00001640
10	1310,00	1182,00	-1,32479339	0,01289461	0,00021132	0,00009121
11	1315,00	1182,00	-1,24363574	0,02184879	0,00157952	0,00032154
12	1320,00	1182,00	-1,05471074	0,06175980	0,00640268	0,00067023
13	1325,00	1182,00	-0,50206597	0,17605386	0,01645613	-0,00177603
14	1330,00	1182,00	0,56760296	0,20741297	-0,01018431	0,00032463
15	1340,00	1182,00	1,94793317	0,10111625	-0,00044536	-0,00001423
16	1350,00	1182,00	2,90032974	0,08794008	-0,00087226	0,00014538
17	1352,00	1182,00	3,07388387	0,00227358	0,00000000	0,00000000
18						
19						
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase

Anlage - C

**97 % Verdichtungsgrad; 4 % Wassergehalt**

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1,00	1,00	9,88966942	-0,00007584	0,00000000	-0,00002982
2	26,00	1,00	9,42190083	-0,05598055	-0,00223619	0,00001784
3	46,00	1,00	7,55049587	-0,12402589	-0,00116608	0,00002730
4	71,00	1,00	4,14760331	-0,13114335	0,00088138	-0,00000209
5	106,00	1,00	0,54760331	-0,07713306	0,00066177	0,00000918
6	120,00	1,00	-0,37735537	-0,05320410	0,00104744	-0,00000909
7	135,00	1,00	-0,97041322	-0,02791498	0,00063850	-0,00000321
8	145,00	1,00	-1,18892562	-0,01610876	0,00054212	-0,00000188
9	155,00	1,00	-1,29768595	-0,00583181	0,00048557	-0,00001262
10	170,00	1,00	-1,31851240	0,00021474	-0,00008247	0,00000238
11	190,00	1,00	-1,32818182	-0,00023051	0,00006021	-0,00002942
12	200,00	1,00	-1,35388430	-0,00785178	-0,00082233	-0,00008675
13	205,00	1,00	-1,42454545	-0,02258148	-0,00212361	0,00004760
14	225,00	1,00	-2,34479339	-0,05040208	0,00073258	-0,00001069
15	246,00	1,00	-3,17917355	-0,03377714	0,00005909	-0,00000014
16	321,00	1,00	-5,44057851	-0,02733341	0,00002683	0,00000008
17	471,00	1,00	-8,67793388	-0,01410478	0,00006136	-0,00000010
18	671,00	1,00	-9,82578512	-0,00128040	0,00000276	0,00000000
19	867,00	1,00	-10,00603306	-0,01154098	0,00000000	0,00000000
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase

lfd. Nr.	$t_i$ [min]	$t_0$ [min]	$a_{11}$	$b_{11}$	$c_{11}$	$d_{11}$
1	1026,00	1026,00	-10,01512397	0,00144085	0,00000000	-0,00000591
2	1040,00	1026,00	-10,01115702	-0,00203165	-0,00024804	0,00012045
3	1055,00	1026,00	-9,69090909	0,07183341	0,00517237	-0,00008729
4	1070,00	1026,00	-7,74421488	0,16808643	0,00124450	-0,00007554
5	1085,00	1026,00	-5,19785124	0,15443244	-0,00215476	0,00001000
6	1102,00	1026,00	-3,14611570	0,08983702	-0,00164497	0,00001096
7	1120,00	1026,00	-1,99809917	0,04127151	-0,00105311	0,00001292
8	1140,00	1026,00	-1,49057851	0,01464737	-0,00027809	0,00000266
9	1160,00	1026,00	-1,28760331	0,00671340	-0,00011861	0,00000227
10	1180,00	1026,00	-1,18264463	0,00468912	0,00001739	0,00000195
11	1190,00	1026,00	-1,13206612	0,00562140	0,00007584	0,00005551
12	1195,00	1026,00	-1,09512397	0,01054332	0,00090855	-0,00018625
13	1200,00	1026,00	-1,04297521	0,00565987	-0,00188524	0,00127264
14	1205,00	1026,00	-0,90272727	0,08225522	0,01720431	-0,00159851
15	1210,00	1026,00	-0,26115702	0,13441015	-0,00677332	0,00029862
16	1217,00	1026,00	0,45024793	0,08348081	-0,00050229	0,00000273
17	1230,00	1026,00	1,45661157	0,07180597	-0,00039577	0,00000507
18	1256,00	1026,00	3,14520661	0,00250415	0,00000000	0,00000000
19						
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase

Anlage - C

**97 % Verdichtungsgrad; 5 % Wassergehalt**

1	1,00	1,00	9,88966942	0,00228526	0,00000000	-0,00003359
2	26,00	1,00	9,42190083	-0,06070275	-0,00251952	0,00004381
3	46,00	1,00	7,55049587	-0,10891485	0,00010891	-0,00000865
4	76,00	1,00	4,14760331	-0,12572700	-0,00066932	0,00002691
5	106,00	1,00	0,50000000	-0,09322675	0,00175266	-0,00001397
6	120,00	1,00	-0,50000000	-0,05236948	0,00116571	-0,00000792
7	135,00	1,00	-1,05000000	-0,02274676	0,00080913	-0,00001036
8	163,00	1,00	-1,28000000	-0,00180507	-0,00006122	0,00000438
9	188,00	1,00	-1,29500000	0,00334053	0,00026704	-0,00001827
10	213,00	1,00	-1,33000000	-0,01755705	-0,00110294	0,00001230
11	228,00	1,00	-1,80000000	-0,04234175	-0,00054937	0,00001546
12	246,00	1,00	-2,65000000	-0,04709449	0,00028533	-0,00000109
13	330,00	1,00	-5,24057851	-0,02229937	0,00000985	0,00000007
14	490,00	1,00	-8,27793388	-0,01392774	0,00004247	-0,00000005
15	720,00	1,00	-9,82578512	-0,00210249	0,00000894	-0,00000002
16	867,00	1,00	-10,00603306	-0,01154098	0,00000000	0,00000000
17						
18						
19						
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Abkühlphase

1	1026	1026	-10,01512397	-0,00708049	0,00000000	0,00002019
2	1045	1026	-10,01115702	0,01478735	0,00115094	0,00005728
3	1055	1026	-9,69090909	0,05499030	0,00286936	-0,00003761
4	1075	1026	-7,74421488	0,12463642	0,00061295	-0,00002394
5	1095	1026	-5,19785124	0,12042269	-0,00082364	-0,00000341
6	1115	1026	-3,14611570	0,08338768	-0,00102811	-0,00000340
7	1133	1026	-1,99809917	0,04306679	-0,00121194	0,00001637
8	1153	1026	-1,49057851	0,01423324	-0,00022974	0,00000128
9	1173	1026	-1,28760331	0,00657465	-0,00015319	0,00000434
10	1193	1026	-1,18264463	0,00565826	0,00010737	-0,00001674
11	1203	1026	-1,13206612	0,00278334	-0,00039486	0,00002112
12	1220	1026	-1,09512397	0,00766516	0,00068203	-0,00002582
13	1225	1026	-1,04297521	0,01254880	0,00029470	0,00056109
14	1230	1026	-0,90272727	0,05757765	0,00871107	-0,00054903
15	1237	1026	-0,26115702	0,09882589	-0,00281846	0,00006895
16	1246	1026	0,45024793	0,06484937	-0,00095671	0,00001744
17	1265	1026	1,45661157	0,04737822	0,00003717	-0,00000035
18	1300	1026	3,14520661	0,00241939	0,00000000	0,00000000
19						
20						

Koeffizientenmatrix der Spline-Funktion für die Approximation der Erwärmungsphase

## Anlage - C

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1,00	10,22	A
2	117,7500	-0,88	TP-F1
3	127,7500	-1,22	TP-F2
4	137,7500	-1,29	TP-F3
5	147,7500	-1,30	TP-F4
6	157,7500	-1,32	TP-F5
7	167,7500	-1,37	TP-F6
8	177,7500	-1,59	TP-F7
9	187,7500	-2,11	TP-F8
10	197,7500	-2,88	TP-F9
11	207,7500	-3,56	TP-F10
12	---	---	---

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=2\%$ )

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1045,00	-10,24	B
2	1109,0000	-4,99	TP-T1
3	1119,0000	-3,85	TP-T2
4	1129,0000	-3,02	TP-T3
5	1139,0000	-2,41	TP-T4
6	1149,0000	-2,00	TP-T5
7	1159,0000	-1,71	TP-T6
8	1169,0000	-1,52	TP-T7
9	1179,0000	-1,39	TP-T8
10	1189,0000	-1,24	TP-T9
11	1199,0000	-0,50	TP-T10
12	1265,4500	5,44	C

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=2\%$ )

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1,00	9,890	A
2	117,75	-0,219	TP-F1
3	127,75	-0,696	TP-F2
4	137,75	-1,025	TP-F3
5	147,75	-1,225	TP-F4
6	157,75	-1,308	TP-F5
7	167,75	-1,313	TP-F6
8	177,75	-1,317	TP-F7
9	187,75	-1,325	TP-F8
10	197,75	-1,329	TP-F9
11	207,75	-1,511	TP-F10
12	---	---	---

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=4\%$ )

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1045,00	-10,00	B
2	1109,00	-2,59	TP-T1
3	1119,00	-2,04	TP-T2
4	1129,00	-1,72	TP-T3
5	1139,00	-1,50	TP-T4
6	1149,00	-1,37	TP-T5
7	1159,00	-1,29	TP-T6
8	1169,00	-1,23	TP-T7
9	1179,00	-1,19	TP-T8
10	1189,00	-1,13	TP-T9
11	1199,00	-1,06	TP-T10
12	1265,4500	3,73	C

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=4\%$ )

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1,00	9,89	A
2	117,7500	-0,11	TP-F1
3	127,7500	-0,61	TP-F2
4	137,7500	-0,94	TP-F3
5	147,7500	-1,14	TP-F4
6	157,7500	-1,27	TP-F5
7	167,7500	-1,28	TP-F6
8	177,7500	-1,30	TP-F7
9	187,7500	-1,31	TP-F8
10	197,7500	-1,28	TP-F9
11	207,7500	-1,25	TP-F10
12	---	---	---

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Abkühlphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=5\%$ )

lfd. Nr.	t	T	Nr.-Prüfpunkt
[-]	[min]	[°C]	[-]
1	1045,00	-10,04	B
2	1109,0000	-3,76	TP-T1
3	1119,0000	-3,03	TP-T2
4	1129,0000	-2,28	TP-T3
5	1139,0000	-1,80	TP-T4
6	1149,0000	-1,60	TP-T5
7	1159,0000	-1,43	TP-T6
8	1169,0000	-1,32	TP-T7
9	1179,0000	-1,27	TP-T8
10	1189,0000	-1,21	TP-T9
11	1199,0000	-1,15	TP-T10
12	1265,4500	1,43	C

Prüfzeitpunkt und Probekörperkerntemperatur während der Erwärmungsphase ( $\Delta T=20K$ ,  $w=5\%$ )

Übersicht der Versuchsdaten- Long Term-Versuche  
(Versuchsreihe A, B und C)



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS - Long Term

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

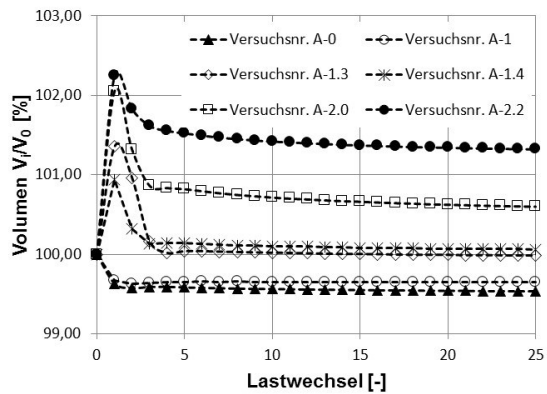
/

Verdichtungsgrad: D<sub>Pr</sub> [%] 97

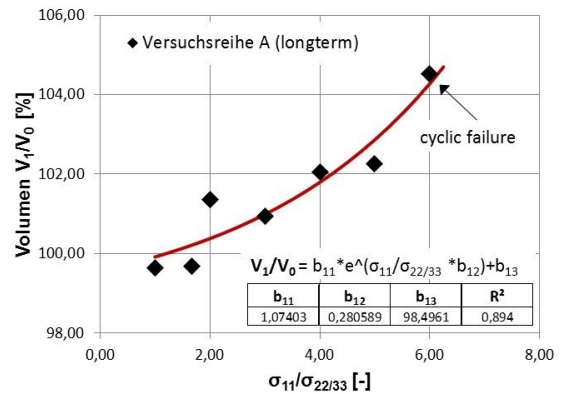
Nr. Versuchsreihe	Nr. Versuch	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]
A	A-0 (isotrop)	0,134	0,120	1,113	0,150	0,150	1,000	0,014	0,125	0,109
	A-1.1	0,232	0,110	2,104	0,250	0,150	1,667	0,122	0,151	0,807
	A-1.3	0,304	0,124	2,455	0,300	0,150	2,000	0,180	0,184	0,980
	A-1.4	0,458	0,131	3,497	0,450	0,150	3,000	0,327	0,240	1,363
	A-2.0	0,609	0,126	4,850	0,600	0,150	4,000	0,484	0,287	1,686
	A-2.2	0,759	0,130	5,824	0,750	0,150	5,000	0,629	0,340	1,850
	A-2.3	0,902	0,124	7,257	0,900	0,150	6,000	0,778	0,383	2,028
B	B-0 (isotrop)	0,232	0,237	0,982	0,225	0,225	1,000	-0,004	0,235	-0,018
	B-1.1	0,378	0,191	1,979	0,375	0,225	1,667	0,187	0,253	0,738
	B-1.3	0,456	0,192	2,381	0,450	0,225	2,000	0,265	0,280	0,946
	B-1.4	0,685	0,204	3,366	0,675	0,225	3,000	0,481	0,364	1,323
	B-2.0	0,909	0,200	4,541	0,900	0,225	4,000	0,708	0,436	1,624
C	C-0 (isotrop)	0,305	0,290	1,050	0,300	0,300	1,000	0,015	0,295	0,050
	C-1	0,495	0,284	1,741	0,500	0,300	1,667	0,211	0,355	0,594
	C-1.3	0,733	0,292	2,511	0,750	0,300	2,500	0,441	0,439	1,005
	C-1.4	0,962	0,282	3,417	0,975	0,300	3,250	0,680	0,508	1,339
	C-1.5	o. A.			1,125	0,300	3,750	o. A.		
	C-1.6	1,431	0,289	4,952	1,500	0,300	5,000	1,142	0,670	1,705

Relative Volumenänderung in Abh. von LW-Zahl und  
Spannungsverhältnis  
Long Term-Versuche (Versuchsreihe A, B und C)

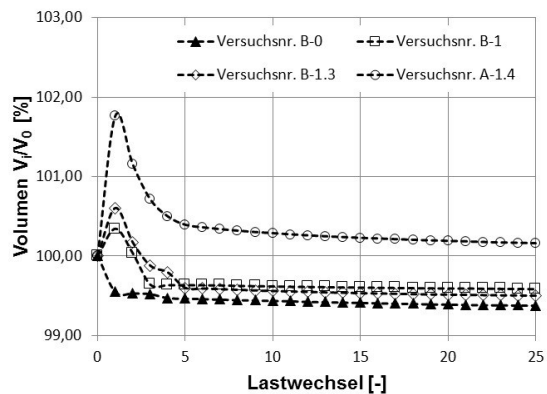
# Anlage – E



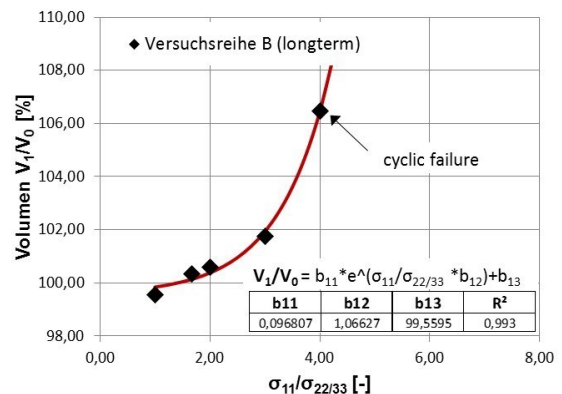
Spannungsabhängige relative Volumenänderung während der ersten 25 Lastwechsel (Versuchsreihe A)



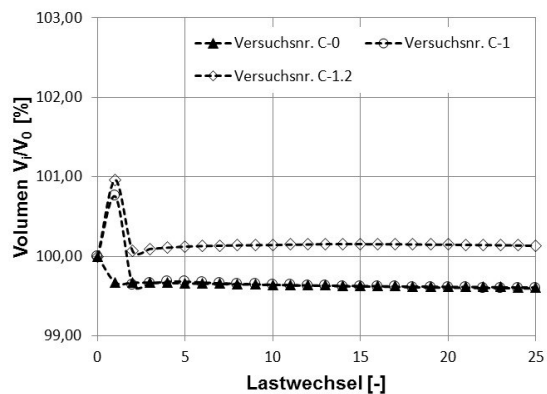
Spannungsabhängige relative Volumenänderung nach dem 1. Lastwechsel (Versuchsreihe A)



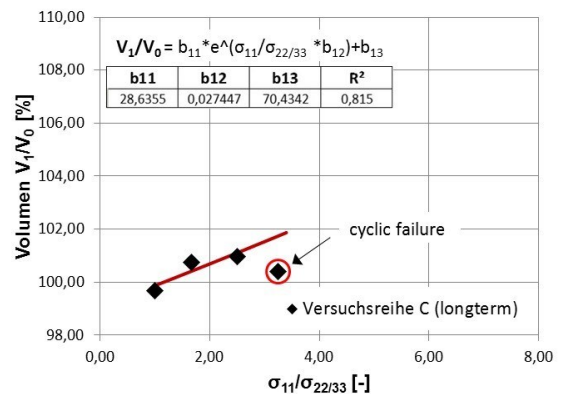
Spannungsabhängige relative Volumenänderung während der ersten 25 Lastwechsel (Versuchsreihe B)



Spannungsabhängige relative Volumenänderung nach dem 1. Lastwechsel (Versuchsreihe B)

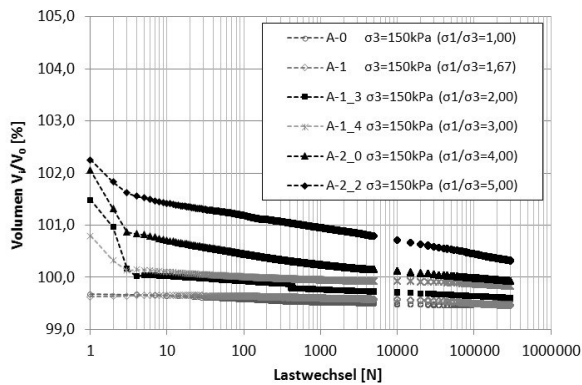


Spannungsabhängige relative Volumenänderung während der ersten 25 Lastwechsel (Versuchsreihe C)

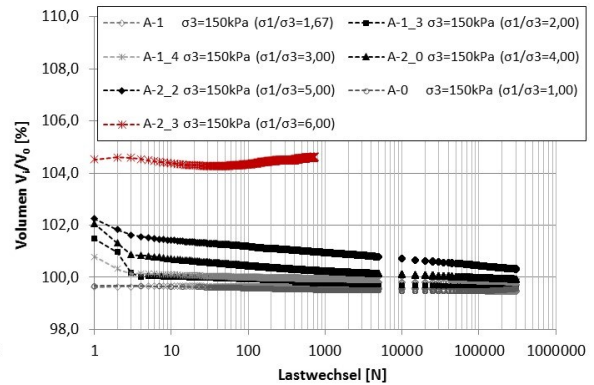


Spannungsabhängige relative Volumenänderung nach dem 1. Lastwechsel (Versuchsreihe C)

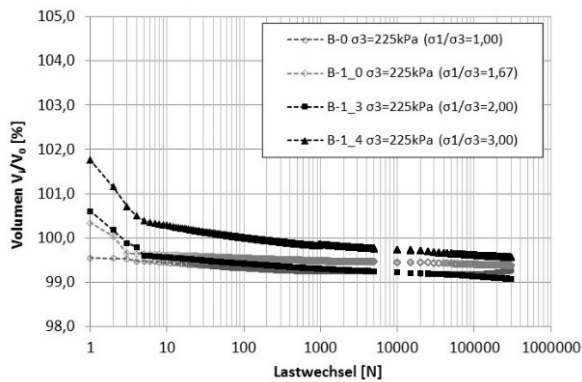
# Anlage – E



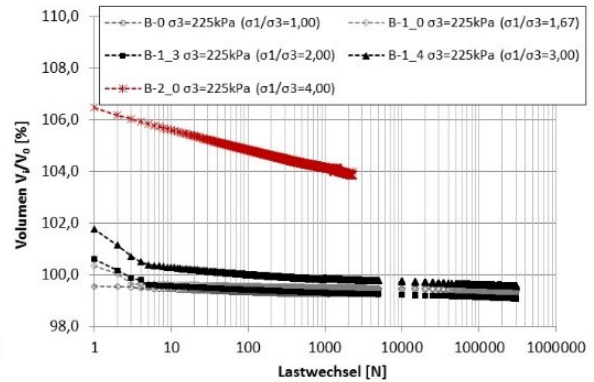
Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen Versuchsreihe A (long term)



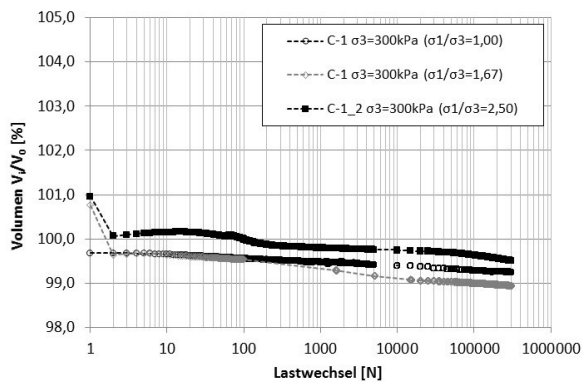
Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen (einschließlich zyklisches Versagen) Versuchsreihe A (long term)



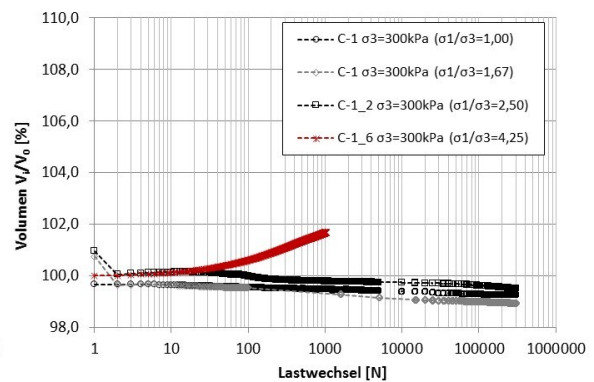
Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen Versuchsreihe B (long term)



Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen (einschließlich zyklisches Versagen) Versuchsreihe B (long term)



Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen Versuchsreihe C (long term)



Relative Volumenänderung in Abhängigkeit von der LW-Zahl bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen (einschließlich zyklisches Versagen) Versuchsreihe C (long term)

Übersicht der Versuchsdaten - Festlegung der  
Grenzspannungsverhältnisse

Übersicht Versuchsdaten											
Versuchsreihe: KTS				PK-Kerntemperatur: [°C]				+10			
Wassergehalt: w [M.-%]                    2				Vorbelastung: [-]				$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$			
Verdichtungsgrad: D <sub>Pr</sub> [%]                    97								$(\sigma_{22/33} = 150 \text{ kPa})$			
Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11,el}^m$ [%]
I	1	0,074	0,088	0,846	0,075	0,075	1,000	-0,013	0,083	-0,162	0,184
	2	0,112	0,087	1,279	0,075	0,113	0,667	0,024	0,096	0,256	0,289
	3	0,150	0,087	1,716	0,075	0,150	0,500	0,063	0,108	0,578	0,365
	4	0,189	0,087	2,160	0,075	0,188	0,400	0,101	0,121	0,837	0,460
	5	0,228	0,087	2,606	0,075	0,225	0,333	0,140	0,134	1,046	0,549
	6	0,265	0,087	3,043	0,075	0,263	0,286	0,178	0,147	1,215	0,642
	7	0,304	0,087	3,487	0,075	0,300	0,250	0,217	0,159	1,360	0,741
II	1	0,149	0,165	0,905	0,150	0,150	1,000	-0,016	0,160	-0,098	0,237
	2	0,210	0,165	1,273	0,150	0,208	0,720	0,045	0,180	0,250	0,401
	3	0,270	0,165	1,637	0,150	0,267	0,563	0,105	0,200	0,525	0,528
	4	0,329	0,164	2,004	0,150	0,325	0,462	0,165	0,219	0,752	0,650
	5	0,389	0,164	2,372	0,150	0,383	0,391	0,225	0,239	0,941	0,765
	6	0,449	0,163	2,747	0,150	0,442	0,340	0,285	0,258	1,104	0,879
	7	0,508	0,163	3,121	0,150	0,500	0,300	0,345	0,278	1,243	0,986
III	1	0,230	0,239	0,963	0,225	0,225	1,000	-0,009	0,236	-0,037	0,311
	2	0,303	0,239	1,269	0,225	0,296	0,761	0,064	0,260	0,246	0,479
	3	0,376	0,238	1,577	0,225	0,367	0,614	0,138	0,284	0,484	0,621
	4	0,449	0,238	1,884	0,225	0,438	0,514	0,211	0,309	0,683	0,756
	5	0,522	0,238	2,189	0,225	0,508	0,443	0,283	0,333	0,852	0,859
	6	0,595	0,238	2,497	0,225	0,579	0,388	0,357	0,357	0,999	0,995
	7	0,668	0,238	2,805	0,225	0,650	0,346	0,430	0,381	1,127	1,100
IV	1	0,307	0,315	0,973	0,300	0,300	1,000	-0,008	0,312	-0,027	0,418
	2	0,393	0,315	1,247	0,300	0,383	0,783	0,078	0,341	0,228	0,591
	3	0,478	0,315	1,519	0,300	0,467	0,643	0,164	0,369	0,443	0,739
	4	0,564	0,315	1,791	0,300	0,550	0,545	0,249	0,398	0,626	0,875
	5	0,650	0,315	2,066	0,300	0,633	0,474	0,336	0,427	0,787	0,996
	6	0,735	0,315	2,337	0,300	0,717	0,419	0,421	0,455	0,925	1,109
	7	0,821	0,314	2,610	0,300	0,800	0,375	0,506	0,483	1,048	1,223

Übersicht Versuchsdaten											
Versuchsreihe: KTS				PK-Kerntemperatur: [°C]				+10			
Wassergehalt: w [M.-%]                    4				Vorbelastung: [-]				$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$			
Verdichtungsgrad: $D_{Pr}$ [%]                97								$(\sigma_{22/33} = 150 \text{ kPa})$			
Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,074	0,081	0,907	0,075	0,075	1,000	-0,008	0,079	-0,096	0,215
	2	0,112	0,081	1,374	0,075	0,113	0,667	0,030	0,091	0,332	0,344
	3	0,150	0,081	1,842	0,075	0,150	0,500	0,068	0,104	0,658	0,427
	4	0,188	0,081	2,317	0,075	0,188	0,400	0,107	0,117	0,915	0,533
	5	0,227	0,081	2,796	0,075	0,225	0,333	0,146	0,130	1,124	0,650
	6	0,265	0,081	3,270	0,075	0,263	0,286	0,184	0,142	1,292	0,773
	7	0,304	0,081	3,757	0,075	0,300	0,250	0,223	0,155	1,437	0,917
II	1	0,149	0,158	0,944	0,150	0,150	1,000	-0,009	0,155	-0,057	0,281
	2	0,210	0,158	1,326	0,150	0,208	0,720	0,052	0,175	0,294	0,457
	3	0,269	0,158	1,703	0,150	0,267	0,563	0,111	0,195	0,570	0,636
	4	0,329	0,158	2,083	0,150	0,325	0,462	0,171	0,215	0,796	0,798
	5	0,389	0,158	2,461	0,150	0,383	0,391	0,231	0,235	0,982	0,961
	6	0,448	0,158	2,841	0,150	0,442	0,340	0,291	0,255	1,141	1,121
	7	0,508	0,158	3,222	0,150	0,500	0,300	0,350	0,274	1,277	1,285
III	1	0,230	0,237	0,967	0,225	0,225	1,000	-0,008	0,235	-0,033	0,462
	2	0,302	0,237	1,272	0,225	0,296	0,761	0,065	0,259	0,250	0,671
	3	0,376	0,237	1,583	0,225	0,367	0,614	0,138	0,283	0,488	0,892
	4	0,449	0,237	1,892	0,225	0,438	0,514	0,212	0,308	0,688	1,093
	5	0,521	0,237	2,199	0,225	0,508	0,443	0,284	0,332	0,857	1,277
	6	0,594	0,237	2,509	0,225	0,579	0,388	0,357	0,356	1,004	1,446
	7	0,668	0,237	2,821	0,225	0,650	0,346	0,431	0,380	1,133	1,647
IV	1	0,307	0,315	0,973	0,300	0,300	1,000	-0,008	0,312	-0,027	0,749
	2	0,393	0,315	1,247	0,300	0,383	0,783	0,078	0,341	0,229	0,946
	3	0,478	0,315	1,519	0,300	0,467	0,643	0,163	0,369	0,442	1,163
	4	0,564	0,314	1,792	0,300	0,550	0,545	0,249	0,397	0,627	1,360
	5	0,650	0,314	2,069	0,300	0,633	0,474	0,336	0,426	0,788	1,556
	6	0,735	0,314	2,340	0,300	0,717	0,419	0,421	0,455	0,926	1,746
	7	0,821	0,314	2,614	0,300	0,800	0,375	0,507	0,483	1,049	1,954

Übersicht Versuchsdaten											
Versuchsreihe: KTS				PK-Kerntemperatur: [°C]				+10			
Wassergehalt: w [M.-%] 5				Vorbelastung: [-]				$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$			
Verdichtungsgrad: $D_{Pr}$ [%] 97								$(\sigma_{22/33} = 150 \text{ kPa})$			
Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,074	0,081	0,911	0,075	0,075	1,000	-0,007	0,079	-0,092	0,237
	2	0,112	0,081	1,376	0,075	0,113	0,667	0,031	0,092	0,334	0,437
	3	0,150	0,081	1,842	0,075	0,150	0,500	0,068	0,104	0,657	0,619
	4	0,188	0,081	2,316	0,075	0,188	0,400	0,107	0,117	0,915	0,789
	5	0,227	0,081	2,796	0,075	0,225	0,333	0,146	0,130	1,124	0,964
	6	0,265	0,081	3,272	0,075	0,263	0,286	0,184	0,142	1,293	1,145
	7	0,304	0,081	3,752	0,075	0,300	0,250	0,223	0,155	1,435	1,351
II	1	0,150	0,159	0,942	0,150	0,150	1,000	-0,009	0,156	-0,059	0,355
	2	0,210	0,159	1,321	0,150	0,208	0,720	0,051	0,176	0,290	0,516
	3	0,269	0,159	1,696	0,150	0,267	0,563	0,110	0,196	0,565	0,753
	4	0,329	0,159	2,076	0,150	0,325	0,462	0,171	0,216	0,792	0,976
	5	0,389	0,159	2,452	0,150	0,383	0,391	0,230	0,235	0,978	1,202
	6	0,449	0,158	2,832	0,150	0,442	0,340	0,290	0,255	1,137	1,416
	7	0,508	0,158	3,209	0,150	0,500	0,300	0,350	0,275	1,272	1,611
III	1	0,229	0,237	0,965	0,225	0,225	1,000	-0,008	0,234	-0,036	0,386
	2	0,302	0,237	1,273	0,225	0,296	0,761	0,065	0,259	0,250	0,549
	3	0,375	0,237	1,583	0,225	0,367	0,614	0,138	0,283	0,488	0,815
	4	0,449	0,237	1,894	0,225	0,438	0,514	0,212	0,308	0,689	1,091
	5	0,522	0,237	2,201	0,225	0,508	0,443	0,285	0,332	0,858	1,342
	6	0,595	0,237	2,511	0,225	0,579	0,388	0,358	0,356	1,005	1,570
	7	0,668	0,237	2,821	0,225	0,650	0,346	0,431	0,381	1,133	1,781
IV	1	0,306	0,315	0,970	0,300	0,300	1,000	-0,009	0,312	-0,030	0,558
	2	0,392	0,315	1,243	0,300	0,383	0,783	0,077	0,341	0,225	0,732
	3	0,478	0,315	1,517	0,300	0,467	0,643	0,163	0,369	0,441	1,016
	4	0,564	0,315	1,789	0,300	0,550	0,545	0,249	0,398	0,625	1,283
	5	0,650	0,315	2,064	0,300	0,633	0,474	0,335	0,427	0,786	1,539
	6	0,735	0,315	2,335	0,300	0,717	0,419	0,421	0,455	0,924	1,780
	7	0,821	0,315	2,608	0,300	0,800	0,375	0,506	0,483	1,047	2,002

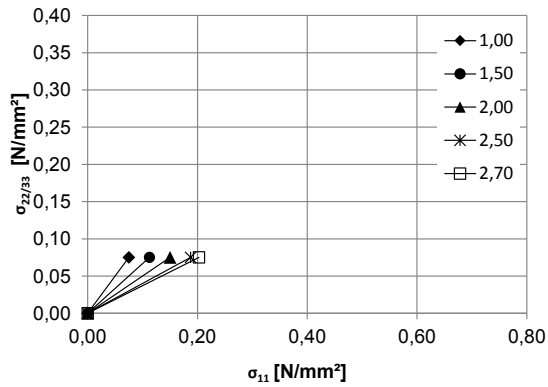


Übersicht Versuchsdaten											
Versuchsreihe: KTS				PK-Kerntemperatur: [°C]				+10			
Wassergehalt: w [M.-%] 4				Vorbelastung: [-]				$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$			
Verdichtungsgrad: $D_{Pr}$ [%] 100								$(\sigma_{22/33} = 150 \text{ kPa})$			
Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,077	0,073	1,049	0,075	0,075	1,000	0,004	0,074	0,048	0,226
	2	0,114	0,073	1,555	0,075	0,113	0,667	0,041	0,087	0,469	0,334
	3	0,151	0,073	2,065	0,075	0,150	0,500	0,078	0,099	0,786	0,414
	4	0,189	0,073	2,583	0,075	0,188	0,400	0,116	0,112	1,036	0,460
	5	0,228	0,073	3,109	0,075	0,225	0,333	0,155	0,125	1,239	0,543
	6	0,265	0,073	3,622	0,075	0,263	0,286	0,192	0,137	1,399	0,615
	7	0,304	0,073	4,147	0,075	0,300	0,250	0,231	0,150	1,536	0,683
II	1	0,150	0,136	1,103	0,150	0,150	1,000	0,014	0,141	0,099	0,260
	2	0,210	0,136	1,542	0,150	0,208	0,720	0,074	0,161	0,459	0,374
	3	0,269	0,137	1,973	0,150	0,267	0,563	0,133	0,181	0,735	0,453
	4	0,329	0,137	2,404	0,150	0,325	0,462	0,192	0,201	0,957	0,522
	5	0,388	0,137	2,836	0,150	0,383	0,391	0,251	0,221	1,139	0,603
	6	0,449	0,137	3,273	0,150	0,442	0,340	0,311	0,241	1,293	0,713
	7	0,508	0,137	3,704	0,150	0,500	0,300	0,371	0,261	1,422	0,809
III	1	0,230	0,208	1,109	0,225	0,225	1,000	0,023	0,215	0,105	0,344
	2	0,302	0,208	1,456	0,225	0,296	0,761	0,095	0,239	0,396	0,452
	3	0,375	0,208	1,806	0,225	0,367	0,614	0,168	0,264	0,635	0,576
	4	0,448	0,208	2,155	0,225	0,438	0,514	0,240	0,288	0,834	0,681
	5	0,521	0,208	2,503	0,225	0,508	0,443	0,313	0,312	1,001	0,794
	6	0,594	0,208	2,852	0,225	0,579	0,388	0,386	0,337	1,145	0,894
	7	0,666	0,208	3,202	0,225	0,650	0,346	0,458	0,361	1,270	1,011
IV	1	0,307	0,281	1,093	0,300	0,300	1,000	0,026	0,289	0,091	0,404
	2	0,392	0,281	1,397	0,300	0,383	0,783	0,111	0,318	0,350	0,535
	3	0,478	0,281	1,700	0,300	0,467	0,643	0,197	0,346	0,568	0,650
	4	0,563	0,281	2,004	0,300	0,550	0,545	0,282	0,375	0,752	0,764
	5	0,649	0,281	2,310	0,300	0,633	0,474	0,368	0,404	0,912	0,860
	6	0,734	0,281	2,610	0,300	0,717	0,419	0,453	0,432	1,048	0,951
	7	0,819	0,281	2,914	0,300	0,800	0,375	0,538	0,460	1,168	1,052

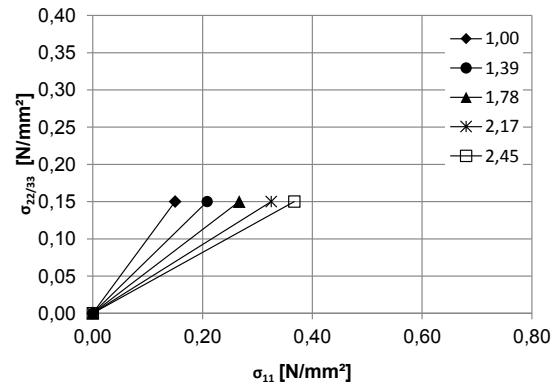
Übersicht Versuchsdaten											
Versuchsreihe: KTS				PK-Kerntemperatur: [°C]				+10			
Wassergehalt: w [M.-%]                    4				Vorbelastung: [-]				$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$			
Verdichtungsgrad: $D_{Pr}$ [%]                103								$(\sigma_{22/33} = 150 \text{ kPa})$			
Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q/p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11-el}^m$ [%]
I	1	0,081	0,080	1,010	0,075	0,075	1,000	0,001	0,080	0,010	0,237
	2	0,117	0,081	1,454	0,075	0,113	0,667	0,037	0,093	0,395	0,349
	3	0,154	0,080	1,911	0,075	0,150	0,500	0,073	0,105	0,699	0,431
	4	0,191	0,080	2,383	0,075	0,188	0,400	0,111	0,117	0,946	0,488
	5	0,229	0,080	2,859	0,075	0,225	0,333	0,149	0,130	1,148	0,547
	6	0,266	0,080	3,328	0,075	0,263	0,286	0,186	0,142	1,311	0,610
	7	0,305	0,080	3,810	0,075	0,300	0,250	0,225	0,155	1,451	0,688
II	1	0,151	0,158	0,957	0,150	0,150	1,000	-0,007	0,156	-0,044	0,300
	2	0,211	0,158	1,339	0,150	0,208	0,720	0,053	0,176	0,304	0,416
	3	0,270	0,158	1,713	0,150	0,267	0,563	0,113	0,195	0,576	0,507
	4	0,329	0,158	2,088	0,150	0,325	0,462	0,172	0,215	0,798	0,587
	5	0,389	0,158	2,470	0,150	0,383	0,391	0,232	0,235	0,987	0,667
	6	0,449	0,158	2,845	0,150	0,442	0,340	0,291	0,255	1,142	0,737
	7	0,508	0,158	3,220	0,150	0,500	0,300	0,350	0,274	1,276	0,816
III	1	0,232	0,238	0,975	0,225	0,225	1,000	-0,006	0,236	-0,025	0,390
	2	0,304	0,238	1,279	0,225	0,296	0,761	0,066	0,260	0,255	0,500
	3	0,376	0,237	1,585	0,225	0,367	0,614	0,139	0,284	0,490	0,590
	4	0,449	0,237	1,893	0,225	0,438	0,514	0,212	0,308	0,688	0,672
	5	0,521	0,237	2,198	0,225	0,508	0,443	0,284	0,332	0,856	0,751
	6	0,594	0,237	2,505	0,225	0,579	0,388	0,357	0,356	1,002	0,817
	7	0,666	0,237	2,811	0,225	0,650	0,346	0,429	0,380	1,129	0,890
IV	1	0,307	0,280	1,097	0,300	0,300	1,000	0,027	0,289	0,094	0,463
	2	0,392	0,280	1,401	0,300	0,383	0,783	0,112	0,318	0,354	0,567
	3	0,478	0,280	1,706	0,300	0,467	0,643	0,198	0,346	0,571	0,658
	4	0,563	0,280	2,008	0,300	0,550	0,545	0,283	0,375	0,755	0,741
	5	0,649	0,280	2,314	0,300	0,633	0,474	0,369	0,403	0,914	0,809
	6	0,733	0,281	2,614	0,300	0,717	0,419	0,453	0,432	1,049	0,873
	7	0,819	0,281	2,917	0,300	0,800	0,375	0,538	0,460	1,170	0,943

## Übersicht der Spannungspfade (zu Anlage H)

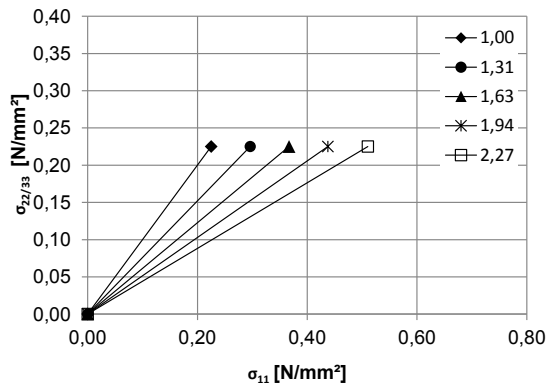
Versuche ohne thermische Beanspruchung



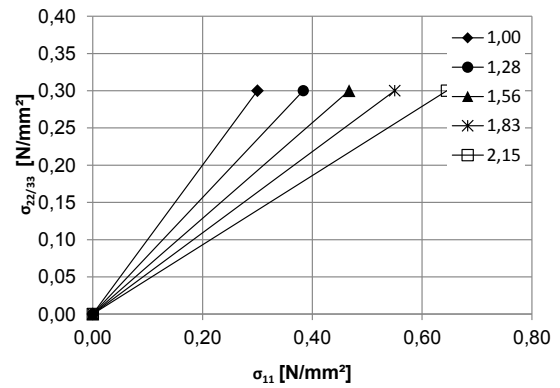
Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus I



Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus II

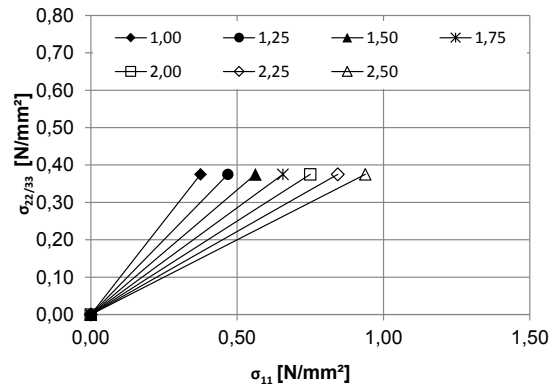
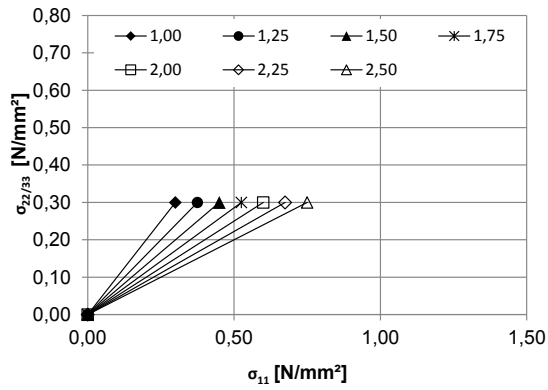


Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus III



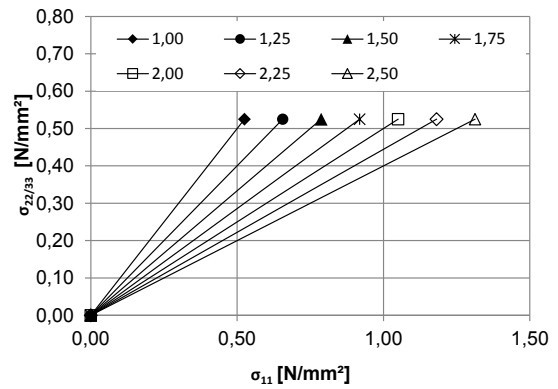
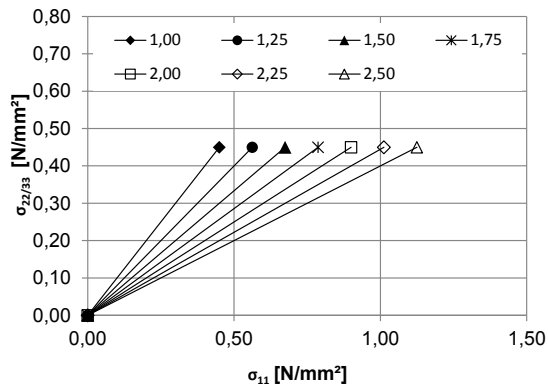
Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus IV

Versuche mit thermische Beanspruchung (vollständige Durchfrierung)



Spannungspfade 1 bis 7 (von links nach rechts) – Belastungszyklus I

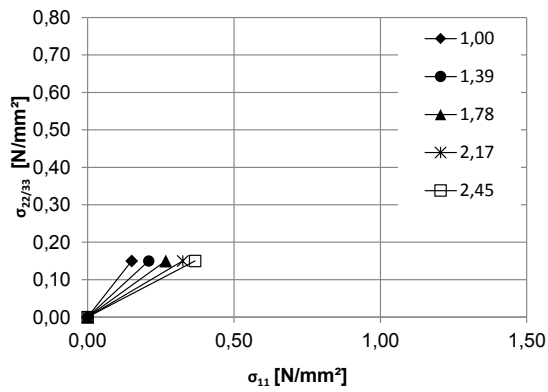
Spannungspfade 1 bis 7 (von links nach rechts) – Belastungszyklus II



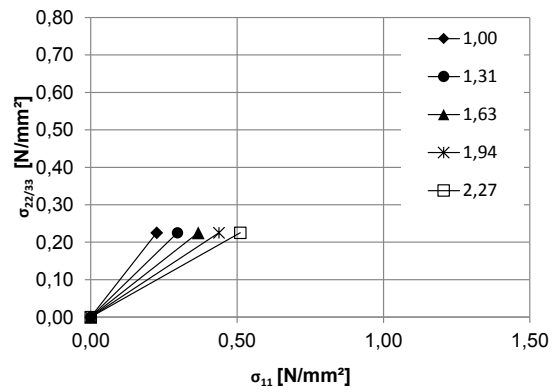
Spannungspfade 1 bis 7 (von links nach rechts) – Belastungszyklus III

Spannungspfade 1 bis 7 (von links nach rechts) – Belastungszyklus IV

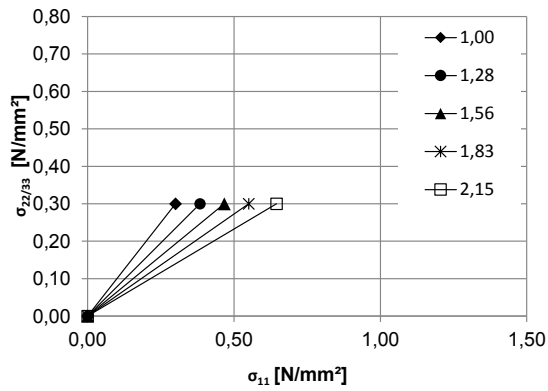
Versuche mit thermische Beanspruchung (Phasenübergang – Abkühlung/Erwärmung)



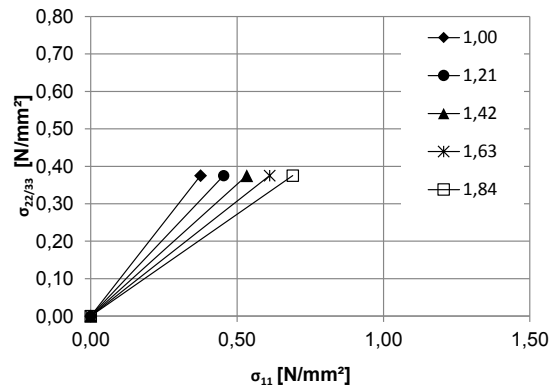
Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus I



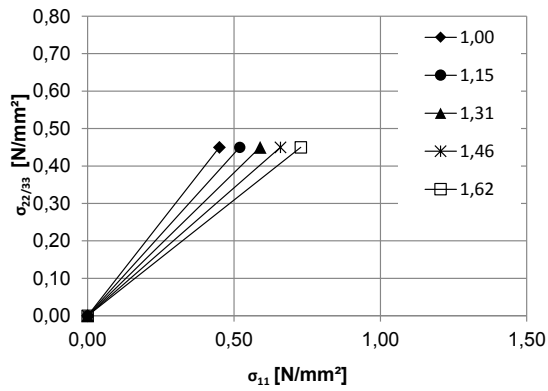
Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus II



Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus III



Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus IV



Spannungspfade 1 bis 5 (von links nach rechts) – Belastungszyklus V

## Übersicht der Versuchsdaten - Multi-Stage-Versuche

- ohne thermische Beeinflussung

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10

A

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,086	0,061	1,407	0,075	0,075	1,000	0,025	0,069	0,358	0,211
	2	0,121	0,063	1,918	0,113	0,075	1,500	0,058	0,083	0,703	0,336
	3	0,157	0,064	2,475	0,150	0,075	2,000	0,094	0,095	0,989	0,415
	4	0,194	0,064	3,052	0,188	0,075	2,500	0,131	0,107	1,219	0,489
	5	0,209	0,064	3,288	0,203	0,075	2,703	0,146	0,112	1,298	0,522
II	1	0,157	0,135	1,167	0,150	0,150	1,000	0,022	0,142	0,158	0,230
	2	0,215	0,135	1,599	0,208	0,150	1,389	0,081	0,162	0,500	0,321
	3	0,274	0,135	2,034	0,267	0,150	1,778	0,139	0,181	0,769	0,479
	4	0,332	0,135	2,464	0,325	0,150	2,167	0,197	0,201	0,984	0,591
	5	0,376	0,135	2,785	0,367	0,150	2,448	0,241	0,215	1,119	0,672
III	1	0,232	0,208	1,118	0,225	0,225	1,000	0,025	0,216	0,114	0,301
	2	0,303	0,208	1,457	0,296	0,225	1,315	0,095	0,239	0,396	0,431
	3	0,375	0,208	1,805	0,367	0,225	1,630	0,167	0,264	0,635	0,603
	4	0,447	0,208	2,152	0,438	0,225	1,944	0,239	0,288	0,832	0,755
	5	0,521	0,208	2,506	0,511	0,225	2,269	0,313	0,312	1,003	0,887
IV	1	0,307	0,281	1,093	0,300	0,300	1,000	0,026	0,289	0,090	0,410
	2	0,392	0,281	1,396	0,383	0,300	1,278	0,111	0,318	0,350	0,583
	3	0,476	0,281	1,696	0,467	0,300	1,556	0,196	0,346	0,565	0,712
	4	0,561	0,281	1,998	0,550	0,300	1,833	0,280	0,374	0,749	0,852
	5	0,594	0,281	2,113	0,645	0,300	2,150	0,313	0,385	0,812	0,901



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10

A

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,081	0,060	1,352	0,075	0,075	1,000	0,021	0,067	0,315	0,236
	2	0,117	0,061	1,920	0,113	0,075	1,500	0,056	0,079	0,704	0,303
	3	0,154	0,061	2,510	0,150	0,075	2,000	0,092	0,092	1,004	0,420
	4	0,192	0,061	3,125	0,188	0,075	2,500	0,130	0,105	1,244	0,492
	5	0,207	0,061	3,361	0,203	0,075	2,703	0,145	0,110	1,321	0,520
II	1	0,153	0,134	1,140	0,150	0,150	1,000	0,019	0,140	0,134	0,315
	2	0,212	0,134	1,579	0,208	0,150	1,389	0,078	0,160	0,485	0,417
	3	0,272	0,134	2,023	0,267	0,150	1,778	0,137	0,180	0,763	0,541
	4	0,332	0,134	2,471	0,325	0,150	2,167	0,198	0,200	0,987	0,661
	5	0,375	0,134	2,791	0,367	0,150	2,448	0,241	0,215	1,121	0,735
III	1	0,229	0,207	1,106	0,225	0,225	1,000	0,022	0,214	0,102	0,370
	2	0,301	0,207	1,454	0,296	0,225	1,315	0,094	0,238	0,394	0,548
	3	0,374	0,207	1,807	0,367	0,225	1,630	0,167	0,263	0,636	0,705
	4	0,447	0,207	2,156	0,438	0,225	1,944	0,240	0,287	0,835	0,838
	5	0,521	0,207	2,515	0,511	0,225	2,269	0,314	0,312	1,007	0,958
IV	1	0,305	0,279	1,093	0,300	0,300	1,000	0,026	0,288	0,090	0,482
	2	0,391	0,280	1,398	0,383	0,300	1,278	0,111	0,317	0,351	0,657
	3	0,476	0,280	1,700	0,467	0,300	1,556	0,196	0,345	0,568	0,796
	4	0,561	0,280	2,002	0,550	0,300	1,833	0,281	0,374	0,751	0,924
	5	0,594	0,280	2,118	0,645	0,300	2,150	0,313	0,385	0,815	0,968

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10

A

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,086	0,064	1,348	0,075	0,075	1,000	0,022	0,072	0,312	0,319
	2	0,122	0,065	1,880	0,113	0,075	1,500	0,057	0,084	0,680	0,452
	3	0,158	0,066	2,392	0,150	0,075	2,000	0,092	0,097	0,951	0,586
	4	0,196	0,073	2,686	0,188	0,075	2,500	0,123	0,114	1,079	0,726
	5	0,211	0,081	2,604	0,203	0,075	2,703	0,130	0,125	1,045	0,780
II	1	0,158	0,153	1,031	0,150	0,150	1,000	0,005	0,155	0,031	0,340
	2	0,217	0,153	1,413	0,208	0,150	1,389	0,063	0,174	0,363	0,521
	3	0,276	0,153	1,800	0,267	0,150	1,778	0,123	0,194	0,632	0,737
	4	0,335	0,153	2,192	0,325	0,150	2,167	0,182	0,214	0,853	0,949
	5	0,379	0,153	2,477	0,367	0,150	2,448	0,226	0,228	0,990	1,070
II	1	0,233	0,227	1,025	0,225	0,225	1,000	0,006	0,229	0,024	0,417
	2	0,304	0,227	1,342	0,296	0,225	1,315	0,077	0,253	0,307	0,646
	3	0,377	0,227	1,662	0,367	0,225	1,630	0,150	0,277	0,542	0,947
	4	0,450	0,227	1,985	0,438	0,225	1,944	0,223	0,301	0,741	1,168
	5	0,523	0,226	2,312	0,511	0,225	2,269	0,297	0,325	0,913	1,317
IV	1	0,309	0,300	1,027	0,300	0,300	1,000	0,008	0,303	0,027	0,532
	2	0,393	0,300	1,310	0,383	0,300	1,278	0,093	0,331	0,281	0,840
	3	0,478	0,300	1,593	0,467	0,300	1,556	0,178	0,359	0,495	1,061
	4	0,563	0,300	1,878	0,550	0,300	1,833	0,263	0,388	0,679	1,220
	5	0,595	0,300	1,986	0,645	0,300	2,150	0,296	0,398	0,742	1,280

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10

A

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,086	0,062	1,391	0,075	0,075	1,000	0,024	0,070	0,346	0,233
	2	0,123	0,063	1,936	0,113	0,075	1,500	0,059	0,083	0,714	0,346
	3	0,159	0,064	2,495	0,150	0,075	2,000	0,095	0,095	0,998	0,394
	4	0,196	0,064	3,072	0,188	0,075	2,500	0,132	0,108	1,226	0,449
	5	0,211	0,064	3,307	0,203	0,075	2,703	0,147	0,113	1,304	0,467
II	1	0,158	0,134	1,175	0,150	0,150	1,000	0,023	0,142	0,165	0,290
	2	0,216	0,135	1,603	0,208	0,150	1,389	0,081	0,162	0,502	0,406
	3	0,275	0,135	2,040	0,267	0,150	1,778	0,140	0,181	0,772	0,468
	4	0,334	0,135	2,472	0,325	0,150	2,167	0,199	0,201	0,988	0,540
	5	0,376	0,135	2,788	0,367	0,150	2,448	0,241	0,215	1,120	0,654
III	1	0,232	0,207	1,121	0,225	0,225	1,000	0,025	0,215	0,116	0,395
	2	0,304	0,207	1,465	0,296	0,225	1,315	0,096	0,239	0,402	0,491
	3	0,375	0,207	1,809	0,367	0,225	1,630	0,168	0,263	0,637	0,579
	4	0,448	0,207	2,160	0,438	0,225	1,944	0,241	0,288	0,837	0,665
	5	0,523	0,208	2,520	0,511	0,225	2,269	0,316	0,313	1,009	0,740
IV	1	0,308	0,281	1,097	0,300	0,300	1,000	0,027	0,290	0,094	0,421
	2	0,392	0,281	1,396	0,383	0,300	1,278	0,111	0,318	0,350	0,526
	3	0,478	0,281	1,699	0,467	0,300	1,556	0,197	0,347	0,567	0,610
	4	0,563	0,281	2,001	0,550	0,300	1,833	0,281	0,375	0,750	0,678
	5	0,595	0,281	2,113	0,645	0,300	2,150	0,313	0,386	0,812	0,712

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

+10 A

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%o]
I	1	0,084	0,066	1,260	0,075	0,075	1,000	0,017	0,072	0,239	0,205
	2	0,120	0,067	1,795	0,113	0,075	1,500	0,053	0,084	0,628	0,323
	3	0,156	0,067	2,337	0,150	0,075	2,000	0,089	0,097	0,925	0,368
	4	0,194	0,067	2,907	0,188	0,075	2,500	0,127	0,109	1,166	0,422
	5	0,209	0,067	3,134	0,203	0,075	2,703	0,142	0,114	1,247	0,446
II	1	0,156	0,135	1,152	0,150	0,150	1,000	0,021	0,142	0,144	0,275
	2	0,214	0,136	1,580	0,208	0,150	1,389	0,079	0,162	0,486	0,326
	3	0,273	0,136	2,014	0,267	0,150	1,778	0,138	0,182	0,758	0,394
	4	0,332	0,136	2,446	0,325	0,150	2,167	0,196	0,201	0,976	0,481
	5	0,375	0,136	2,759	0,367	0,150	2,448	0,239	0,216	1,109	0,540
II	1	0,231	0,208	1,109	0,225	0,225	1,000	0,023	0,216	0,105	0,369
	2	0,302	0,208	1,451	0,296	0,225	1,315	0,094	0,240	0,392	0,448
	3	0,374	0,208	1,794	0,367	0,225	1,630	0,166	0,264	0,628	0,529
	4	0,447	0,209	2,143	0,438	0,225	1,944	0,238	0,288	0,828	0,591
	5	0,522	0,209	2,502	0,511	0,225	2,269	0,313	0,313	1,001	0,658
IV	1	0,307	0,282	1,091	0,300	0,300	1,000	0,026	0,290	0,088	0,400
	2	0,391	0,281	1,389	0,383	0,300	1,278	0,109	0,318	0,344	0,480
	3	0,477	0,282	1,693	0,467	0,300	1,556	0,195	0,347	0,563	0,553
	4	0,562	0,282	1,995	0,550	0,300	1,833	0,280	0,375	0,747	0,631
	5	0,594	0,282	2,111	0,645	0,300	2,150	0,313	0,386	0,811	0,663

## Übersicht der Versuchsdaten - Multi-Stage-Versuche

- mit thermischer Beeinflussung (quasi-vollständiges Durchfrieren)

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-10

B

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,305	0,295	1,032	0,300	0,300	1,000	0,010	0,298	0,032	0,023
	2	0,381	0,295	1,289	0,375	0,300	1,250	0,085	0,324	0,263	0,037
	3	0,457	0,295	1,545	0,450	0,300	1,500	0,161	0,349	0,461	0,050
	4	0,534	0,295	1,808	0,525	0,300	1,750	0,239	0,375	0,637	0,059
	5	0,610	0,295	2,063	0,600	0,300	2,000	0,314	0,400	0,785	0,071
	6	0,687	0,295	2,327	0,675	0,300	2,250	0,392	0,426	0,920	0,083
	7	0,762	0,295	2,581	0,750	0,300	2,500	0,467	0,451	1,035	0,090
		0,000	0,000								
II	1	0,379	0,348	1,089	0,375	0,375	1,000	0,031	0,358	0,087	0,040
	2	0,476	0,348	1,370	0,469	0,375	1,250	0,129	0,391	0,329	0,053
	3	0,572	0,348	1,645	0,563	0,375	1,500	0,224	0,422	0,531	0,064
	4	0,667	0,348	1,919	0,657	0,375	1,751	0,319	0,454	0,703	0,078
	5	0,763	0,348	2,195	0,750	0,375	2,001	0,416	0,486	0,855	0,089
	6	0,859	0,348	2,471	0,844	0,375	2,251	0,511	0,518	0,987	0,101
	7	0,956	0,348	2,748	0,938	0,375	2,501	0,608	0,550	1,105	0,112
		0,000	0,000								
III	1	0,455	0,446	1,019	0,450	0,450	1,000	0,008	0,449	0,019	0,044
	2	0,572	0,446	1,281	0,563	0,450	1,250	0,126	0,488	0,257	0,060
	3	0,688	0,446	1,541	0,675	0,450	1,500	0,242	0,527	0,458	0,076
	4	0,802	0,446	1,797	0,788	0,450	1,750	0,356	0,565	0,630	0,090
	5	0,915	0,447	2,048	0,900	0,450	2,000	0,468	0,603	0,777	0,103
	6	1,031	0,446	2,310	1,013	0,450	2,250	0,585	0,641	0,912	0,117
	7	1,146	0,447	2,567	1,125	0,450	2,500	0,700	0,680	1,029	0,134
		0,000	0,000								
IV	1	0,532	0,520	1,024	0,525	0,525	1,000	0,012	0,524	0,023	0,054
	2	0,667	0,520	1,284	0,656	0,525	1,250	0,147	0,569	0,259	0,072
	3	0,801	0,520	1,541	0,788	0,525	1,500	0,281	0,614	0,459	0,089
	4	0,936	0,520	1,800	0,919	0,525	1,750	0,416	0,659	0,632	0,103
	5	1,069	0,520	2,057	1,050	0,525	2,001	0,549	0,703	0,782	0,121
	6	1,203	0,519	2,317	1,182	0,525	2,251	0,684	0,747	0,915	0,142
	7	1,339	0,520	2,576	1,313	0,525	2,501	0,819	0,793	1,033	0,162

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-10

B

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,304	0,283	1,075	0,300	0,300	1,000	0,021	0,290	0,073	o. A.
	2	0,380	0,283	1,342	0,375	0,300	1,250	0,097	0,315	0,307	0,005
	3	0,456	0,283	1,612	0,450	0,300	1,500	0,173	0,341	0,509	0,008
	4	0,533	0,283	1,883	0,525	0,300	1,750	0,250	0,366	0,682	0,011
	5	0,608	0,283	2,148	0,600	0,300	2,000	0,325	0,391	0,830	0,012
	6	0,689	0,283	2,434	0,675	0,300	2,250	0,406	0,418	0,970	0,015
	7	0,761	0,283	2,687	0,750	0,300	2,500	0,478	0,442	1,080	0,016
		0,000	0,000								
II	1	0,379	0,335	1,130	0,375	0,375	1,000	0,043	0,350	0,124	o. A.
	2	0,475	0,335	1,417	0,469	0,375	1,250	0,140	0,382	0,366	0,006
	3	0,571	0,335	1,701	0,563	0,375	1,500	0,235	0,414	0,569	0,008
	4	0,668	0,335	1,991	0,657	0,375	1,751	0,332	0,446	0,745	0,012
	5	0,762	0,335	2,271	0,750	0,375	2,001	0,426	0,478	0,893	0,016
	6	0,858	0,335	2,557	0,844	0,375	2,251	0,522	0,510	1,025	0,019
	7	0,955	0,335	2,847	0,938	0,375	2,501	0,619	0,542	1,143	0,021
		0,000	0,000								
III	1	0,457	0,435	1,050	0,450	0,450	1,000	0,022	0,442	0,049	o. A.
	2	0,570	0,435	1,311	0,563	0,450	1,250	0,135	0,480	0,282	0,011
	3	0,684	0,435	1,572	0,675	0,450	1,500	0,249	0,518	0,481	0,011
	4	0,803	0,435	1,845	0,788	0,450	1,750	0,368	0,558	0,660	0,014
	5	0,914	0,435	2,101	0,900	0,450	2,000	0,479	0,595	0,805	0,019
	6	1,032	0,435	2,372	1,013	0,450	2,250	0,597	0,634	0,941	0,022
	7	1,142	0,435	2,625	1,125	0,450	2,500	0,707	0,671	1,054	0,025
		0,000	0,000								
IV	1	0,532	0,510	1,042	0,525	0,525	1,000	0,021	0,517	0,041	o. A.
	2	0,669	0,509	1,312	0,656	0,525	1,250	0,159	0,562	0,283	0,011
	3	0,803	0,511	1,572	0,788	0,525	1,500	0,292	0,608	0,480	0,014
	4	0,934	0,511	1,829	0,919	0,525	1,750	0,423	0,652	0,649	0,020
	5	1,066	0,511	2,087	1,050	0,525	2,001	0,555	0,696	0,798	0,021
	6	1,205	0,510	2,362	1,182	0,525	2,251	0,695	0,742	0,937	0,028
	7	1,335	0,510	2,618	1,313	0,525	2,501	0,825	0,785	1,051	0,032

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-10

B

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,303	0,305	0,996	0,300	0,300	1,000	-0,001	0,304	-0,004	o. A.
	2	0,380	0,305	1,245	0,375	0,300	1,250	0,075	0,330	0,227	0,005
	3	0,455	0,306	1,490	0,450	0,300	1,500	0,150	0,355	0,421	0,007
	4	0,532	0,306	1,740	0,525	0,300	1,750	0,226	0,381	0,593	0,009
	5	0,611	0,306	2,000	0,600	0,300	2,000	0,306	0,407	0,750	0,011
	6	0,686	0,306	2,244	0,675	0,300	2,250	0,380	0,432	0,879	0,013
	7	0,760	0,306	2,487	0,750	0,300	2,500	0,454	0,457	0,994	0,015
		0,000	0,000								
II	1	0,380	0,357	1,066	0,375	0,375	1,000	0,023	0,364	0,064	o. A.
	2	0,476	0,356	1,334	0,469	0,375	1,250	0,119	0,396	0,301	0,006
	3	0,570	0,356	1,601	0,563	0,375	1,500	0,214	0,427	0,500	0,010
	4	0,665	0,356	1,864	0,657	0,375	1,751	0,308	0,459	0,671	0,010
	5	0,761	0,357	2,133	0,750	0,375	2,001	0,404	0,491	0,822	0,014
	6	0,861	0,357	2,413	0,844	0,375	2,251	0,504	0,525	0,961	0,017
	7	0,954	0,357	2,676	0,938	0,375	2,501	0,598	0,556	1,075	0,020
		0,000	0,000								
III	1	0,454	0,454	1,000	0,450	0,450	1,000	0,000	0,454	0,000	o. A.
	2	0,570	0,456	1,251	0,563	0,450	1,250	0,114	0,494	0,232	0,008
	3	0,685	0,455	1,506	0,675	0,450	1,500	0,230	0,532	0,433	0,010
	4	0,800	0,456	1,755	0,788	0,450	1,750	0,344	0,571	0,603	0,014
	5	0,913	0,455	2,007	0,900	0,450	2,000	0,458	0,607	0,754	0,017
	6	1,032	0,456	2,261	1,013	0,450	2,250	0,575	0,648	0,888	0,020
	7	1,148	0,455	2,520	1,125	0,450	2,500	0,692	0,686	1,009	0,023
		0,000	0,000								
IV	1	0,531	0,530	1,002	0,525	0,525	1,000	0,001	0,531	0,002	o. A.
	2	0,666	0,530	1,258	0,656	0,525	1,250	0,136	0,575	0,237	0,010
	3	0,799	0,530	1,508	0,788	0,525	1,500	0,269	0,620	0,434	0,013
	4	0,931	0,530	1,759	0,919	0,525	1,750	0,402	0,664	0,606	0,016
	5	1,067	0,529	2,016	1,050	0,525	2,001	0,537	0,708	0,759	0,021
	6	1,204	0,530	2,272	1,182	0,525	2,251	0,674	0,754	0,893	0,024
	7	1,339	0,530	2,524	1,313	0,525	2,501	0,808	0,800	1,011	0,027



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-10

B

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,304	0,294	1,032	0,300	0,300	1,000	0,009	0,297	0,032	o. A.
	2	0,380	0,294	1,291	0,375	0,300	1,250	0,086	0,323	0,265	0,008
	3	0,457	0,294	1,553	0,450	0,300	1,500	0,163	0,349	0,467	0,010
	4	0,532	0,294	1,808	0,525	0,300	1,750	0,238	0,374	0,637	0,011
	5	0,608	0,295	2,064	0,600	0,300	2,000	0,314	0,399	0,786	0,013
	6	0,688	0,295	2,335	0,675	0,300	2,250	0,393	0,426	0,924	0,016
	7	0,764	0,295	2,592	0,750	0,300	2,500	0,469	0,451	1,040	0,019
		0,000	0,000								
II	1	0,380	0,347	1,095	0,375	0,375	1,000	0,033	0,358	0,092	o. A.
	2	0,475	0,347	1,371	0,469	0,375	1,250	0,129	0,390	0,330	0,005
	3	0,570	0,347	1,643	0,563	0,375	1,500	0,223	0,421	0,529	0,010
	4	0,668	0,347	1,926	0,657	0,375	1,751	0,321	0,454	0,708	0,011
	5	0,766	0,347	2,208	0,750	0,375	2,001	0,419	0,487	0,861	0,014
	6	0,857	0,347	2,473	0,844	0,375	2,251	0,511	0,517	0,988	0,018
	7	0,956	0,347	2,756	0,938	0,375	2,501	0,609	0,550	1,108	0,020
		0,000	0,000								
III	1	0,457	0,445	1,029	0,450	0,450	1,000	0,013	0,449	0,028	o. A.
	2	0,570	0,445	1,282	0,563	0,450	1,250	0,125	0,487	0,257	0,009
	3	0,690	0,445	1,552	0,675	0,450	1,500	0,246	0,527	0,466	0,011
	4	0,799	0,445	1,796	0,788	0,450	1,750	0,354	0,563	0,629	0,015
	5	0,916	0,445	2,059	0,900	0,450	2,000	0,471	0,602	0,783	0,018
	6	1,033	0,445	2,322	1,013	0,450	2,250	0,588	0,641	0,918	0,022
	7	1,147	0,445	2,580	1,125	0,450	2,500	0,703	0,679	1,035	0,025
		0,000	0,000								
IV	1	0,533	0,518	1,028	0,525	0,525	1,000	0,015	0,523	0,028	o. A.
	2	0,669	0,518	1,293	0,656	0,525	1,250	0,152	0,568	0,267	0,010
	3	0,799	0,519	1,540	0,788	0,525	1,500	0,280	0,612	0,458	0,013
	4	0,935	0,520	1,800	0,919	0,525	1,750	0,416	0,658	0,632	0,018
	5	1,071	0,519	2,066	1,050	0,525	2,001	0,553	0,703	0,787	0,022
	6	1,207	0,519	2,327	1,182	0,525	2,251	0,688	0,748	0,920	0,028
	7	1,339	0,519	2,580	1,313	0,525	2,501	0,820	0,792	1,035	0,031

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-10

B

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$	$\sigma_{11}^{(soll)}$	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$	$q^{(ist)}$	$p^{(ist)}$	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$	$\epsilon_{11\_el}^m$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[%]
I	1	0.303	0.284	1.067	0.300	0.300	1.000	0.019	0.291	0.065	o. A.
	2	0.381	0.285	1.337	0.375	0.300	1.250	0.096	0.317	0.303	0.005
	3	0.457	0.285	1.603	0.450	0.300	1.500	0.172	0.342	0.502	0.007
	4	0.534	0.285	1.875	0.525	0.300	1.750	0.249	0.368	0.677	0.009
	5	0.611	0.285	2.142	0.600	0.300	2.000	0.326	0.394	0.827	0.014
	6	0.684	0.285	2.397	0.675	0.300	2.250	0.398	0.418	0.953	0.015
	7	0.762	0.285	2.672	0.750	0.300	2.500	0.477	0.444	1.074	0.017
		0.000	0.000								
II	1	0.381	0.337	1.131	0.375	0.375	1.000	0.044	0.351	0.126	o. A.
	2	0.475	0.337	1.408	0.469	0.375	1.250	0.138	0.383	0.359	0.007
	3	0.568	0.338	1.680	0.563	0.375	1.500	0.230	0.415	0.555	0.008
	4	0.668	0.338	1.977	0.657	0.375	1.751	0.330	0.448	0.737	0.011
	5	0.761	0.336	2.265	0.750	0.375	2.001	0.425	0.478	0.890	0.014
	6	0.857	0.337	2.544	0.844	0.375	2.251	0.520	0.510	1.019	0.017
	7	0.958	0.336	2.849	0.938	0.375	2.501	0.622	0.544	1.144	0.020
		0.000	0.000								
III	1	0.455	0.435	1.044	0.450	0.450	1.000	0.019	0.442	0.044	o. A.
	2	0.568	0.436	1.304	0.563	0.450	1.250	0.133	0.480	0.276	0.007
	3	0.684	0.436	1.568	0.675	0.450	1.500	0.248	0.519	0.478	0.009
	4	0.803	0.434	1.849	0.788	0.450	1.750	0.368	0.557	0.661	0.015
	5	0.913	0.435	2.102	0.900	0.450	2.000	0.479	0.594	0.806	0.018
	6	1.031	0.435	2.370	1.013	0.450	2.250	0.596	0.634	0.940	0.021
	7	1.145	0.436	2.629	1.125	0.450	2.500	0.709	0.672	1.056	0.024
		0.000	0.000								
IV	1	0.533	0.498	1.069	0.525	0.525	1.000	0.035	0.510	0.068	o. A.
	2	0.669	0.502	1.335	0.656	0.525	1.250	0.168	0.557	0.301	0.009
	3	0.804	0.505	1.593	0.788	0.525	1.500	0.299	0.604	0.495	0.014
	4	0.935	0.508	1.842	0.919	0.525	1.750	0.428	0.650	0.658	0.018
	5	1.068	0.505	2.112	1.050	0.525	2.001	0.562	0.693	0.812	0.021
	6	1.205	0.504	2.393	1.182	0.525	2.251	0.701	0.737	0.951	0.025
	7	1.336	0.506	2.639	1.313	0.525	2.501	0.829	0.783	1.060	0.029

## Übersicht der Versuchsdaten - Multi-Stage-Versuche

- mit thermischer Beeinflussung (Phasenübergang - Abkühlung/Erwärmung)

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,219

TP-F1

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,141	1,094	1,500	1,500	1,000	0,013	0,146	0,091	0,068
	2	0,213	0,141	1,510	2,083	1,500	1,389	0,072	0,165	0,436	0,101
	3	0,271	0,141	1,925	2,667	1,500	1,778	0,130	0,184	0,707	0,135
	4	0,331	0,141	2,354	3,250	1,500	2,167	0,191	0,204	0,933	0,168
	5	0,372	0,141	2,644	3,833	1,500	2,556	0,231	0,218	1,062	0,193
II	1	0,230	0,210	1,094	2,250	2,250	1,000	0,020	0,217	0,091	0,103
	2	0,299	0,210	1,422	2,958	2,250	1,315	0,089	0,240	0,370	0,141
	3	0,373	0,211	1,771	3,667	2,250	1,630	0,162	0,265	0,614	0,180
	4	0,445	0,211	2,114	4,375	2,250	1,944	0,234	0,289	0,812	0,222
	5	0,520	0,211	2,469	5,083	2,250	2,259	0,309	0,314	0,986	0,269
III	1	0,304	0,283	1,073	3,000	3,000	1,000	0,021	0,290	0,072	0,144
	2	0,389	0,283	1,373	3,833	3,000	1,278	0,106	0,318	0,332	0,188
	3	0,473	0,283	1,669	4,667	3,000	1,556	0,189	0,346	0,547	0,234
	4	0,559	0,283	1,973	5,500	3,000	1,833	0,276	0,375	0,735	0,279
	5	0,591	0,283	2,088	6,333	3,000	2,111	0,308	0,386	0,798	0,299
IV	1	0,379	0,335	1,130	0,375	0,375	1,000	0,044	0,350	0,124	0,182
	2	0,460	0,335	1,371	0,454	0,375	1,210	0,124	0,377	0,330	0,227
	3	0,542	0,335	1,617	0,533	0,375	1,420	0,207	0,404	0,511	0,264
	4	0,622	0,335	1,853	0,611	0,375	1,630	0,286	0,431	0,664	0,305
	5	0,701	0,336	2,090	0,690	0,375	1,840	0,366	0,457	0,800	0,344
V	1	0,457	0,435	1,049	0,450	0,450	1,000	0,021	0,442	0,049	0,214
	2	0,527	0,435	1,210	0,520	0,450	1,154	0,092	0,466	0,196	0,250
	3	0,600	0,436	1,377	0,589	0,450	1,309	0,164	0,490	0,335	0,284
	4	0,671	0,436	1,541	0,659	0,450	1,463	0,235	0,514	0,458	0,320
	5	0,742	0,435	1,704	0,728	0,450	1,618	0,306	0,538	0,570	0,353

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,696

TP-F2

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,140	1,106	1,500	1,500	1,000	0,015	0,145	0,102	0,051
	2	0,213	0,140	1,522	2,083	1,500	1,389	0,073	0,165	0,445	0,075
	3	0,273	0,140	1,944	2,667	1,500	1,778	0,132	0,184	0,718	0,103
	4	0,331	0,140	2,361	3,250	1,500	2,167	0,191	0,204	0,936	0,128
	5	0,374	0,140	2,669	3,833	1,500	2,556	0,234	0,218	1,073	0,149
II	1	0,230	0,210	1,092	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,089	0,072
	2	0,301	0,211	1,428	2,958	2,250	1,315	0,090	0,241	0,374	0,104
	3	0,374	0,211	1,776	3,667	2,250	1,630	0,163	0,265	0,617	0,134
	4	0,444	0,211	2,109	4,375	2,250	1,944	0,234	0,288	0,810	0,166
	5	0,519	0,211	2,466	5,083	2,250	2,259	0,309	0,313	0,985	0,197
III	1	0,306	0,283	1,080	3,000	3,000	1,000	0,023	0,291	0,078	0,095
	2	0,391	0,283	1,380	3,833	3,000	1,278	0,108	0,319	0,337	0,130
	3	0,475	0,283	1,676	4,667	3,000	1,556	0,191	0,347	0,551	0,164
	4	0,558	0,283	1,968	5,500	3,000	1,833	0,274	0,375	0,732	0,199
	5	0,589	0,283	2,080	6,333	3,000	2,111	0,306	0,385	0,794	0,210
IV	1	0,382	0,336	1,139	0,375	0,375	1,000	0,047	0,351	0,132	0,117
	2	0,461	0,336	1,375	0,454	0,375	1,210	0,126	0,377	0,333	0,150
	3	0,542	0,336	1,614	0,533	0,375	1,420	0,206	0,404	0,510	0,182
	4	0,621	0,336	1,850	0,611	0,375	1,630	0,285	0,431	0,662	0,210
	5	0,704	0,336	2,097	0,690	0,375	1,840	0,368	0,458	0,803	0,237
V	1	0,456	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,021	0,442	0,047	0,134
	2	0,527	0,436	1,210	0,520	0,450	1,154	0,091	0,466	0,196	0,161
	3	0,598	0,436	1,372	0,589	0,450	1,309	0,162	0,490	0,331	0,186
	4	0,669	0,436	1,536	0,659	0,450	1,463	0,234	0,514	0,455	0,210
	5	0,739	0,436	1,695	0,728	0,450	1,618	0,303	0,537	0,564	0,233

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,025

TP-F3

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,141	1,102	1,500	1,500	1,000	0,014	0,146	0,099	0,036
	2	0,213	0,141	1,517	2,083	1,500	1,389	0,073	0,165	0,441	0,053
	3	0,272	0,140	1,940	2,667	1,500	1,778	0,132	0,184	0,716	0,073
	4	0,332	0,140	2,367	3,250	1,500	2,167	0,192	0,204	0,939	0,092
	5	0,374	0,140	2,666	3,833	1,500	2,556	0,234	0,218	1,071	0,108
II	1	0,230	0,211	1,090	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,087	0,050
	2	0,301	0,211	1,427	2,958	2,250	1,315	0,090	0,241	0,374	0,074
	3	0,373	0,211	1,768	3,667	2,250	1,630	0,162	0,265	0,612	0,100
	4	0,446	0,211	2,116	4,375	2,250	1,944	0,235	0,289	0,813	0,122
	5	0,520	0,211	2,467	5,083	2,250	2,259	0,309	0,314	0,985	0,147
III	1	0,306	0,283	1,080	3,000	3,000	1,000	0,023	0,291	0,078	0,066
	2	0,388	0,283	1,370	3,833	3,000	1,278	0,105	0,318	0,329	0,095
	3	0,473	0,283	1,670	4,667	3,000	1,556	0,190	0,347	0,548	0,124
	4	0,559	0,283	1,973	5,500	3,000	1,833	0,276	0,375	0,735	0,152
	5	0,591	0,283	2,084	6,333	3,000	2,111	0,307	0,386	0,796	0,160
IV	1	0,380	0,336	1,134	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,128	0,086
	2	0,460	0,336	1,372	0,454	0,375	1,210	0,125	0,377	0,331	0,112
	3	0,543	0,336	1,619	0,533	0,375	1,420	0,208	0,405	0,513	0,137
	4	0,620	0,336	1,848	0,611	0,375	1,630	0,285	0,430	0,661	0,161
	5	0,702	0,336	2,091	0,690	0,375	1,840	0,366	0,458	0,800	0,182
V	1	0,457	0,435	1,049	0,450	0,450	1,000	0,022	0,443	0,049	0,101
	2	0,528	0,435	1,214	0,520	0,450	1,154	0,093	0,466	0,199	0,122
	3	0,599	0,436	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,490	0,332	0,141
	4	0,670	0,436	1,537	0,659	0,450	1,463	0,234	0,514	0,456	0,163
	5	0,742	0,436	1,702	0,728	0,450	1,618	0,306	0,538	0,569	0,179

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,225

TP-F4

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,092	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,090	0,040
	2	0,301	0,211	1,430	2,958	2,250	1,315	0,091	0,241	0,376	0,058
	3	0,371	0,211	1,761	3,667	2,250	1,630	0,160	0,264	0,607	0,078
	4	0,447	0,211	2,117	4,375	2,250	1,944	0,236	0,289	0,814	0,101
	5	0,518	0,211	2,455	5,083	2,250	2,259	0,307	0,313	0,980	0,122
II	1	0,305	0,283	1,078	3,000	3,000	1,000	0,022	0,291	0,076	0,054
	2	0,388	0,283	1,369	3,833	3,000	1,278	0,105	0,318	0,329	0,078
	3	0,473	0,283	1,669	4,667	3,000	1,556	0,190	0,347	0,547	0,103
	4	0,558	0,283	1,969	5,500	3,000	1,833	0,275	0,375	0,732	0,124
	5	0,591	0,283	2,085	6,333	3,000	2,111	0,308	0,386	0,797	0,133
III	1	0,380	0,336	1,133	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,128	0,072
	2	0,460	0,336	1,371	0,454	0,375	1,210	0,125	0,377	0,330	0,093
	3	0,542	0,336	1,616	0,533	0,375	1,420	0,207	0,405	0,511	0,114
	4	0,620	0,336	1,847	0,611	0,375	1,630	0,284	0,430	0,661	0,133
	5	0,702	0,336	2,091	0,690	0,375	1,840	0,366	0,458	0,800	0,150
IV	1	0,457	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,046	0,086
	2	0,530	0,436	1,215	0,520	0,450	1,154	0,094	0,467	0,201	0,101
	3	0,598	0,436	1,372	0,589	0,450	1,309	0,162	0,490	0,331	0,120
	4	0,669	0,436	1,536	0,659	0,450	1,463	0,234	0,514	0,455	0,136
	5	0,742	0,436	1,701	0,728	0,450	1,618	0,306	0,538	0,568	0,151
V	1	0,533	0,511	1,043	0,525	0,525	1,000	0,022	0,519	0,042	0,097
	2	0,616	0,511	1,206	0,606	0,525	1,155	0,105	0,546	0,193	0,116
	3	0,699	0,511	1,366	0,688	0,525	1,310	0,187	0,574	0,326	0,136
	4	0,782	0,512	1,527	0,769	0,525	1,464	0,270	0,602	0,448	0,150
	5	0,865	0,512	1,689	0,850	0,525	1,619	0,353	0,630	0,561	0,170

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,308

TP-F5

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,093	2,250	2,250	1,000	0,020	0,217	0,090	0,034
	2	0,301	0,211	1,426	2,958	2,250	1,315	0,090	0,241	0,373	0,051
	3	0,373	0,211	1,765	3,667	2,250	1,630	0,161	0,265	0,609	0,072
	4	0,447	0,211	2,116	4,375	2,250	1,944	0,236	0,290	0,813	0,091
	5	0,519	0,211	2,459	5,083	2,250	2,259	0,308	0,314	0,982	0,106
II	1	0,305	0,284	1,076	3,000	3,000	1,000	0,022	0,291	0,074	0,049
	2	0,388	0,284	1,370	3,833	3,000	1,278	0,105	0,319	0,329	0,071
	3	0,473	0,284	1,669	4,667	3,000	1,556	0,190	0,347	0,547	0,090
	4	0,558	0,284	1,967	5,500	3,000	1,833	0,274	0,375	0,731	0,111
	5	0,590	0,284	2,082	6,333	3,000	2,111	0,307	0,386	0,795	0,115
III	1	0,381	0,336	1,134	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,128	0,063
	2	0,461	0,336	1,372	0,454	0,375	1,210	0,125	0,377	0,331	0,084
	3	0,543	0,336	1,619	0,533	0,375	1,420	0,208	0,405	0,513	0,102
	4	0,622	0,336	1,852	0,611	0,375	1,630	0,286	0,431	0,664	0,117
	5	0,701	0,336	2,088	0,690	0,375	1,840	0,365	0,457	0,799	0,133
IV	1	0,456	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,020	0,443	0,046	0,076
	2	0,528	0,436	1,212	0,520	0,450	1,154	0,092	0,467	0,198	0,090
	3	0,599	0,436	1,372	0,589	0,450	1,309	0,162	0,491	0,331	0,106
	4	0,668	0,436	1,531	0,659	0,450	1,463	0,232	0,513	0,451	0,121
	5	0,741	0,436	1,697	0,728	0,450	1,618	0,304	0,538	0,566	0,134
V	1	0,533	0,511	1,042	0,525	0,525	1,000	0,022	0,519	0,042	0,084
	2	0,668	0,512	1,305	0,606	0,525	1,155	0,156	0,564	0,277	0,115
	3	0,802	0,512	1,566	0,688	0,525	1,310	0,290	0,608	0,476	0,139
	4	0,935	0,512	1,827	0,769	0,525	1,464	0,423	0,653	0,648	0,161
	5	1,070	0,512	2,090	0,850	0,525	1,619	0,558	0,698	0,799	0,188



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,313

TP-F6

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,091	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,088	0,031
	2	0,301	0,211	1,425	2,958	2,250	1,315	0,090	0,241	0,372	0,048
	3	0,372	0,211	1,763	3,667	2,250	1,630	0,161	0,265	0,609	0,068
	4	0,446	0,211	2,113	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,812	0,088
	5	0,519	0,211	2,459	5,083	2,250	2,259	0,308	0,314	0,982	0,103
II	1	0,305	0,284	1,074	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,073	0,046
	2	0,389	0,284	1,372	3,833	3,000	1,278	0,105	0,319	0,331	0,066
	3	0,473	0,284	1,668	4,667	3,000	1,556	0,190	0,347	0,546	0,085
	4	0,559	0,284	1,969	5,500	3,000	1,833	0,275	0,376	0,733	0,104
	5	0,591	0,284	2,082	6,333	3,000	2,111	0,307	0,386	0,795	0,111
III	1	0,381	0,336	1,135	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,129	0,062
	2	0,460	0,336	1,370	0,454	0,375	1,210	0,124	0,377	0,329	0,079
	3	0,543	0,336	1,615	0,533	0,375	1,420	0,207	0,405	0,511	0,094
	4	0,623	0,336	1,855	0,611	0,375	1,630	0,287	0,432	0,665	0,111
	5	0,702	0,336	2,089	0,690	0,375	1,840	0,366	0,458	0,799	0,127
IV	1	0,457	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,047	0,071
	2	0,527	0,436	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,466	0,196	0,084
	3	0,599	0,436	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,490	0,332	0,101
	4	0,670	0,436	1,538	0,659	0,450	1,463	0,234	0,514	0,456	0,112
	5	0,741	0,436	1,699	0,728	0,450	1,618	0,305	0,538	0,567	0,127
V	1	0,533	0,511	1,043	0,525	0,525	1,000	0,022	0,519	0,043	0,082
	2	0,616	0,511	1,205	0,606	0,525	1,155	0,105	0,546	0,192	0,096
	3	0,701	0,511	1,370	0,688	0,525	1,310	0,189	0,574	0,329	0,112
	4	0,783	0,511	1,534	0,769	0,525	1,464	0,273	0,602	0,453	0,127
	5	0,867	0,511	1,697	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,566	0,139

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,317

TP-F7

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,089	2,250	2,250	1,000	0,019	0,218	0,086	0,031
	2	0,300	0,211	1,420	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,369	0,046
	3	0,373	0,212	1,766	3,667	2,250	1,630	0,162	0,265	0,610	0,065
	4	0,447	0,212	2,111	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,811	0,081
	5	0,520	0,212	2,460	5,083	2,250	2,259	0,309	0,314	0,982	0,095
II	1	0,305	0,284	1,074	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,073	0,045
	2	0,390	0,284	1,374	3,833	3,000	1,278	0,106	0,319	0,332	0,065
	3	0,473	0,284	1,668	4,667	3,000	1,556	0,190	0,347	0,546	0,080
	4	0,558	0,284	1,964	5,500	3,000	1,833	0,274	0,375	0,730	0,096
	5	0,592	0,284	2,085	6,333	3,000	2,111	0,308	0,386	0,797	0,102
III	1	0,383	0,336	1,139	0,375	0,375	1,000	0,047	0,351	0,133	0,056
	2	0,460	0,336	1,370	0,454	0,375	1,210	0,124	0,377	0,329	0,074
	3	0,542	0,336	1,614	0,533	0,375	1,420	0,206	0,405	0,510	0,089
	4	0,621	0,336	1,848	0,611	0,375	1,630	0,285	0,431	0,661	0,104
	5	0,703	0,336	2,093	0,690	0,375	1,840	0,367	0,458	0,801	0,116
IV	1	0,457	0,436	1,048	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,047	0,065
	2	0,526	0,436	1,207	0,520	0,450	1,154	0,090	0,466	0,194	0,083
	3	0,599	0,437	1,372	0,589	0,450	1,309	0,163	0,491	0,331	0,094
	4	0,669	0,436	1,535	0,659	0,450	1,463	0,233	0,514	0,454	0,105
	5	0,739	0,437	1,692	0,728	0,450	1,618	0,302	0,537	0,563	0,118
V	1	0,533	0,512	1,041	0,525	0,525	1,000	0,021	0,519	0,040	0,075
	2	0,616	0,511	1,204	0,606	0,525	1,155	0,104	0,546	0,191	0,090
	3	0,699	0,512	1,364	0,688	0,525	1,310	0,186	0,574	0,325	0,103
	4	0,783	0,511	1,533	0,769	0,525	1,464	0,272	0,602	0,452	0,119
	5	0,867	0,511	1,698	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,566	0,130

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,325

TP-F8

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,088	2,250	2,250	1,000	0,019	0,218	0,085	0,029
	2	0,300	0,211	1,421	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,369	0,046
	3	0,372	0,212	1,760	3,667	2,250	1,630	0,161	0,265	0,606	0,062
	4	0,446	0,212	2,108	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,809	0,076
	5	0,520	0,212	2,458	5,083	2,250	2,259	0,309	0,314	0,981	0,090
		0,000	0,000								
II	1	0,305	0,284	1,074	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,073	0,043
	2	0,390	0,284	1,374	3,833	3,000	1,278	0,106	0,319	0,332	0,061
	3	0,473	0,284	1,667	4,667	3,000	1,556	0,189	0,347	0,546	0,078
	4	0,558	0,284	1,965	5,500	3,000	1,833	0,274	0,375	0,730	0,093
	5	0,593	0,284	2,088	6,333	3,000	2,111	0,309	0,387	0,798	0,099
		0,000	0,000								
II	1	0,383	0,336	1,139	0,375	0,375	1,000	0,047	0,351	0,133	0,056
	2	0,460	0,336	1,370	0,454	0,375	1,210	0,124	0,377	0,329	0,071
	3	0,542	0,336	1,614	0,533	0,375	1,420	0,206	0,405	0,510	0,085
	4	0,622	0,336	1,851	0,611	0,375	1,630	0,286	0,431	0,663	0,099
	5	0,704	0,336	2,095	0,690	0,375	1,840	0,368	0,458	0,802	0,114
		0,000	0,000								
IV	1	0,457	0,437	1,046	0,450	0,450	1,000	0,020	0,443	0,046	0,062
	2	0,526	0,437	1,204	0,520	0,450	1,154	0,089	0,466	0,191	0,075
	3	0,599	0,438	1,368	0,589	0,450	1,309	0,161	0,491	0,328	0,089
	4	0,669	0,437	1,533	0,659	0,450	1,463	0,233	0,514	0,452	0,100
	5	0,739	0,437	1,692	0,728	0,450	1,618	0,302	0,538	0,562	0,112
		0,000	0,000								
V	1	0,533	0,512	1,041	0,525	0,525	1,000	0,021	0,519	0,041	0,073
	2	0,616	0,511	1,206	0,606	0,525	1,155	0,105	0,546	0,193	0,086
	3	0,699	0,512	1,366	0,688	0,525	1,310	0,188	0,574	0,326	0,099
	4	0,783	0,512	1,531	0,769	0,525	1,464	0,271	0,602	0,451	0,110
	5	0,869	0,511	1,699	0,850	0,525	1,619	0,357	0,630	0,567	0,124

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,329

TP-F9

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,212	1,086	2,250	2,250	1,000	0,018	0,218	0,083	0,029
	2	0,301	0,212	1,418	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,367	0,046
	3	0,373	0,212	1,760	3,667	2,250	1,630	0,161	0,266	0,606	0,061
	4	0,446	0,212	2,105	4,375	2,250	1,944	0,234	0,290	0,808	0,074
	5	0,520	0,212	2,453	5,083	2,250	2,259	0,308	0,315	0,979	0,085
II	1	0,305	0,284	1,074	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,072	0,043
	2	0,390	0,284	1,371	3,833	3,000	1,278	0,105	0,319	0,330	0,059
	3	0,473	0,284	1,665	4,667	3,000	1,556	0,189	0,347	0,544	0,074
	4	0,557	0,284	1,961	5,500	3,000	1,833	0,273	0,375	0,728	0,089
	5	0,592	0,284	2,084	6,333	3,000	2,111	0,308	0,387	0,796	0,095
III	1	0,383	0,336	1,140	0,375	0,375	1,000	0,047	0,352	0,134	0,052
	2	0,461	0,336	1,372	0,454	0,375	1,210	0,125	0,377	0,331	0,067
	3	0,540	0,336	1,609	0,533	0,375	1,420	0,204	0,404	0,506	0,083
	4	0,621	0,336	1,850	0,611	0,375	1,630	0,285	0,431	0,662	0,097
	5	0,703	0,336	2,093	0,690	0,375	1,840	0,367	0,458	0,801	0,108
IV	1	0,457	0,436	1,048	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,048	0,061
	2	0,526	0,436	1,205	0,520	0,450	1,154	0,089	0,466	0,192	0,073
	3	0,599	0,436	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,490	0,333	0,086
	4	0,669	0,436	1,535	0,659	0,450	1,463	0,233	0,513	0,454	0,096
	5	0,740	0,436	1,696	0,728	0,450	1,618	0,303	0,537	0,565	0,104
V	1	0,533	0,511	1,043	0,525	0,525	1,000	0,022	0,518	0,043	0,070
	2	0,615	0,511	1,204	0,606	0,525	1,155	0,104	0,545	0,191	0,083
	3	0,699	0,512	1,365	0,688	0,525	1,310	0,187	0,574	0,326	0,097
	4	0,784	0,511	1,535	0,769	0,525	1,464	0,273	0,602	0,454	0,106
	5	0,867	0,511	1,696	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,565	0,120

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,511

TP-F10

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,212	1,083	2,250	2,250	1,000	0,018	0,218	0,080	0,028
	2	0,301	0,212	1,416	2,958	2,250	1,315	0,088	0,242	0,365	0,043
	3	0,373	0,212	1,755	3,667	2,250	1,630	0,160	0,266	0,603	0,059
	4	0,446	0,212	2,101	4,375	2,250	1,944	0,234	0,290	0,805	0,071
	5	0,520	0,212	2,447	5,083	2,250	2,259	0,307	0,315	0,976	0,084
II	1	0,305	0,284	1,070	3,000	3,000	1,000	0,020	0,291	0,069	0,041
	2	0,390	0,284	1,371	3,833	3,000	1,278	0,106	0,320	0,330	0,056
	3	0,473	0,284	1,665	4,667	3,000	1,556	0,189	0,347	0,544	0,071
	4	0,557	0,284	1,959	5,500	3,000	1,833	0,273	0,375	0,727	0,086
	5	0,592	0,284	2,083	6,333	3,000	2,111	0,308	0,387	0,796	0,091
III	1	0,382	0,336	1,137	0,375	0,375	1,000	0,046	0,351	0,131	0,053
	2	0,461	0,336	1,372	0,454	0,375	1,210	0,125	0,378	0,331	0,066
	3	0,540	0,336	1,606	0,533	0,375	1,420	0,204	0,404	0,504	0,081
	4	0,620	0,336	1,846	0,611	0,375	1,630	0,284	0,431	0,660	0,094
	5	0,702	0,336	2,088	0,690	0,375	1,840	0,366	0,458	0,798	0,105
IV	1	0,457	0,436	1,049	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,048	0,058
	2	0,526	0,435	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,466	0,195	0,071
	3	0,600	0,436	1,375	0,589	0,450	1,309	0,164	0,491	0,334	0,082
	4	0,668	0,437	1,529	0,659	0,450	1,463	0,231	0,514	0,449	0,093
	5	0,739	0,436	1,695	0,728	0,450	1,618	0,303	0,537	0,564	0,104
V	1	0,532	0,510	1,045	0,525	0,525	1,000	0,023	0,517	0,044	0,066
	2	0,616	0,511	1,206	0,606	0,525	1,155	0,105	0,546	0,192	0,079
	3	0,699	0,511	1,369	0,688	0,525	1,310	0,189	0,574	0,329	0,094
	4	0,784	0,508	1,542	0,769	0,525	1,464	0,275	0,600	0,459	0,104
	5	0,868	0,511	1,699	0,850	0,525	1,619	0,357	0,630	0,567	0,116

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,59

TP-T1

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,222	1,038	2,250	2,250	1,000	0,008	0,224	0,038	0,074
	2	2,958	2,250	1,315	2,958	2,250	1,315	0,708	2,486	0,285	0,139
	3	3,667	2,250	1,630	3,667	2,250	1,630	1,417	2,722	0,520	0,202
	4	4,375	2,250	1,944	4,375	2,250	1,944	2,125	2,958	0,718	0,268
	5	5,083	2,250	2,259	5,083	2,250	2,259	2,833	3,194	0,887	0,338
II	1	3,000	3,000	1,000	3,000	3,000	1,000	0,000	3,000	0,000	0,112
	2	3,833	3,000	1,278	3,833	3,000	1,278	0,833	3,278	0,254	0,195
	3	4,667	3,000	1,556	4,667	3,000	1,556	1,667	3,556	0,469	0,274
	4	5,500	3,000	1,833	5,500	3,000	1,833	2,500	3,833	0,652	0,347
	5	6,333	3,000	2,111	6,333	3,000	2,111	3,333	4,111	0,811	0,379
III	1	0,375	0,375	1,000	0,375	0,375	1,000	0,000	0,375	0,000	0,174
	2	0,454	0,375	1,210	0,454	0,375	1,210	0,079	0,401	0,196	0,252
	3	0,533	0,375	1,420	0,533	0,375	1,420	0,158	0,428	0,368	0,325
	4	0,611	0,375	1,630	0,611	0,375	1,630	0,236	0,454	0,521	0,393
	5	0,690	0,375	1,840	0,690	0,375	1,840	0,315	0,480	0,656	0,461
IV	1	0,450	0,450	1,000	0,450	0,450	1,000	0,000	0,450	0,000	0,208
	2	0,520	0,450	1,154	0,520	0,450	1,154	0,070	0,473	0,147	0,280
	3	0,589	0,450	1,309	0,589	0,450	1,309	0,139	0,496	0,280	0,347
	4	0,659	0,450	1,463	0,659	0,450	1,463	0,209	0,520	0,401	0,409
	5	0,728	0,450	1,618	0,728	0,450	1,618	0,278	0,543	0,512	0,466
V	1	0,525	0,525	1,000	0,525	0,525	1,000	0,000	0,525	0,000	0,268
	2	0,606	0,525	1,155	0,606	0,525	1,155	0,081	0,552	0,147	0,347
	3	0,688	0,525	1,310	0,688	0,525	1,310	0,163	0,579	0,281	0,419
	4	0,769	0,525	1,464	0,769	0,525	1,464	0,244	0,606	0,402	0,486
	5	0,850	0,525	1,619	0,850	0,525	1,619	0,325	0,633	0,513	0,556

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,04

TP-T2

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,221	1,041	2,250	2,250	1,000	0,009	0,224	0,040	0,188
	2	0,301	0,221	1,360	2,958	2,250	1,315	0,080	0,248	0,321	0,283
	3	0,373	0,222	1,684	3,667	2,250	1,630	0,152	0,272	0,557	0,376
	4	0,445	0,222	2,010	4,375	2,250	1,944	0,224	0,296	0,756	0,463
	5	0,520	0,222	2,346	5,083	2,250	2,259	0,298	0,321	0,929	0,549
II	1	0,305	0,294	1,037	3,000	3,000	1,000	0,011	0,298	0,036	0,242
	2	0,390	0,295	1,325	3,833	3,000	1,278	0,096	0,326	0,294	0,357
	3	0,476	0,295	1,615	4,667	3,000	1,556	0,181	0,355	0,510	0,462
	4	0,561	0,295	1,903	5,500	3,000	1,833	0,266	0,383	0,694	0,555
	5	0,593	0,295	2,013	6,333	3,000	2,111	0,298	0,394	0,757	0,591
III	1	0,382	0,347	1,100	0,375	0,375	1,000	0,035	0,359	0,097	0,327
	2	0,463	0,347	1,333	0,454	0,375	1,210	0,116	0,386	0,300	0,430
	3	0,544	0,347	1,565	0,533	0,375	1,420	0,196	0,413	0,475	0,521
	4	0,624	0,347	1,796	0,611	0,375	1,630	0,277	0,440	0,629	0,605
	5	0,704	0,347	2,028	0,690	0,375	1,840	0,357	0,466	0,766	0,690
IV	1	0,459	0,446	1,029	0,450	0,450	1,000	0,013	0,450	0,029	0,372
	2	0,530	0,446	1,188	0,520	0,450	1,154	0,084	0,474	0,177	0,454
	3	0,601	0,446	1,348	0,589	0,450	1,309	0,155	0,497	0,312	0,536
	4	0,672	0,446	1,508	0,659	0,450	1,463	0,226	0,521	0,434	0,611
	5	0,743	0,446	1,667	0,728	0,450	1,618	0,297	0,545	0,546	0,683
V	1	0,535	0,520	1,030	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,030	0,440
	2	0,619	0,520	1,190	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,531
	3	0,702	0,520	1,350	0,688	0,525	1,310	0,182	0,580	0,313	0,618
	4	0,785	0,520	1,511	0,769	0,525	1,464	0,266	0,608	0,437	0,699
	5	0,867	0,520	1,668	0,850	0,525	1,619	0,347	0,636	0,547	0,778

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,72

TP-T3

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,231	0,221	1,043	2,250	2,250	1,000	0,010	0,224	0,043	0,332
	2	0,302	0,221	1,364	2,958	2,250	1,315	0,080	0,248	0,324	0,439
	3	0,374	0,221	1,688	3,667	2,250	1,630	0,152	0,272	0,560	0,537
	4	0,446	0,221	2,014	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,758	0,648
	5	0,521	0,222	2,351	5,083	2,250	2,259	0,299	0,321	0,931	0,761
II	1	0,306	0,294	1,039	3,000	3,000	1,000	0,011	0,298	0,038	0,385
	2	0,391	0,294	1,328	3,833	3,000	1,278	0,096	0,327	0,295	0,513
	3	0,476	0,294	1,616	4,667	3,000	1,556	0,181	0,355	0,511	0,639
	4	0,561	0,295	1,904	5,500	3,000	1,833	0,266	0,383	0,695	0,751
	5	0,594	0,295	2,014	6,333	3,000	2,111	0,299	0,394	0,758	0,795
III	1	0,382	0,347	1,101	0,375	0,375	1,000	0,035	0,359	0,097	0,473
	2	0,463	0,347	1,333	0,454	0,375	1,210	0,115	0,386	0,299	0,593
	3	0,544	0,347	1,565	0,533	0,375	1,420	0,196	0,413	0,476	0,694
	4	0,624	0,347	1,796	0,611	0,375	1,630	0,276	0,440	0,629	0,792
	5	0,704	0,347	2,027	0,690	0,375	1,840	0,357	0,466	0,765	0,886
IV	1	0,459	0,446	1,029	0,450	0,450	1,000	0,013	0,450	0,029	0,519
	2	0,530	0,446	1,189	0,520	0,450	1,154	0,084	0,474	0,178	0,613
	3	0,601	0,446	1,349	0,589	0,450	1,309	0,155	0,498	0,312	0,699
	4	0,673	0,446	1,509	0,659	0,450	1,463	0,227	0,521	0,435	0,781
	5	0,743	0,446	1,667	0,728	0,450	1,618	0,297	0,545	0,546	0,858
		0,000	0,000								
V	1	0,536	0,520	1,030	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,030	0,584
	2	0,619	0,520	1,190	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,678
	3	0,702	0,520	1,349	0,688	0,525	1,310	0,181	0,581	0,313	0,769
	4	0,785	0,520	1,510	0,769	0,525	1,464	0,265	0,608	0,436	0,854
	5	0,868	0,520	1,668	0,850	0,525	1,619	0,348	0,636	0,547	0,936



### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,50

TP-T4

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,231	0,221	1,046	2,250	2,250	1,000	0,010	0,224	0,045	0,447
	2	0,302	0,221	1,367	2,958	2,250	1,315	0,081	0,248	0,327	0,549
	3	0,374	0,221	1,690	3,667	2,250	1,630	0,153	0,272	0,561	0,646
	4	0,446	0,221	2,016	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,759	0,763
	5	0,521	0,221	2,354	5,083	2,250	2,259	0,300	0,321	0,933	0,903
II	1	0,306	0,294	1,040	3,000	3,000	1,000	0,012	0,298	0,039	0,484
	2	0,391	0,294	1,329	3,833	3,000	1,278	0,097	0,327	0,296	0,619
	3	0,476	0,294	1,617	4,667	3,000	1,556	0,182	0,355	0,512	0,756
	4	0,561	0,294	1,906	5,500	3,000	1,833	0,267	0,383	0,696	0,881
	5	0,593	0,294	2,016	6,333	3,000	2,111	0,299	0,394	0,759	0,932
III	1	0,383	0,347	1,103	0,375	0,375	1,000	0,036	0,359	0,100	0,575
	2	0,463	0,347	1,335	0,454	0,375	1,210	0,116	0,386	0,302	0,709
	3	0,544	0,347	1,567	0,533	0,375	1,420	0,197	0,412	0,477	0,822
	4	0,624	0,347	1,800	0,611	0,375	1,630	0,277	0,439	0,631	0,923
	5	0,705	0,347	2,032	0,690	0,375	1,840	0,358	0,466	0,768	1,029
IV	1	0,459	0,445	1,031	0,450	0,450	1,000	0,014	0,450	0,031	0,619
	2	0,530	0,445	1,191	0,520	0,450	1,154	0,085	0,474	0,179	0,717
	3	0,601	0,445	1,350	0,589	0,450	1,309	0,156	0,497	0,314	0,808
	4	0,673	0,445	1,511	0,659	0,450	1,463	0,227	0,521	0,436	0,889
	5	0,743	0,445	1,668	0,728	0,450	1,618	0,298	0,545	0,546	0,970
V	1	0,536	0,520	1,031	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,030	0,668
	2	0,619	0,520	1,190	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,769
	3	0,702	0,520	1,350	0,688	0,525	1,310	0,182	0,581	0,314	0,859
	4	0,785	0,520	1,509	0,769	0,525	1,464	0,265	0,608	0,435	0,940
	5	0,868	0,520	1,669	0,850	0,525	1,619	0,348	0,636	0,547	1,021

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,37

TP-T5

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,231	0,221	1,047	2,250	2,250	1,000	0,010	0,224	0,046	0,478
	2	0,302	0,221	1,367	2,958	2,250	1,315	0,081	0,248	0,327	0,582
	3	0,374	0,221	1,692	3,667	2,250	1,630	0,153	0,272	0,563	0,678
	4	0,447	0,221	2,017	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,760	0,791
	5	0,521	0,221	2,354	5,083	2,250	2,259	0,300	0,321	0,933	0,927
II	1	0,306	0,294	1,040	3,000	3,000	1,000	0,012	0,298	0,039	0,504
	2	0,391	0,294	1,330	3,833	3,000	1,278	0,097	0,327	0,297	0,638
	3	0,476	0,294	1,617	4,667	3,000	1,556	0,182	0,355	0,512	0,777
	4	0,561	0,294	1,906	5,500	3,000	1,833	0,267	0,383	0,696	0,901
	5	0,594	0,294	2,016	6,333	3,000	2,111	0,299	0,394	0,759	0,944
III	1	0,383	0,347	1,103	0,375	0,375	1,000	0,036	0,359	0,100	0,584
	2	0,463	0,347	1,334	0,454	0,375	1,210	0,116	0,386	0,301	0,711
	3	0,544	0,347	1,566	0,533	0,375	1,420	0,197	0,413	0,476	0,821
	4	0,624	0,347	1,798	0,611	0,375	1,630	0,277	0,439	0,630	0,919
	5	0,705	0,347	2,030	0,690	0,375	1,840	0,358	0,467	0,767	1,016
IV	1	0,459	0,445	1,031	0,450	0,450	1,000	0,014	0,450	0,031	0,620
	2	0,530	0,445	1,191	0,520	0,450	1,154	0,085	0,474	0,180	0,710
	3	0,601	0,446	1,350	0,589	0,450	1,309	0,156	0,497	0,313	0,799
	4	0,672	0,446	1,509	0,659	0,450	1,463	0,227	0,521	0,435	0,881
	5	0,743	0,446	1,668	0,728	0,450	1,618	0,298	0,545	0,546	0,958
V	1	0,536	0,520	1,031	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,030	0,660
	2	0,619	0,520	1,190	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,762
	3	0,702	0,520	1,349	0,688	0,525	1,310	0,182	0,581	0,313	0,852
	4	0,785	0,520	1,510	0,769	0,525	1,464	0,265	0,609	0,436	0,937
	5	0,868	0,520	1,669	0,850	0,525	1,619	0,348	0,636	0,547	1,024

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,29

TP-T6

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,232	0,221	1,048	2,250	2,250	1,000	0,011	0,224	0,048	0,494
	2	0,302	0,221	1,367	2,958	2,250	1,315	0,081	0,248	0,327	0,592
	3	0,374	0,221	1,692	3,667	2,250	1,630	0,153	0,272	0,562	0,684
	4	0,447	0,221	2,017	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,760	0,786
	5	0,521	0,221	2,353	5,083	2,250	2,259	0,300	0,321	0,932	0,906
II	1	0,306	0,294	1,040	3,000	3,000	1,000	0,012	0,298	0,040	0,517
	2	0,391	0,294	1,329	3,833	3,000	1,278	0,097	0,327	0,296	0,642
	3	0,476	0,294	1,617	4,667	3,000	1,556	0,182	0,355	0,512	0,770
	4	0,561	0,294	1,905	5,500	3,000	1,833	0,267	0,383	0,695	0,885
	5	0,593	0,295	2,015	6,333	3,000	2,111	0,299	0,394	0,758	0,928
III	1	0,383	0,347	1,103	0,375	0,375	1,000	0,036	0,359	0,099	0,584
	2	0,463	0,347	1,335	0,454	0,375	1,210	0,116	0,386	0,301	0,712
	3	0,543	0,347	1,566	0,533	0,375	1,420	0,196	0,413	0,476	0,820
	4	0,624	0,347	1,798	0,611	0,375	1,630	0,277	0,439	0,630	0,915
	5	0,705	0,347	2,031	0,690	0,375	1,840	0,358	0,467	0,767	1,009
IV	1	0,459	0,445	1,032	0,450	0,450	1,000	0,014	0,450	0,031	0,625
	2	0,530	0,445	1,191	0,520	0,450	1,154	0,085	0,474	0,179	0,721
	3	0,601	0,445	1,350	0,589	0,450	1,309	0,156	0,497	0,313	0,811
	4	0,673	0,445	1,510	0,659	0,450	1,463	0,227	0,521	0,436	0,884
	5	0,743	0,446	1,668	0,728	0,450	1,618	0,298	0,545	0,546	0,953
V	1	0,536	0,520	1,031	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,031	0,663
	2	0,619	0,520	1,190	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,760
	3	0,702	0,520	1,350	0,688	0,525	1,310	0,182	0,580	0,313	0,855
	4	0,785	0,520	1,511	0,769	0,525	1,464	0,265	0,608	0,436	0,934
	5	0,868	0,520	1,669	0,850	0,525	1,619	0,348	0,636	0,547	1,014

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,23

TP-T7

Wassergehalt: w [M.-%] 2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,232	0,221	1,049	2,250	2,250	1,000	0,011	0,224	0,048	0,498
	2	0,302	0,221	1,367	2,958	2,250	1,315	0,081	0,248	0,327	0,605
	3	0,374	0,221	1,693	3,667	2,250	1,630	0,153	0,272	0,563	0,686
	4	0,446	0,221	2,017	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,760	0,776
	5	0,521	0,221	2,352	5,083	2,250	2,259	0,299	0,321	0,932	0,896
II	1	0,306	0,294	1,040	3,000	3,000	1,000	0,012	0,298	0,039	0,515
	2	0,391	0,295	1,328	3,833	3,000	1,278	0,097	0,327	0,296	0,633
	3	0,476	0,295	1,616	4,667	3,000	1,556	0,181	0,355	0,511	0,753
	4	0,561	0,295	1,904	5,500	3,000	1,833	0,266	0,383	0,695	0,861
	5	0,594	0,295	2,014	6,333	3,000	2,111	0,299	0,394	0,758	0,904
III	1	0,382	0,347	1,101	0,375	0,375	1,000	0,035	0,359	0,098	0,579
	2	0,463	0,347	1,334	0,454	0,375	1,210	0,116	0,386	0,301	0,688
	3	0,543	0,347	1,564	0,533	0,375	1,420	0,196	0,413	0,475	0,793
	4	0,624	0,347	1,796	0,611	0,375	1,630	0,277	0,440	0,629	0,885
	5	0,705	0,348	2,028	0,690	0,375	1,840	0,357	0,467	0,765	0,977
IV	1	0,459	0,446	1,030	0,450	0,450	1,000	0,014	0,450	0,030	0,607
	2	0,530	0,446	1,189	0,520	0,450	1,154	0,084	0,474	0,178	0,695
	3	0,601	0,446	1,349	0,589	0,450	1,309	0,156	0,498	0,313	0,779
	4	0,673	0,446	1,509	0,659	0,450	1,463	0,227	0,521	0,435	0,857
	5	0,743	0,446	1,668	0,728	0,450	1,618	0,298	0,545	0,546	0,928
V	1	0,536	0,520	1,031	0,525	0,525	1,000	0,016	0,525	0,031	0,651
	2	0,619	0,520	1,191	0,606	0,525	1,155	0,099	0,553	0,179	0,745
	3	0,701	0,520	1,348	0,688	0,525	1,310	0,181	0,580	0,312	0,833
	4	0,785	0,520	1,509	0,769	0,525	1,464	0,265	0,608	0,435	0,913
	5	0,868	0,520	1,669	0,850	0,525	1,619	0,348	0,636	0,547	0,991

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,19

TP-T8

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,157	0,147	1,068	2,250	2,250	1,000	0,010	0,150	0,066	0,500
	2	0,215	0,147	1,466	2,958	2,250	1,315	0,068	0,170	0,403	0,598
	3	0,274	0,147	1,863	3,667	2,250	1,630	0,127	0,189	0,670	0,675
	4	0,332	0,147	2,265	4,375	2,250	1,944	0,186	0,209	0,890	0,741
	5	0,375	0,147	2,558	5,083	2,250	2,259	0,229	0,223	1,025	0,796
II	1	0,231	0,221	1,046	3,000	3,000	1,000	0,010	0,224	0,046	0,505
	2	0,302	0,221	1,366	3,833	3,000	1,278	0,081	0,248	0,327	0,602
	3	0,374	0,221	1,693	4,667	3,000	1,556	0,153	0,272	0,563	0,684
	4	0,447	0,221	2,019	5,500	3,000	1,833	0,225	0,296	0,761	0,775
	5	0,521	0,221	2,353	6,333	3,000	2,111	0,299	0,321	0,932	0,886
III	1	0,306	0,295	1,040	0,375	0,375	1,000	0,012	0,298	0,039	0,522
	2	0,391	0,295	1,328	0,454	0,375	1,210	0,097	0,327	0,295	0,626
	3	0,476	0,295	1,616	0,533	0,375	1,420	0,181	0,355	0,511	0,741
	4	0,561	0,295	1,904	0,611	0,375	1,630	0,266	0,383	0,695	0,854
	5	0,593	0,295	2,013	0,690	0,375	1,840	0,299	0,394	0,757	0,892
IV	1	0,383	0,347	1,102	0,450	0,450	1,000	0,035	0,359	0,098	0,575
	2	0,463	0,347	1,334	0,520	0,450	1,154	0,116	0,386	0,300	0,681
	3	0,544	0,347	1,564	0,589	0,450	1,309	0,196	0,413	0,475	0,782
	4	0,624	0,347	1,797	0,659	0,450	1,463	0,277	0,440	0,630	0,877
	5	0,705	0,348	2,029	0,728	0,450	1,618	0,357	0,467	0,766	0,961
V	1	0,459	0,446	1,030	0,525	0,525	1,000	0,014	0,450	0,030	0,600
	2	0,530	0,446	1,189	0,606	0,525	1,155	0,084	0,474	0,178	0,688
	3	0,601	0,446	1,349	0,688	0,525	1,310	0,156	0,498	0,313	0,770
	4	0,672	0,446	1,508	0,769	0,525	1,464	0,226	0,521	0,434	0,848
	5	0,743	0,446	1,667	0,850	0,525	1,619	0,297	0,545	0,546	0,922

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,13

TP-T9

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,157	0,147	1,068	2,250	2,250	1,000	0,010	0,150	0,066	0,504
	2	0,215	0,147	1,466	2,958	2,250	1,315	0,068	0,170	0,403	0,597
	3	0,274	0,147	1,863	3,667	2,250	1,630	0,127	0,189	0,670	0,671
	4	0,333	0,147	2,264	4,375	2,250	1,944	0,186	0,209	0,890	0,736
	5	0,376	0,147	2,558	5,083	2,250	2,259	0,229	0,223	1,025	0,788
II	1	0,231	0,221	1,046	3,000	3,000	1,000	0,010	0,224	0,046	0,511
	2	0,302	0,221	1,365	3,833	3,000	1,278	0,081	0,248	0,326	0,600
	3	0,375	0,221	1,693	4,667	3,000	1,556	0,153	0,272	0,563	0,679
	4	0,447	0,221	2,018	5,500	3,000	1,833	0,225	0,296	0,760	0,766
	5	0,521	0,221	2,353	6,333	3,000	2,111	0,300	0,321	0,933	0,877
III	1	0,306	0,294	1,040	0,375	0,375	1,000	0,012	0,298	0,040	0,526
	2	0,391	0,295	1,328	0,454	0,375	1,210	0,097	0,327	0,296	0,629
	3	0,476	0,295	1,616	0,533	0,375	1,420	0,182	0,355	0,511	0,744
	4	0,561	0,295	1,904	0,611	0,375	1,630	0,266	0,383	0,695	0,851
	5	0,594	0,295	2,015	0,690	0,375	1,840	0,299	0,394	0,758	0,889
IV	1	0,383	0,347	1,102	0,450	0,450	1,000	0,036	0,359	0,099	0,573
	2	0,463	0,347	1,334	0,520	0,450	1,154	0,116	0,386	0,300	0,676
	3	0,543	0,347	1,564	0,589	0,450	1,309	0,196	0,413	0,475	0,777
	4	0,624	0,348	1,795	0,659	0,450	1,463	0,276	0,440	0,629	0,865
	5	0,705	0,348	2,027	0,728	0,450	1,618	0,357	0,467	0,765	0,949
V	1	0,459	0,446	1,030	0,525	0,525	1,000	0,013	0,450	0,029	0,588
	2	0,530	0,446	1,190	0,606	0,525	1,155	0,084	0,474	0,178	0,679
	3	0,601	0,446	1,348	0,688	0,525	1,310	0,155	0,498	0,312	0,759
	4	0,672	0,446	1,507	0,769	0,525	1,464	0,226	0,521	0,434	0,837
	5	0,743	0,446	1,666	0,850	0,525	1,619	0,297	0,545	0,545	0,906

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,06

TP-T10

Wassergehalt: w [M.-%]

2

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,157	0,147	1,068	2,250	2,250	1,000	0,010	0,150	0,066	0,508
	2	0,215	0,147	1,466	2,958	2,250	1,315	0,068	0,170	0,404	0,598
	3	0,274	0,147	1,865	3,667	2,250	1,630	0,127	0,189	0,671	0,671
	4	0,332	0,147	2,264	4,375	2,250	1,944	0,186	0,209	0,889	0,737
	5	0,375	0,147	2,556	5,083	2,250	2,259	0,228	0,223	1,024	0,783
II	1	0,231	0,221	1,047	3,000	3,000	1,000	0,010	0,224	0,046	0,512
	2	0,302	0,221	1,366	3,833	3,000	1,278	0,081	0,248	0,327	0,603
	3	0,374	0,221	1,692	4,667	3,000	1,556	0,153	0,272	0,563	0,681
	4	0,447	0,221	2,018	5,500	3,000	1,833	0,225	0,296	0,760	0,765
	5	0,521	0,221	2,353	6,333	3,000	2,111	0,300	0,321	0,932	0,866
III	1	0,306	0,295	1,040	0,375	0,375	1,000	0,012	0,298	0,040	0,520
	2	0,391	0,295	1,328	0,454	0,375	1,210	0,097	0,327	0,296	0,619
	3	0,476	0,295	1,615	0,533	0,375	1,420	0,181	0,355	0,511	0,727
	4	0,561	0,295	1,905	0,611	0,375	1,630	0,267	0,384	0,695	0,831
	5	0,594	0,295	2,014	0,690	0,375	1,840	0,299	0,394	0,758	0,872
IV	1	0,383	0,347	1,102	0,450	0,450	1,000	0,036	0,359	0,099	0,569
	2	0,463	0,348	1,332	0,520	0,450	1,154	0,116	0,386	0,299	0,662
	3	0,543	0,348	1,564	0,589	0,450	1,309	0,196	0,413	0,474	0,769
	4	0,625	0,348	1,797	0,659	0,450	1,463	0,277	0,440	0,630	0,857
	5	0,704	0,348	2,026	0,728	0,450	1,618	0,357	0,467	0,765	0,940
V	1	0,459	0,446	1,030	0,525	0,525	1,000	0,013	0,450	0,029	0,582
	2	0,530	0,446	1,189	0,606	0,525	1,155	0,084	0,474	0,178	0,673
	3	0,601	0,446	1,349	0,688	0,525	1,310	0,155	0,498	0,312	0,760
	4	0,672	0,446	1,507	0,769	0,525	1,464	0,226	0,521	0,434	0,833
	5	0,743	0,446	1,666	0,850	0,525	1,619	0,297	0,545	0,545	0,899

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,219

TP-F1

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0.153	0.137	1.121	0.150	0.150	1.000	0.017	0.142	0.117	0.070
	2	0.212	0.137	1.549	0.208	0.150	1.389	0.075	0.162	0.464	0.106
	3	0.270	0.137	1.972	0.267	0.150	1.778	0.133	0.181	0.734	0.131
	4	0.328	0.137	2.397	0.325	0.150	2.167	0.191	0.201	0.953	0.164
	5	0.371	0.137	2.710	0.367	0.150	2.448	0.234	0.215	1.089	0.186
II	1	0.228	0.210	1.086	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.084	0.085
	2	0.299	0.210	1.426	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.373	0.119
	3	0.370	0.210	1.763	0.367	0.225	1.630	0.160	0.263	0.608	0.157
	4	0.444	0.210	2.113	0.438	0.225	1.944	0.234	0.288	0.812	0.198
	5	0.519	0.210	2.472	0.511	0.225	2.269	0.309	0.313	0.987	0.236
III	1	0.302	0.283	1.069	0.300	0.300	1.000	0.019	0.289	0.067	0.103
	2	0.388	0.283	1.373	0.383	0.300	1.278	0.105	0.318	0.332	0.148
	3	0.473	0.283	1.672	0.467	0.300	1.556	0.190	0.346	0.549	0.187
	4	0.558	0.283	1.972	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.734	0.227
	5	0.589	0.283	2.081	0.645	0.300	2.150	0.306	0.385	0.795	0.240
IV	1	0.379	0.335	1.132	0.375	0.375	1.000	0.044	0.350	0.127	0.120
	2	0.460	0.335	1.372	0.454	0.375	1.210	0.125	0.377	0.331	0.157
	3	0.541	0.335	1.614	0.533	0.375	1.420	0.206	0.404	0.510	0.192
	4	0.621	0.335	1.854	0.611	0.375	1.630	0.286	0.430	0.665	0.224
	5	0.700	0.335	2.089	0.690	0.375	1.840	0.365	0.457	0.799	0.261
V	1	0.457	0.435	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.442	0.050	0.131
	2	0.528	0.435	1.214	0.520	0.450	1.154	0.093	0.466	0.200	0.159
	3	0.598	0.435	1.376	0.589	0.450	1.309	0.164	0.489	0.334	0.186
	4	0.670	0.435	1.541	0.659	0.450	1.463	0.235	0.513	0.458	0.213
	5	0.741	0.435	1.703	0.728	0.450	1.618	0.306	0.537	0.570	0.242



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,696

TP-F2

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.152	0.137	1.110	0.150	0.150	1.000	0.015	0.142	0.107	0.034
	2	0.211	0.137	1.539	0.208	0.150	1.389	0.074	0.161	0.457	0.054
	3	0.269	0.137	1.968	0.267	0.150	1.778	0.132	0.181	0.732	0.073
	4	0.327	0.137	2.389	0.325	0.150	2.167	0.190	0.200	0.949	0.099
	5	0.372	0.137	2.720	0.367	0.150	2.448	0.235	0.215	1.093	0.114
II	1	0.227	0.210	1.083	0.225	0.225	1.000	0.017	0.216	0.080	0.042
	2	0.298	0.210	1.417	0.296	0.225	1.315	0.088	0.239	0.366	0.064
	3	0.372	0.210	1.769	0.367	0.225	1.630	0.162	0.264	0.612	0.086
	4	0.445	0.210	2.115	0.438	0.225	1.944	0.235	0.288	0.813	0.110
	5	0.519	0.210	2.466	0.511	0.225	2.269	0.308	0.313	0.985	0.135
III	1	0.301	0.283	1.065	0.300	0.300	1.000	0.018	0.289	0.064	0.052
	2	0.388	0.283	1.370	0.383	0.300	1.278	0.105	0.318	0.329	0.079
	3	0.471	0.283	1.664	0.467	0.300	1.556	0.188	0.346	0.544	0.100
	4	0.558	0.283	1.970	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.733	0.126
	5	0.590	0.283	2.084	0.645	0.300	2.150	0.307	0.385	0.796	0.131
IV	1	0.380	0.335	1.134	0.375	0.375	1.000	0.045	0.350	0.129	0.065
	2	0.460	0.335	1.372	0.454	0.375	1.210	0.125	0.377	0.331	0.084
	3	0.542	0.335	1.615	0.533	0.375	1.420	0.206	0.404	0.510	0.107
	4	0.623	0.335	1.858	0.611	0.375	1.630	0.288	0.431	0.667	0.125
	5	0.701	0.335	2.092	0.690	0.375	1.840	0.366	0.457	0.801	0.148
V	1	0.458	0.435	1.053	0.450	0.450	1.000	0.023	0.443	0.052	0.067
	2	0.529	0.435	1.215	0.520	0.450	1.154	0.094	0.466	0.201	0.082
	3	0.598	0.435	1.374	0.589	0.450	1.309	0.163	0.489	0.333	0.102
	4	0.666	0.435	1.531	0.659	0.450	1.463	0.231	0.512	0.451	0.116
	5	0.741	0.435	1.703	0.728	0.450	1.618	0.306	0.537	0.570	0.134

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,025

TP-F3

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.152	0.137	1.109	0.150	0.150	1.000	0.015	0.142	0.105	0.014
	2	0.211	0.137	1.544	0.208	0.150	1.389	0.074	0.162	0.460	0.024
	3	0.270	0.137	1.969	0.267	0.150	1.778	0.133	0.181	0.732	0.035
	4	0.329	0.137	2.396	0.325	0.150	2.167	0.191	0.201	0.953	0.044
	5	0.373	0.137	2.721	0.367	0.150	2.448	0.236	0.216	1.094	0.054
II	1	0.228	0.210	1.083	0.225	0.225	1.000	0.017	0.216	0.081	0.018
	2	0.298	0.210	1.415	0.296	0.225	1.315	0.087	0.240	0.364	0.032
	3	0.372	0.211	1.766	0.367	0.225	1.630	0.161	0.264	0.610	0.043
	4	0.443	0.211	2.104	0.438	0.225	1.944	0.233	0.288	0.807	0.055
	5	0.516	0.211	2.447	0.511	0.225	2.269	0.305	0.312	0.976	0.068
III	1	0.302	0.283	1.067	0.300	0.300	1.000	0.019	0.290	0.065	0.024
	2	0.388	0.283	1.371	0.383	0.300	1.278	0.105	0.318	0.330	0.037
	3	0.473	0.283	1.668	0.467	0.300	1.556	0.189	0.347	0.547	0.049
	4	0.560	0.283	1.975	0.550	0.300	1.833	0.276	0.376	0.736	0.063
	5	0.590	0.283	2.082	0.645	0.300	2.150	0.307	0.386	0.795	0.070
IV	1	0.380	0.335	1.132	0.375	0.375	1.000	0.044	0.350	0.126	0.031
	2	0.459	0.335	1.369	0.454	0.375	1.210	0.124	0.377	0.328	0.041
	3	0.540	0.335	1.610	0.533	0.375	1.420	0.205	0.404	0.507	0.052
	4	0.622	0.336	1.853	0.611	0.375	1.630	0.286	0.431	0.664	0.065
	5	0.700	0.335	2.087	0.690	0.375	1.840	0.365	0.457	0.798	0.077
V	1	0.458	0.435	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.032
	2	0.529	0.435	1.215	0.520	0.450	1.154	0.093	0.466	0.200	0.041
	3	0.598	0.435	1.373	0.589	0.450	1.309	0.162	0.489	0.332	0.050
	4	0.668	0.435	1.535	0.659	0.450	1.463	0.233	0.513	0.454	0.060
	5	0.738	0.435	1.696	0.728	0.450	1.618	0.303	0.536	0.565	0.070

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,225

TP-F4

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.229	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.085	0.009
	2	0.299	0.210	1.423	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.370	0.016
	3	0.372	0.211	1.767	0.367	0.225	1.630	0.161	0.264	0.611	0.022
	4	0.445	0.211	2.111	0.438	0.225	1.944	0.234	0.289	0.811	0.027
	5	0.518	0.211	2.459	0.511	0.225	2.269	0.307	0.313	0.982	0.039
II	1	0.302	0.283	1.066	0.300	0.300	1.000	0.019	0.290	0.065	0.011
	2	0.389	0.284	1.371	0.383	0.300	1.278	0.105	0.319	0.330	0.019
	3	0.475	0.284	1.674	0.467	0.300	1.556	0.191	0.347	0.550	0.029
	4	0.559	0.284	1.971	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.734	0.035
	5	0.592	0.284	2.086	0.645	0.300	2.150	0.308	0.386	0.797	0.035
III	1	0.379	0.336	1.130	0.375	0.375	1.000	0.044	0.350	0.125	0.016
	2	0.460	0.336	1.372	0.454	0.375	1.210	0.125	0.377	0.331	0.025
	3	0.539	0.336	1.606	0.533	0.375	1.420	0.203	0.403	0.504	0.028
	4	0.620	0.336	1.848	0.611	0.375	1.630	0.285	0.430	0.661	0.034
	5	0.702	0.336	2.092	0.690	0.375	1.840	0.366	0.458	0.800	0.041
IV	1	0.458	0.435	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.015
	2	0.527	0.435	1.209	0.520	0.450	1.154	0.091	0.466	0.196	0.021
	3	0.598	0.435	1.374	0.589	0.450	1.309	0.163	0.490	0.332	0.026
	4	0.669	0.435	1.537	0.659	0.450	1.463	0.234	0.513	0.456	0.030
	5	0.739	0.435	1.696	0.728	0.450	1.618	0.303	0.536	0.565	0.038
V	1	0.531	0.511	1.041	0.525	0.525	1.000	0.021	0.517	0.040	0.015
	2	0.615	0.510	1.207	0.606	0.525	1.155	0.106	0.545	0.194	0.021
	3	0.700	0.511	1.371	0.688	0.525	1.310	0.190	0.574	0.330	0.028
	4	0.782	0.511	1.531	0.769	0.525	1.464	0.271	0.601	0.451	0.034
	5	0.865	0.510	1.696	0.850	0.525	1.619	0.355	0.628	0.565	0.041

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,308 TP-F5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.085	0.004
	2	0.299	0.210	1.422	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.370	0.007
	3	0.371	0.211	1.764	0.367	0.225	1.630	0.161	0.264	0.609	0.013
	4	0.444	0.211	2.110	0.438	0.225	1.944	0.234	0.289	0.810	0.017
	5	0.519	0.211	2.461	0.511	0.225	2.269	0.308	0.313	0.982	0.020
II	1	0.303	0.284	1.068	0.300	0.300	1.000	0.019	0.290	0.067	0.006
	2	0.389	0.284	1.372	0.383	0.300	1.278	0.105	0.319	0.331	0.013
	3	0.474	0.284	1.670	0.467	0.300	1.556	0.190	0.347	0.548	0.015
	4	0.560	0.284	1.973	0.550	0.300	1.833	0.276	0.376	0.735	0.019
	5	0.592	0.284	2.087	0.645	0.300	2.150	0.308	0.386	0.798	0.020
III	1	0.379	0.336	1.131	0.375	0.375	1.000	0.044	0.350	0.125	0.009
	2	0.461	0.336	1.373	0.454	0.375	1.210	0.125	0.377	0.331	0.012
	3	0.540	0.336	1.608	0.533	0.375	1.420	0.204	0.404	0.506	0.015
	4	0.621	0.336	1.849	0.611	0.375	1.630	0.285	0.431	0.662	0.017
	5	0.702	0.336	2.092	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.801	0.023
IV	1	0.458	0.436	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.008
	2	0.526	0.436	1.208	0.520	0.450	1.154	0.091	0.466	0.194	0.010
	3	0.600	0.435	1.378	0.589	0.450	1.309	0.165	0.490	0.336	0.013
	4	0.668	0.436	1.535	0.659	0.450	1.463	0.233	0.513	0.454	0.018
	5	0.739	0.436	1.697	0.728	0.450	1.618	0.304	0.537	0.566	0.020
V	1	0.532	0.511	1.041	0.525	0.525	1.000	0.021	0.518	0.041	0.009
	2	0.668	0.511	1.307	0.606	0.525	1.155	0.157	0.563	0.278	0.015
	3	0.800	0.510	1.567	0.688	0.525	1.310	0.290	0.607	0.477	0.023
	4	0.931	0.511	1.823	0.769	0.525	1.464	0.420	0.651	0.646	0.030
	5	1.070	0.511	2.093	0.850	0.525	1.619	0.559	0.697	0.801	0.040

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,313

TP-F6

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.229	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.085	0.004
	2	0.299	0.211	1.422	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.370	0.005
	3	0.372	0.211	1.767	0.367	0.225	1.630	0.161	0.264	0.611	0.008
	4	0.444	0.211	2.110	0.438	0.225	1.944	0.234	0.289	0.810	0.011
	5	0.517	0.211	2.455	0.511	0.225	2.269	0.307	0.313	0.980	0.014
II	1	0.302	0.284	1.066	0.300	0.300	1.000	0.019	0.290	0.065	0.005
	2	0.389	0.283	1.373	0.383	0.300	1.278	0.106	0.319	0.331	0.005
	3	0.473	0.284	1.669	0.467	0.300	1.556	0.190	0.347	0.547	0.011
	4	0.559	0.284	1.972	0.550	0.300	1.833	0.276	0.376	0.734	0.015
	5	0.592	0.284	2.086	0.645	0.300	2.150	0.308	0.386	0.797	0.013
III	1	0.379	0.336	1.129	0.375	0.375	1.000	0.043	0.350	0.124	0.006
	2	0.460	0.336	1.370	0.454	0.375	1.210	0.124	0.377	0.330	0.009
	3	0.541	0.336	1.612	0.533	0.375	1.420	0.206	0.404	0.509	0.010
	4	0.620	0.336	1.846	0.611	0.375	1.630	0.284	0.430	0.660	0.015
	5	0.703	0.336	2.094	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.802	0.017
IV	1	0.458	0.436	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.006
	2	0.525	0.436	1.205	0.520	0.450	1.154	0.089	0.465	0.192	0.010
	3	0.600	0.436	1.376	0.589	0.450	1.309	0.164	0.490	0.334	0.011
	4	0.669	0.436	1.536	0.659	0.450	1.463	0.233	0.513	0.454	0.013
	5	0.741	0.436	1.701	0.728	0.450	1.618	0.305	0.537	0.568	0.017
V	1	0.531	0.511	1.040	0.525	0.525	1.000	0.021	0.518	0.040	0.007
	2	0.615	0.510	1.206	0.606	0.525	1.155	0.105	0.545	0.193	0.010
	3	0.700	0.510	1.371	0.688	0.525	1.310	0.190	0.573	0.330	0.012
	4	0.781	0.511	1.527	0.769	0.525	1.464	0.269	0.601	0.448	0.017
	5	0.867	0.511	1.698	0.850	0.525	1.619	0.357	0.629	0.566	0.020

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,317

TP-F7

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.229	0.210	1.088	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.086	o. A.
	2	0.299	0.210	1.423	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.371	0.004
	3	0.370	0.210	1.761	0.367	0.225	1.630	0.160	0.264	0.607	0.008
	4	0.445	0.211	2.114	0.438	0.225	1.944	0.235	0.289	0.812	0.011
	5	0.518	0.211	2.458	0.511	0.225	2.269	0.307	0.313	0.981	0.012
II	1	0.303	0.283	1.069	0.300	0.300	1.000	0.020	0.290	0.067	o. A.
	2	0.389	0.284	1.371	0.383	0.300	1.278	0.105	0.319	0.330	0.005
	3	0.473	0.284	1.667	0.467	0.300	1.556	0.189	0.347	0.546	0.010
	4	0.559	0.284	1.971	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.734	0.012
	5	0.593	0.284	2.091	0.645	0.300	2.150	0.309	0.387	0.800	0.013
III	1	0.379	0.336	1.128	0.375	0.375	1.000	0.043	0.350	0.123	0.004
	2	0.461	0.336	1.372	0.454	0.375	1.210	0.125	0.377	0.331	0.007
	3	0.541	0.336	1.612	0.533	0.375	1.420	0.206	0.404	0.508	0.010
	4	0.620	0.336	1.845	0.611	0.375	1.630	0.284	0.430	0.659	0.013
	5	0.703	0.336	2.092	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.801	0.016
IV	1	0.458	0.436	1.052	0.450	0.450	1.000	0.023	0.443	0.051	0.005
	2	0.525	0.436	1.205	0.520	0.450	1.154	0.089	0.465	0.192	0.007
	3	0.600	0.436	1.378	0.589	0.450	1.309	0.165	0.491	0.336	0.010
	4	0.669	0.436	1.535	0.659	0.450	1.463	0.233	0.513	0.454	0.013
	5	0.738	0.436	1.694	0.728	0.450	1.618	0.302	0.536	0.564	0.015
V	1	0.532	0.511	1.040	0.525	0.525	1.000	0.020	0.518	0.039	0.006
	2	0.615	0.511	1.204	0.606	0.525	1.155	0.104	0.546	0.191	0.010
	3	0.699	0.511	1.367	0.688	0.525	1.310	0.188	0.574	0.327	0.012
	4	0.794	0.511	1.554	0.769	0.525	1.464	0.283	0.605	0.468	0.014
	5	0.867	0.511	1.698	0.850	0.525	1.619	0.356	0.629	0.566	0.018

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,325

TP-F8

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.084	0.004
	2	0.300	0.210	1.424	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.371	0.005
	3	0.371	0.210	1.761	0.367	0.225	1.630	0.160	0.264	0.607	0.006
	4	0.445	0.211	2.113	0.438	0.225	1.944	0.234	0.289	0.812	0.008
	5	0.517	0.211	2.455	0.511	0.225	2.269	0.306	0.313	0.980	0.010
		0.000	0.000								
II	1	0.304	0.283	1.071	0.300	0.300	1.000	0.020	0.290	0.069	0.004
	2	0.388	0.283	1.370	0.383	0.300	1.278	0.105	0.318	0.330	0.006
	3	0.473	0.284	1.667	0.467	0.300	1.556	0.189	0.347	0.546	0.009
	4	0.557	0.284	1.966	0.550	0.300	1.833	0.274	0.375	0.731	0.012
	5	0.593	0.284	2.091	0.645	0.300	2.150	0.310	0.387	0.800	0.011
		0.000	0.000								
II	1	0.379	0.336	1.130	0.375	0.375	1.000	0.043	0.350	0.124	0.005
	2	0.461	0.336	1.372	0.454	0.375	1.210	0.125	0.378	0.331	0.007
	3	0.541	0.336	1.610	0.533	0.375	1.420	0.205	0.404	0.507	0.010
	4	0.619	0.336	1.843	0.611	0.375	1.630	0.283	0.430	0.658	0.011
	5	0.703	0.336	2.093	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.801	0.013
		0.000	0.000								
IV	1	0.458	0.436	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.006
	2	0.526	0.436	1.207	0.520	0.450	1.154	0.090	0.466	0.194	0.008
	3	0.601	0.436	1.378	0.589	0.450	1.309	0.165	0.491	0.336	0.007
	4	0.670	0.436	1.537	0.659	0.450	1.463	0.234	0.514	0.455	0.011
	5	0.738	0.436	1.693	0.728	0.450	1.618	0.302	0.537	0.563	0.013
		0.000	0.000								
V	1	0.532	0.511	1.041	0.525	0.525	1.000	0.021	0.518	0.040	0.007
	2	0.616	0.512	1.204	0.606	0.525	1.155	0.104	0.546	0.191	0.008
	3	0.699	0.511	1.368	0.688	0.525	1.310	0.188	0.574	0.327	0.012
	4	0.782	0.511	1.530	0.769	0.525	1.464	0.271	0.601	0.450	0.013
	5	0.866	0.511	1.694	0.850	0.525	1.619	0.355	0.629	0.564	0.018

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,329

TP-F9

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0.229	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.085	0.003
	2	0.300	0.210	1.423	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.371	0.004
	3	0.370	0.211	1.759	0.367	0.225	1.630	0.160	0.264	0.606	0.005
	4	0.445	0.211	2.115	0.438	0.225	1.944	0.235	0.289	0.813	0.008
	5	0.516	0.211	2.450	0.511	0.225	2.269	0.305	0.312	0.978	0.009
II	1	0.304	0.283	1.072	0.300	0.300	1.000	0.020	0.290	0.070	0.004
	2	0.389	0.283	1.374	0.383	0.300	1.278	0.106	0.319	0.332	0.005
	3	0.472	0.283	1.664	0.467	0.300	1.556	0.188	0.346	0.544	0.006
	4	0.558	0.284	1.968	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.732	0.009
	5	0.593	0.284	2.091	0.645	0.300	2.150	0.309	0.387	0.800	0.010
III	1	0.379	0.336	1.128	0.375	0.375	1.000	0.043	0.350	0.122	0.004
	2	0.461	0.336	1.373	0.454	0.375	1.210	0.125	0.378	0.332	0.007
	3	0.542	0.336	1.614	0.533	0.375	1.420	0.206	0.405	0.510	0.008
	4	0.620	0.336	1.846	0.611	0.375	1.630	0.284	0.431	0.660	0.009
	5	0.703	0.336	2.092	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.800	0.012
IV	1	0.458	0.436	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.005
	2	0.526	0.436	1.206	0.520	0.450	1.154	0.090	0.466	0.193	0.006
	3	0.599	0.436	1.375	0.589	0.450	1.309	0.163	0.490	0.333	0.009
	4	0.670	0.436	1.538	0.659	0.450	1.463	0.234	0.514	0.456	0.010
	5	0.738	0.436	1.694	0.728	0.450	1.618	0.303	0.537	0.564	0.014
V	1	0.532	0.511	1.039	0.525	0.525	1.000	0.020	0.518	0.039	0.006
	2	0.615	0.511	1.203	0.606	0.525	1.155	0.104	0.546	0.190	0.006
	3	0.699	0.511	1.368	0.688	0.525	1.310	0.188	0.574	0.328	0.010
	4	0.782	0.510	1.532	0.769	0.525	1.464	0.271	0.601	0.452	0.012
	5	0.867	0.510	1.699	0.850	0.525	1.619	0.356	0.629	0.567	0.015



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,511

TP-F10

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.086	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.084	o. A.
	2	0.299	0.211	1.422	0.296	0.225	1.315	0.089	0.240	0.370	0.004
	3	0.371	0.211	1.762	0.367	0.225	1.630	0.160	0.264	0.608	0.008
	4	0.445	0.211	2.112	0.438	0.225	1.944	0.234	0.289	0.811	0.010
	5	0.518	0.211	2.457	0.511	0.225	2.269	0.307	0.313	0.981	0.012
II	1	0.304	0.283	1.071	0.300	0.300	1.000	0.020	0.290	0.070	o. A.
	2	0.388	0.283	1.371	0.383	0.300	1.278	0.105	0.318	0.330	0.005
	3	0.472	0.283	1.667	0.467	0.300	1.556	0.189	0.346	0.545	0.007
	4	0.559	0.284	1.971	0.550	0.300	1.833	0.275	0.375	0.733	0.010
	5	0.592	0.284	2.087	0.645	0.300	2.150	0.308	0.386	0.798	0.011
III	1	0.378	0.336	1.127	0.375	0.375	1.000	0.043	0.350	0.122	o. A.
	2	0.461	0.336	1.374	0.454	0.375	1.210	0.126	0.378	0.333	0.007
	3	0.543	0.336	1.616	0.533	0.375	1.420	0.207	0.405	0.511	0.008
	4	0.619	0.336	1.842	0.611	0.375	1.630	0.283	0.430	0.657	0.012
	5	0.703	0.336	2.092	0.690	0.375	1.840	0.367	0.458	0.800	0.013
IV	1	0.458	0.436	1.051	0.450	0.450	1.000	0.022	0.443	0.050	0.005
	2	0.526	0.436	1.206	0.520	0.450	1.154	0.090	0.466	0.192	0.008
	3	0.600	0.436	1.376	0.589	0.450	1.309	0.164	0.491	0.334	0.010
	4	0.671	0.436	1.538	0.659	0.450	1.463	0.235	0.514	0.456	0.012
	5	0.739	0.436	1.696	0.728	0.450	1.618	0.303	0.537	0.565	0.014
V	1	0.531	0.511	1.041	0.525	0.525	1.000	0.021	0.518	0.040	0.006
	2	0.615	0.511	1.204	0.606	0.525	1.155	0.104	0.545	0.191	0.008
	3	0.700	0.511	1.370	0.688	0.525	1.310	0.189	0.574	0.330	0.012
	4	0.781	0.511	1.528	0.769	0.525	1.464	0.270	0.601	0.449	0.013
	5	0.867	0.511	1.695	0.850	0.525	1.619	0.356	0.630	0.564	0.017

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,59

TP-T1

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.085	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.083	0.013
	2	0.296	0.225	1.315	0.296	0.225	1.315	0.071	0.249	0.285	0.037
	3	0.367	0.225	1.630	0.367	0.225	1.630	0.142	0.272	0.520	0.065
	4	0.438	0.225	1.944	0.438	0.225	1.944	0.213	0.296	0.718	0.094
	5	0.511	0.225	2.269	0.511	0.225	2.269	0.286	0.320	0.892	0.124
II	1	0.300	0.300	1.000	0.300	0.300	1.000	0.000	0.300	0.000	0.026
	2	0.383	0.300	1.278	0.383	0.300	1.278	0.083	0.328	0.254	0.058
	3	0.467	0.300	1.556	0.467	0.300	1.556	0.167	0.356	0.469	0.092
	4	0.550	0.300	1.833	0.550	0.300	1.833	0.250	0.383	0.652	0.123
	5	0.645	0.300	2.150	0.645	0.300	2.150	0.345	0.415	0.831	0.136
III	1	0.375	0.375	1.000	0.375	0.375	1.000	0.000	0.375	0.000	0.043
	2	0.454	0.375	1.210	0.454	0.375	1.210	0.079	0.401	0.196	0.077
	3	0.533	0.375	1.420	0.533	0.375	1.420	0.158	0.428	0.368	0.108
	4	0.611	0.375	1.630	0.611	0.375	1.630	0.236	0.454	0.521	0.139
	5	0.690	0.375	1.840	0.690	0.375	1.840	0.315	0.480	0.656	0.175
IV	1	0.450	0.450	1.000	0.450	0.450	1.000	0.000	0.450	0.000	0.046
	2	0.520	0.450	1.154	0.520	0.450	1.154	0.070	0.473	0.147	0.076
	3	0.589	0.450	1.309	0.589	0.450	1.309	0.139	0.496	0.280	0.108
	4	0.659	0.450	1.463	0.659	0.450	1.463	0.209	0.520	0.401	0.138
	5	0.728	0.450	1.618	0.728	0.450	1.618	0.278	0.543	0.512	0.169
V	1	0.525	0.525	1.000	0.525	0.525	1.000	0.000	0.525	0.000	0.062
	2	0.606	0.525	1.155	0.606	0.525	1.155	0.081	0.552	0.147	0.100
	3	0.688	0.525	1.310	0.688	0.525	1.310	0.163	0.579	0.281	0.139
	4	0.769	0.525	1.464	0.769	0.525	1.464	0.244	0.606	0.402	0.176
	5	0.850	0.525	1.619	0.850	0.525	1.619	0.325	0.633	0.513	0.216

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,04

TP-T2

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.087	0.225	0.225	1.000	0.018	0.216	0.085	0.035
	2	0.299	0.210	1.428	0.296	0.225	1.315	0.090	0.240	0.374	0.082
	3	0.373	0.210	1.778	0.367	0.225	1.630	0.163	0.264	0.618	0.132
	4	0.445	0.210	2.123	0.438	0.225	1.944	0.236	0.288	0.817	0.181
	5	0.519	0.210	2.473	0.511	0.225	2.269	0.309	0.313	0.988	0.237
II	1	0.304	0.282	1.079	0.300	0.300	1.000	0.022	0.289	0.077	0.061
	2	0.390	0.282	1.384	0.383	0.300	1.278	0.108	0.318	0.341	0.127
	3	0.474	0.282	1.682	0.467	0.300	1.556	0.192	0.346	0.556	0.186
	4	0.560	0.282	1.984	0.550	0.300	1.833	0.278	0.375	0.741	0.242
	5	0.592	0.282	2.099	0.645	0.300	2.150	0.310	0.385	0.804	0.270
III	1	0.382	0.334	1.143	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.136	0.107
	2	0.461	0.334	1.381	0.454	0.375	1.210	0.127	0.377	0.338	0.168
	3	0.542	0.334	1.621	0.533	0.375	1.420	0.208	0.403	0.515	0.224
	4	0.623	0.334	1.864	0.611	0.375	1.630	0.289	0.430	0.671	0.278
	5	0.704	0.334	2.105	0.690	0.375	1.840	0.369	0.457	0.808	0.335
IV	1	0.457	0.434	1.052	0.450	0.450	1.000	0.023	0.442	0.052	0.131
	2	0.528	0.435	1.216	0.520	0.450	1.154	0.094	0.466	0.201	0.186
	3	0.600	0.435	1.381	0.589	0.450	1.309	0.166	0.490	0.338	0.235
	4	0.672	0.435	1.545	0.659	0.450	1.463	0.237	0.514	0.461	0.283
	5	0.743	0.435	1.709	0.728	0.450	1.618	0.308	0.537	0.573	0.333
V	1	0.534	0.510	1.048	0.525	0.525	1.000	0.024	0.518	0.047	0.174
	2	0.618	0.510	1.213	0.606	0.525	1.155	0.109	0.546	0.199	0.231
	3	0.701	0.510	1.375	0.688	0.525	1.310	0.191	0.574	0.333	0.287
	4	0.785	0.510	1.539	0.769	0.525	1.464	0.275	0.601	0.457	0.343
	5	0.868	0.510	1.702	0.850	0.525	1.619	0.358	0.629	0.569	0.401

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,72

TP-T3

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.228	0.210	1.089	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.087	0.117
	2	0.300	0.210	1.430	0.296	0.225	1.315	0.090	0.240	0.376	0.205
	3	0.373	0.210	1.779	0.367	0.225	1.630	0.163	0.264	0.618	0.284
	4	0.445	0.210	2.121	0.438	0.225	1.944	0.235	0.288	0.816	0.357
	5	0.520	0.210	2.478	0.511	0.225	2.269	0.310	0.313	0.990	0.429
II	1	0.304	0.282	1.081	0.300	0.300	1.000	0.023	0.289	0.079	0.173
	2	0.390	0.282	1.385	0.383	0.300	1.278	0.108	0.318	0.341	0.263
	3	0.475	0.282	1.684	0.467	0.300	1.556	0.193	0.346	0.557	0.344
	4	0.561	0.282	1.989	0.550	0.300	1.833	0.279	0.375	0.744	0.425
	5	0.593	0.282	2.104	0.645	0.300	2.150	0.311	0.386	0.807	0.455
III	1	0.382	0.334	1.143	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.137	0.237
	2	0.462	0.334	1.382	0.454	0.375	1.210	0.128	0.377	0.339	0.315
	3	0.543	0.334	1.625	0.533	0.375	1.420	0.209	0.404	0.517	0.387
	4	0.624	0.334	1.866	0.611	0.375	1.630	0.290	0.431	0.672	0.460
	5	0.705	0.334	2.108	0.690	0.375	1.840	0.370	0.458	0.809	0.526
IV	1	0.457	0.434	1.053	0.450	0.450	1.000	0.023	0.442	0.052	0.268
	2	0.529	0.435	1.217	0.520	0.450	1.154	0.094	0.466	0.202	0.333
	3	0.601	0.435	1.383	0.589	0.450	1.309	0.166	0.490	0.339	0.397
	4	0.672	0.435	1.547	0.659	0.450	1.463	0.238	0.514	0.462	0.459
	5	0.743	0.435	1.710	0.728	0.450	1.618	0.308	0.538	0.574	0.518
		0.000	0.000								
V	1	0.535	0.510	1.049	0.525	0.525	1.000	0.025	0.518	0.049	0.317
	2	0.619	0.510	1.213	0.606	0.525	1.155	0.109	0.546	0.199	0.390
	3	0.702	0.510	1.376	0.688	0.525	1.310	0.192	0.574	0.334	0.462
	4	0.785	0.510	1.540	0.769	0.525	1.464	0.275	0.602	0.458	0.531
	5	0.868	0.510	1.703	0.850	0.525	1.619	0.359	0.629	0.570	0.596

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,50

TP-T4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0.229	0.210	1.091	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.088	0.215
	2	0.301	0.210	1.434	0.296	0.225	1.315	0.091	0.240	0.379	0.328
	3	0.373	0.210	1.779	0.367	0.225	1.630	0.163	0.264	0.619	0.424
	4	0.446	0.210	2.125	0.438	0.225	1.944	0.236	0.288	0.818	0.513
	5	0.521	0.210	2.483	0.511	0.225	2.269	0.311	0.314	0.992	0.598
II	1	0.305	0.282	1.083	0.300	0.300	1.000	0.023	0.289	0.081	0.287
	2	0.390	0.282	1.385	0.383	0.300	1.278	0.108	0.318	0.341	0.394
	3	0.476	0.282	1.688	0.467	0.300	1.556	0.194	0.346	0.560	0.493
	4	0.561	0.282	1.991	0.550	0.300	1.833	0.279	0.375	0.745	0.581
	5	0.594	0.282	2.106	0.645	0.300	2.150	0.312	0.386	0.808	0.617
III	1	0.382	0.334	1.144	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.137	0.362
	2	0.462	0.334	1.384	0.454	0.375	1.210	0.128	0.377	0.340	0.454
	3	0.544	0.334	1.627	0.533	0.375	1.420	0.210	0.404	0.519	0.541
	4	0.624	0.334	1.869	0.611	0.375	1.630	0.290	0.431	0.674	0.616
	5	0.705	0.334	2.110	0.690	0.375	1.840	0.371	0.458	0.810	0.691
IV	1	0.458	0.434	1.054	0.450	0.450	1.000	0.023	0.442	0.053	0.397
	2	0.530	0.435	1.219	0.520	0.450	1.154	0.095	0.466	0.204	0.474
	3	0.601	0.435	1.384	0.589	0.450	1.309	0.167	0.490	0.340	0.544
	4	0.673	0.435	1.548	0.659	0.450	1.463	0.238	0.514	0.463	0.613
	5	0.743	0.435	1.710	0.728	0.450	1.618	0.309	0.538	0.574	0.675
V	1	0.535	0.510	1.050	0.525	0.525	1.000	0.025	0.518	0.049	0.448
	2	0.619	0.510	1.214	0.606	0.525	1.155	0.109	0.546	0.200	0.535
	3	0.702	0.510	1.376	0.688	0.525	1.310	0.192	0.574	0.334	0.611
	4	0.786	0.510	1.541	0.769	0.525	1.464	0.276	0.602	0.458	0.683
	5	0.869	0.510	1.704	0.850	0.525	1.619	0.359	0.629	0.570	0.752

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,37

TP-T5

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0.229	0.210	1.091	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.088	0.312
	2	0.301	0.210	1.435	0.296	0.225	1.315	0.091	0.240	0.380	0.436
	3	0.373	0.210	1.779	0.367	0.225	1.630	0.163	0.264	0.618	0.546
	4	0.446	0.210	2.127	0.438	0.225	1.944	0.236	0.289	0.819	0.639
	5	0.521	0.210	2.484	0.511	0.225	2.269	0.312	0.314	0.993	0.733
II	1	0.306	0.282	1.085	0.300	0.300	1.000	0.024	0.290	0.082	0.393
	2	0.390	0.282	1.385	0.383	0.300	1.278	0.108	0.318	0.341	0.513
	3	0.476	0.282	1.690	0.467	0.300	1.556	0.194	0.347	0.561	0.615
	4	0.562	0.282	1.993	0.550	0.300	1.833	0.280	0.375	0.746	0.709
	5	0.594	0.282	2.108	0.645	0.300	2.150	0.312	0.386	0.809	0.744
III	1	0.382	0.334	1.143	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.137	0.477
	2	0.463	0.334	1.386	0.454	0.375	1.210	0.129	0.377	0.342	0.572
	3	0.544	0.334	1.629	0.533	0.375	1.420	0.210	0.404	0.520	0.659
	4	0.625	0.334	1.869	0.611	0.375	1.630	0.290	0.431	0.674	0.740
	5	0.705	0.334	2.111	0.690	0.375	1.840	0.371	0.458	0.811	0.815
IV	1	0.458	0.434	1.055	0.450	0.450	1.000	0.024	0.442	0.054	0.507
	2	0.530	0.435	1.220	0.520	0.450	1.154	0.096	0.466	0.205	0.584
	3	0.602	0.435	1.384	0.589	0.450	1.309	0.167	0.490	0.341	0.659
	4	0.673	0.435	1.548	0.659	0.450	1.463	0.238	0.514	0.463	0.725
	5	0.744	0.435	1.711	0.728	0.450	1.618	0.309	0.538	0.575	0.791
V	1	0.536	0.510	1.051	0.525	0.525	1.000	0.026	0.518	0.050	0.558
	2	0.619	0.510	1.215	0.606	0.525	1.155	0.110	0.546	0.200	0.641
	3	0.702	0.510	1.377	0.688	0.525	1.310	0.192	0.574	0.335	0.717
	4	0.786	0.510	1.541	0.769	0.525	1.464	0.276	0.602	0.458	0.788
	5	0.869	0.510	1.704	0.850	0.525	1.619	0.359	0.629	0.570	0.856

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,29

TP-T6

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.229	0.210	1.092	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.089	0.366
	2	0.301	0.210	1.437	0.296	0.225	1.315	0.092	0.240	0.382	0.504
	3	0.374	0.210	1.781	0.367	0.225	1.630	0.164	0.264	0.620	0.616
	4	0.446	0.210	2.128	0.438	0.225	1.944	0.237	0.289	0.820	0.714
	5	0.522	0.210	2.486	0.511	0.225	2.269	0.312	0.314	0.994	0.809
II	1	0.306	0.282	1.086	0.300	0.300	1.000	0.024	0.290	0.083	0.453
	2	0.390	0.282	1.385	0.383	0.300	1.278	0.108	0.318	0.341	0.577
	3	0.476	0.282	1.691	0.467	0.300	1.556	0.195	0.347	0.561	0.681
	4	0.562	0.282	1.993	0.550	0.300	1.833	0.280	0.375	0.746	0.778
	5	0.594	0.282	2.108	0.645	0.300	2.150	0.312	0.386	0.809	0.813
III	1	0.382	0.334	1.144	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.137	0.532
	2	0.463	0.334	1.386	0.454	0.375	1.210	0.129	0.377	0.342	0.628
	3	0.544	0.334	1.628	0.533	0.375	1.420	0.210	0.404	0.519	0.715
	4	0.625	0.334	1.870	0.611	0.375	1.630	0.291	0.431	0.674	0.796
	5	0.705	0.334	2.111	0.690	0.375	1.840	0.371	0.458	0.811	0.874
IV	1	0.458	0.435	1.054	0.450	0.450	1.000	0.024	0.442	0.053	0.559
	2	0.530	0.435	1.220	0.520	0.450	1.154	0.096	0.467	0.205	0.633
	3	0.602	0.435	1.385	0.589	0.450	1.309	0.167	0.490	0.341	0.705
	4	0.673	0.435	1.548	0.659	0.450	1.463	0.238	0.514	0.463	0.771
	5	0.744	0.435	1.711	0.728	0.450	1.618	0.309	0.538	0.575	0.835
V	1	0.536	0.510	1.050	0.525	0.525	1.000	0.026	0.519	0.050	0.599
	2	0.619	0.510	1.214	0.606	0.525	1.155	0.109	0.546	0.200	0.679
	3	0.702	0.510	1.377	0.688	0.525	1.310	0.192	0.574	0.335	0.756
	4	0.786	0.510	1.541	0.769	0.525	1.464	0.276	0.602	0.458	0.825
	5	0.869	0.510	1.703	0.850	0.525	1.619	0.359	0.630	0.570	0.890

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,23

TP-T7

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.229	0.210	1.092	0.225	0.225	1.000	0.019	0.216	0.089	0.381
	2	0.301	0.210	1.437	0.296	0.225	1.315	0.092	0.240	0.381	0.518
	3	0.374	0.210	1.781	0.367	0.225	1.630	0.164	0.264	0.620	0.630
	4	0.446	0.210	2.127	0.438	0.225	1.944	0.237	0.289	0.819	0.729
	5	0.522	0.210	2.485	0.511	0.225	2.269	0.312	0.314	0.993	0.833
II	1	0.306	0.282	1.085	0.300	0.300	1.000	0.024	0.290	0.083	0.466
	2	0.390	0.282	1.386	0.383	0.300	1.278	0.109	0.318	0.342	0.592
	3	0.476	0.282	1.691	0.467	0.300	1.556	0.195	0.347	0.561	0.694
	4	0.562	0.282	1.993	0.550	0.300	1.833	0.280	0.375	0.746	0.789
	5	0.594	0.282	2.109	0.645	0.300	2.150	0.313	0.386	0.809	0.828
III	1	0.382	0.334	1.144	0.375	0.375	1.000	0.048	0.350	0.138	0.540
	2	0.463	0.334	1.386	0.454	0.375	1.210	0.129	0.377	0.342	0.635
	3	0.544	0.334	1.628	0.533	0.375	1.420	0.210	0.404	0.520	0.722
	4	0.625	0.334	1.869	0.611	0.375	1.630	0.291	0.431	0.674	0.807
	5	0.706	0.334	2.111	0.690	0.375	1.840	0.371	0.458	0.811	0.882
IV	1	0.458	0.435	1.054	0.450	0.450	1.000	0.024	0.442	0.053	0.562
	2	0.530	0.435	1.219	0.520	0.450	1.154	0.095	0.467	0.205	0.637
	3	0.602	0.435	1.385	0.589	0.450	1.309	0.167	0.491	0.341	0.708
	4	0.673	0.435	1.547	0.659	0.450	1.463	0.238	0.514	0.463	0.769
	5	0.744	0.435	1.711	0.728	0.450	1.618	0.309	0.538	0.575	0.837
V	1	0.536	0.510	1.051	0.525	0.525	1.000	0.026	0.519	0.050	0.599
	2	0.619	0.510	1.214	0.606	0.525	1.155	0.109	0.546	0.200	0.674
	3	0.702	0.510	1.377	0.688	0.525	1.310	0.192	0.574	0.335	0.752
	4	0.786	0.510	1.541	0.769	0.525	1.464	0.276	0.602	0.458	0.822
	5	0.869	0.510	1.703	0.850	0.525	1.619	0.359	0.630	0.570	0.894



### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,19

TP-T8

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11,el}^m$ [%o]
I	1	0.154	0.140	1.100	0.225	0.225	1.000	0.014	0.144	0.097	0.349
	2	0.213	0.140	1.522	0.296	0.225	1.315	0.073	0.164	0.444	0.440
	3	0.272	0.140	1.948	0.367	0.225	1.630	0.132	0.184	0.720	0.553
	4	0.332	0.140	2.377	0.438	0.225	1.944	0.192	0.204	0.944	0.666
	5	0.375	0.140	2.683	0.511	0.225	2.269	0.235	0.218	1.078	0.754
II	1	0.229	0.210	1.090	0.300	0.300	1.000	0.019	0.216	0.087	0.393
	2	0.302	0.210	1.437	0.383	0.300	1.278	0.092	0.241	0.382	0.530
	3	0.374	0.210	1.780	0.467	0.300	1.556	0.164	0.264	0.619	0.640
	4	0.447	0.210	2.127	0.550	0.300	1.833	0.237	0.289	0.819	0.746
	5	0.521	0.210	2.483	0.645	0.300	2.150	0.311	0.314	0.993	0.842
III	1	0.306	0.282	1.085	0.375	0.375	1.000	0.024	0.290	0.082	0.468
	2	0.390	0.282	1.386	0.454	0.375	1.210	0.109	0.318	0.342	0.592
	3	0.476	0.282	1.689	0.533	0.375	1.420	0.194	0.347	0.560	0.698
	4	0.562	0.282	1.993	0.611	0.375	1.630	0.280	0.375	0.746	0.799
	5	0.594	0.282	2.108	0.690	0.375	1.840	0.312	0.386	0.809	0.834
IV	1	0.382	0.334	1.144	0.450	0.450	1.000	0.048	0.350	0.138	0.543
	2	0.462	0.334	1.385	0.520	0.450	1.154	0.128	0.377	0.341	0.637
	3	0.544	0.334	1.628	0.589	0.450	1.309	0.210	0.404	0.519	0.727
	4	0.625	0.334	1.869	0.659	0.450	1.463	0.291	0.431	0.674	0.809
	5	0.706	0.334	2.110	0.728	0.450	1.618	0.371	0.458	0.810	0.887
V	1	0.458	0.435	1.054	0.525	0.525	1.000	0.023	0.443	0.053	0.562
	2	0.530	0.435	1.219	0.606	0.525	1.155	0.095	0.467	0.204	0.634
	3	0.602	0.435	1.383	0.688	0.525	1.310	0.167	0.491	0.340	0.705
	4	0.673	0.435	1.547	0.769	0.525	1.464	0.238	0.514	0.463	0.775
	5	0.744	0.435	1.710	0.850	0.525	1.619	0.309	0.538	0.574	0.840

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,13

TP-T9

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0.154	0.139	1.109	0.225	0.225	1.000	0.015	0.144	0.105	0.362
	2	0.213	0.139	1.530	0.296	0.225	1.315	0.074	0.164	0.450	0.451
	3	0.272	0.139	1.954	0.367	0.225	1.630	0.133	0.183	0.724	0.549
	4	0.332	0.139	2.388	0.438	0.225	1.944	0.193	0.203	0.949	0.667
	5	0.375	0.139	2.697	0.511	0.225	2.269	0.236	0.218	1.084	0.749
II	1	0.229	0.210	1.092	0.300	0.300	1.000	0.019	0.216	0.089	0.395
	2	0.301	0.210	1.437	0.383	0.300	1.278	0.092	0.240	0.381	0.528
	3	0.373	0.210	1.780	0.467	0.300	1.556	0.164	0.264	0.619	0.641
	4	0.446	0.210	2.127	0.550	0.300	1.833	0.237	0.289	0.819	0.738
	5	0.521	0.210	2.484	0.645	0.300	2.150	0.312	0.314	0.993	0.830
III	1	0.306	0.282	1.085	0.375	0.375	1.000	0.024	0.290	0.082	0.467
	2	0.391	0.282	1.386	0.454	0.375	1.210	0.109	0.318	0.342	0.587
	3	0.476	0.282	1.689	0.533	0.375	1.420	0.194	0.347	0.560	0.695
	4	0.562	0.282	1.992	0.611	0.375	1.630	0.280	0.375	0.745	0.791
	5	0.594	0.282	2.107	0.690	0.375	1.840	0.312	0.386	0.809	0.825
IV	1	0.382	0.334	1.144	0.450	0.450	1.000	0.048	0.350	0.137	0.539
	2	0.463	0.334	1.383	0.520	0.450	1.154	0.128	0.377	0.340	0.634
	3	0.544	0.334	1.627	0.589	0.450	1.309	0.210	0.404	0.519	0.723
	4	0.625	0.335	1.868	0.659	0.450	1.463	0.290	0.431	0.673	0.802
	5	0.705	0.335	2.108	0.728	0.450	1.618	0.371	0.458	0.809	0.875
V	1	0.458	0.435	1.053	0.525	0.525	1.000	0.023	0.443	0.052	0.555
	2	0.530	0.435	1.218	0.606	0.525	1.155	0.095	0.467	0.204	0.629
	3	0.602	0.435	1.383	0.688	0.525	1.310	0.167	0.491	0.340	0.702
	4	0.673	0.435	1.547	0.769	0.525	1.464	0.238	0.514	0.462	0.771
	5	0.744	0.435	1.710	0.850	0.525	1.619	0.309	0.538	0.574	0.833

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,06

TP-T10

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%] 97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%o]
I	1	0.154	0.140	1.104	0.225	0.225	1.000	0.014	0.145	0.100	0.365
	2	0.213	0.140	1.524	0.296	0.225	1.315	0.073	0.164	0.446	0.450
	3	0.272	0.140	1.945	0.367	0.225	1.630	0.132	0.184	0.719	0.546
	4	0.332	0.140	2.377	0.438	0.225	1.944	0.192	0.204	0.944	0.661
	5	0.375	0.140	2.682	0.511	0.225	2.269	0.235	0.218	1.078	0.743
II	1	0.229	0.210	1.092	0.300	0.300	1.000	0.019	0.216	0.089	0.398
	2	0.302	0.210	1.435	0.383	0.300	1.278	0.091	0.241	0.380	0.528
	3	0.374	0.210	1.779	0.467	0.300	1.556	0.164	0.265	0.618	0.640
	4	0.447	0.210	2.126	0.550	0.300	1.833	0.237	0.289	0.819	0.739
	5	0.522	0.210	2.483	0.645	0.300	2.150	0.311	0.314	0.992	0.831
III	1	0.306	0.282	1.084	0.375	0.375	1.000	0.024	0.290	0.081	0.467
	2	0.391	0.282	1.385	0.454	0.375	1.210	0.109	0.318	0.342	0.589
	3	0.476	0.282	1.688	0.533	0.375	1.420	0.194	0.347	0.560	0.694
	4	0.562	0.282	1.992	0.611	0.375	1.630	0.280	0.375	0.745	0.789
	5	0.594	0.282	2.107	0.690	0.375	1.840	0.312	0.386	0.809	0.825
IV	1	0.382	0.334	1.144	0.450	0.450	1.000	0.048	0.350	0.137	0.541
	2	0.463	0.334	1.384	0.520	0.450	1.154	0.128	0.377	0.341	0.639
	3	0.544	0.334	1.628	0.589	0.450	1.309	0.210	0.404	0.519	0.724
	4	0.625	0.334	1.869	0.659	0.450	1.463	0.290	0.431	0.674	0.803
	5	0.705	0.334	2.109	0.728	0.450	1.618	0.371	0.458	0.810	0.879
V	1	0.458	0.435	1.054	0.525	0.525	1.000	0.023	0.443	0.053	0.558
	2	0.530	0.435	1.218	0.606	0.525	1.155	0.095	0.467	0.204	0.633
	3	0.602	0.435	1.383	0.688	0.525	1.310	0.167	0.491	0.340	0.703
	4	0.673	0.435	1.546	0.769	0.525	1.464	0.238	0.514	0.462	0.770
	5	0.744	0.435	1.710	0.850	0.525	1.619	0.309	0.538	0.574	0.829

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,219

TP-F1

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,159	0,976	1,500	1,500	1,000	-0,004	0,158	-0,024	0,174
	2	0,214	0,159	1,344	2,083	1,500	1,389	0,055	0,177	0,308	0,256
	3	0,274	0,159	1,719	2,667	1,500	1,778	0,114	0,197	0,580	0,330
	4	0,331	0,159	2,084	3,250	1,500	2,167	0,172	0,217	0,796	0,406
	5	0,375	0,159	2,357	3,833	1,500	2,556	0,216	0,231	0,934	0,466
II	1	0,230	0,228	1,011	2,250	2,250	1,000	0,002	0,229	0,010	0,249
	2	0,301	0,228	1,320	2,958	2,250	1,315	0,073	0,252	0,289	0,328
	3	0,373	0,228	1,636	3,667	2,250	1,630	0,145	0,276	0,525	0,412
	4	0,446	0,228	1,956	4,375	2,250	1,944	0,218	0,301	0,725	0,494
	5	0,519	0,228	2,276	5,083	2,250	2,259	0,291	0,325	0,895	0,583
III	1	0,305	0,300	1,018	3,000	3,000	1,000	0,005	0,301	0,018	0,312
	2	0,391	0,300	1,304	3,833	3,000	1,278	0,091	0,330	0,276	0,398
	3	0,475	0,300	1,584	4,667	3,000	1,556	0,175	0,358	0,489	0,485
	4	0,560	0,300	1,869	5,500	3,000	1,833	0,260	0,386	0,674	0,580
	5	0,592	0,300	1,977	6,333	3,000	2,111	0,293	0,397	0,737	0,623
IV	1	0,382	0,352	1,086	0,375	0,375	1,000	0,030	0,362	0,083	0,402
	2	0,461	0,352	1,313	0,454	0,375	1,210	0,110	0,388	0,283	0,474
	3	0,541	0,351	1,539	0,533	0,375	1,420	0,190	0,415	0,457	0,544
	4	0,622	0,351	1,770	0,611	0,375	1,630	0,271	0,442	0,613	0,617
	5	0,703	0,351	2,000	0,690	0,375	1,840	0,351	0,468	0,750	0,703
V	1	0,459	0,451	1,017	0,450	0,450	1,000	0,008	0,454	0,017	0,457
	2	0,528	0,451	1,171	0,520	0,450	1,154	0,077	0,477	0,162	0,510
	3	0,599	0,451	1,328	0,589	0,450	1,309	0,148	0,500	0,295	0,571
	4	0,669	0,451	1,485	0,659	0,450	1,463	0,218	0,524	0,417	0,631
	5	0,742	0,451	1,646	0,728	0,450	1,618	0,291	0,548	0,532	0,692

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,696

TP-F2

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,158	0,981	1,500	1,500	1,000	-0,003	0,157	-0,019	0,152
	2	0,214	0,158	1,357	2,083	1,500	1,389	0,056	0,176	0,319	0,233
	3	0,273	0,157	1,733	2,667	1,500	1,778	0,115	0,196	0,589	0,294
	4	0,330	0,157	2,105	3,250	1,500	2,167	0,173	0,215	0,807	0,356
	5	0,373	0,157	2,379	3,833	1,500	2,556	0,216	0,229	0,945	0,401
II	1	0,230	0,226	1,016	2,250	2,250	1,000	0,004	0,228	0,016	0,235
	2	0,300	0,226	1,327	2,958	2,250	1,315	0,074	0,251	0,295	0,280
	3	0,374	0,226	1,654	3,667	2,250	1,630	0,148	0,276	0,537	0,341
	4	0,444	0,226	1,962	4,375	2,250	1,944	0,218	0,299	0,728	0,405
	5	0,519	0,226	2,294	5,083	2,250	2,259	0,293	0,324	0,904	0,470
III	1	0,306	0,298	1,024	3,000	3,000	1,000	0,007	0,301	0,024	0,263
	2	0,390	0,298	1,308	3,833	3,000	1,278	0,092	0,329	0,279	0,318
	3	0,476	0,298	1,594	4,667	3,000	1,556	0,177	0,357	0,496	0,381
	4	0,560	0,298	1,878	5,500	3,000	1,833	0,262	0,386	0,679	0,446
	5	0,593	0,298	1,987	6,333	3,000	2,111	0,294	0,396	0,743	0,472
IV	1	0,381	0,350	1,089	0,375	0,375	1,000	0,031	0,360	0,086	0,307
	2	0,460	0,350	1,315	0,454	0,375	1,210	0,110	0,387	0,285	0,350
	3	0,540	0,350	1,544	0,533	0,375	1,420	0,190	0,413	0,460	0,406
	4	0,623	0,350	1,780	0,611	0,375	1,630	0,273	0,441	0,619	0,462
	5	0,704	0,350	2,011	0,690	0,375	1,840	0,354	0,468	0,756	0,516
V	1	0,457	0,450	1,015	0,450	0,450	1,000	0,007	0,452	0,015	0,327
	2	0,530	0,450	1,176	0,520	0,450	1,154	0,079	0,477	0,167	0,363
	3	0,599	0,450	1,330	0,589	0,450	1,309	0,148	0,500	0,297	0,402
	4	0,672	0,450	1,492	0,659	0,450	1,463	0,222	0,524	0,423	0,448
	5	0,742	0,450	1,648	0,728	0,450	1,618	0,292	0,547	0,533	0,490

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,025

TP-F3

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,154	0,154	0,999	1,500	1,500	1,000	0,000	0,154	-0,001	0,055
	2	0,213	0,154	1,383	2,083	1,500	1,389	0,059	0,174	0,340	0,089
	3	0,273	0,154	1,769	2,667	1,500	1,778	0,118	0,194	0,612	0,122
	4	0,332	0,154	2,153	3,250	1,500	2,167	0,178	0,213	0,833	0,154
	5	0,371	0,154	2,408	3,833	1,500	2,556	0,217	0,227	0,958	0,178
II	1	0,230	0,226	1,017	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,017	0,073
	2	0,300	0,226	1,330	2,958	2,250	1,315	0,074	0,250	0,297	0,106
	3	0,371	0,226	1,643	3,667	2,250	1,630	0,145	0,274	0,529	0,143
	4	0,445	0,226	1,972	4,375	2,250	1,944	0,219	0,299	0,734	0,181
	5	0,521	0,226	2,308	5,083	2,250	2,259	0,295	0,324	0,911	0,222
III	1	0,305	0,298	1,024	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,024	0,090
	2	0,389	0,298	1,306	3,833	3,000	1,278	0,091	0,328	0,278	0,127
	3	0,473	0,298	1,589	4,667	3,000	1,556	0,175	0,356	0,492	0,166
	4	0,561	0,298	1,883	5,500	3,000	1,833	0,263	0,386	0,682	0,208
	5	0,594	0,298	1,993	6,333	3,000	2,111	0,296	0,396	0,746	0,223
IV	1	0,382	0,350	1,092	0,375	0,375	1,000	0,032	0,361	0,090	0,108
	2	0,461	0,350	1,318	0,454	0,375	1,210	0,111	0,387	0,288	0,144
	3	0,540	0,350	1,543	0,533	0,375	1,420	0,190	0,413	0,460	0,176
	4	0,624	0,350	1,785	0,611	0,375	1,630	0,274	0,441	0,622	0,213
	5	0,701	0,350	2,003	0,690	0,375	1,840	0,351	0,467	0,752	0,250
V	1	0,459	0,450	1,019	0,450	0,450	1,000	0,008	0,453	0,019	0,117
	2	0,528	0,450	1,173	0,520	0,450	1,154	0,078	0,476	0,164	0,143
	3	0,596	0,450	1,326	0,589	0,450	1,309	0,147	0,499	0,294	0,171
	4	0,672	0,450	1,494	0,659	0,450	1,463	0,222	0,524	0,424	0,198
	5	0,739	0,450	1,642	0,728	0,450	1,618	0,289	0,546	0,529	0,229

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,225

TP-F4

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,230	0,226	1,018	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,018	0,045
	2	0,300	0,226	1,331	2,958	2,250	1,315	0,075	0,251	0,298	0,067
	3	0,373	0,226	1,653	3,667	2,250	1,630	0,147	0,275	0,536	0,091
	4	0,447	0,226	1,981	4,375	2,250	1,944	0,222	0,300	0,739	0,114
	5	0,519	0,226	2,299	5,083	2,250	2,259	0,293	0,324	0,907	0,140
II	1	0,305	0,298	1,023	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,023	0,051
	2	0,390	0,298	1,308	3,833	3,000	1,278	0,092	0,329	0,280	0,074
	3	0,476	0,298	1,598	4,667	3,000	1,556	0,178	0,357	0,499	0,099
	4	0,558	0,298	1,874	5,500	3,000	1,833	0,260	0,385	0,677	0,128
	5	0,591	0,298	1,984	6,333	3,000	2,111	0,293	0,396	0,741	0,136
III	1	0,380	0,350	1,087	0,375	0,375	1,000	0,030	0,360	0,084	0,061
	2	0,463	0,350	1,323	0,454	0,375	1,210	0,113	0,388	0,292	0,081
	3	0,543	0,350	1,551	0,533	0,375	1,420	0,193	0,414	0,465	0,107
	4	0,622	0,350	1,778	0,611	0,375	1,630	0,272	0,440	0,618	0,130
	5	0,702	0,350	2,008	0,690	0,375	1,840	0,353	0,467	0,755	0,154
IV	1	0,456	0,450	1,012	0,450	0,450	1,000	0,006	0,452	0,012	0,065
	2	0,530	0,450	1,179	0,520	0,450	1,154	0,080	0,477	0,168	0,081
	3	0,600	0,450	1,334	0,589	0,450	1,309	0,150	0,500	0,301	0,101
	4	0,669	0,450	1,486	0,659	0,450	1,463	0,219	0,523	0,418	0,119
	5	0,742	0,450	1,649	0,728	0,450	1,618	0,292	0,547	0,533	0,138
V	1	0,537	0,525	1,022	0,525	0,525	1,000	0,011	0,529	0,022	0,071
	2	0,618	0,525	1,177	0,606	0,525	1,155	0,093	0,556	0,167	0,089
	3	0,698	0,526	1,328	0,688	0,525	1,310	0,173	0,583	0,296	0,110
	4	0,781	0,525	1,487	0,769	0,525	1,464	0,256	0,610	0,419	0,130
	5	0,865	0,525	1,650	0,850	0,525	1,619	0,341	0,638	0,534	0,152

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,308

TP-F5

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,226	1,018	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,018	0,024
	2	0,300	0,226	1,331	2,958	2,250	1,315	0,075	0,251	0,298	0,037
	3	0,371	0,226	1,643	3,667	2,250	1,630	0,145	0,274	0,530	0,050
	4	0,443	0,226	1,962	4,375	2,250	1,944	0,217	0,298	0,728	0,064
	5	0,521	0,226	2,310	5,083	2,250	2,259	0,296	0,324	0,912	0,077
II	1	0,305	0,298	1,023	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,022	0,028
	2	0,388	0,298	1,304	3,833	3,000	1,278	0,091	0,328	0,276	0,040
	3	0,473	0,298	1,589	4,667	3,000	1,556	0,175	0,356	0,492	0,056
	4	0,560	0,298	1,879	5,500	3,000	1,833	0,262	0,385	0,680	0,070
	5	0,592	0,298	1,986	6,333	3,000	2,111	0,294	0,396	0,742	0,075
III	1	0,380	0,350	1,087	0,375	0,375	1,000	0,030	0,360	0,084	0,033
	2	0,461	0,350	1,318	0,454	0,375	1,210	0,111	0,387	0,287	0,043
	3	0,543	0,350	1,554	0,533	0,375	1,420	0,194	0,414	0,468	0,056
	4	0,622	0,350	1,781	0,611	0,375	1,630	0,273	0,441	0,619	0,071
	5	0,701	0,350	2,005	0,690	0,375	1,840	0,351	0,467	0,753	0,088
IV	1	0,455	0,450	1,012	0,450	0,450	1,000	0,005	0,452	0,012	0,033
	2	0,529	0,450	1,177	0,520	0,450	1,154	0,080	0,476	0,167	0,045
	3	0,598	0,450	1,328	0,589	0,450	1,309	0,148	0,499	0,296	0,053
	4	0,669	0,450	1,487	0,659	0,450	1,463	0,219	0,523	0,419	0,065
	5	0,742	0,450	1,649	0,728	0,450	1,618	0,292	0,547	0,534	0,077
V	1	0,537	0,525	1,023	0,525	0,525	1,000	0,012	0,529	0,023	0,036
	2	0,667	0,525	1,270	0,606	0,525	1,155	0,142	0,572	0,248	0,056
	3	0,801	0,524	1,528	0,688	0,525	1,310	0,277	0,616	0,449	0,078
	4	0,938	0,524	1,788	0,769	0,525	1,464	0,413	0,662	0,624	0,099
	5	1,068	0,525	2,033	0,850	0,525	1,619	0,543	0,706	0,769	0,123



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,313

TP-F6

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,230	0,226	1,018	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,018	0,012
	2	0,300	0,226	1,331	2,958	2,250	1,315	0,075	0,251	0,298	0,019
	3	0,371	0,226	1,644	3,667	2,250	1,630	0,145	0,274	0,531	0,025
	4	0,443	0,226	1,965	4,375	2,250	1,944	0,218	0,298	0,730	0,034
	5	0,517	0,226	2,293	5,083	2,250	2,259	0,292	0,323	0,904	0,040
II	1	0,305	0,298	1,023	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,023	0,014
	2	0,389	0,298	1,308	3,833	3,000	1,278	0,092	0,328	0,279	0,022
	3	0,472	0,298	1,587	4,667	3,000	1,556	0,175	0,356	0,491	0,028
	4	0,560	0,298	1,882	5,500	3,000	1,833	0,263	0,385	0,682	0,037
	5	0,590	0,298	1,981	6,333	3,000	2,111	0,292	0,395	0,739	0,040
III	1	0,380	0,349	1,088	0,375	0,375	1,000	0,031	0,360	0,086	0,016
	2	0,460	0,349	1,316	0,454	0,375	1,210	0,110	0,386	0,286	0,023
	3	0,544	0,349	1,556	0,533	0,375	1,420	0,194	0,414	0,469	0,029
	4	0,621	0,349	1,778	0,611	0,375	1,630	0,272	0,440	0,618	0,037
	5	0,702	0,349	2,010	0,690	0,375	1,840	0,353	0,467	0,756	0,049
IV	1	0,455	0,450	1,010	0,450	0,450	1,000	0,005	0,452	0,010	0,019
	2	0,529	0,450	1,175	0,520	0,450	1,154	0,079	0,476	0,165	0,023
	3	0,598	0,450	1,329	0,589	0,450	1,309	0,148	0,499	0,296	0,028
	4	0,668	0,450	1,485	0,659	0,450	1,463	0,218	0,523	0,418	0,036
	5	0,743	0,450	1,651	0,728	0,450	1,618	0,293	0,548	0,535	0,043
V	1	0,535	0,523	1,023	0,525	0,525	1,000	0,012	0,527	0,023	0,019
	2	0,617	0,523	1,178	0,606	0,525	1,155	0,093	0,554	0,168	0,025
	3	0,698	0,524	1,332	0,688	0,525	1,310	0,174	0,582	0,299	0,032
	4	0,780	0,523	1,491	0,769	0,525	1,464	0,257	0,609	0,422	0,043
	5	0,865	0,523	1,653	0,850	0,525	1,619	0,341	0,637	0,536	0,049

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,317

TP-F7

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,230	0,226	1,017	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,017	0,005
	2	0,300	0,226	1,329	2,958	2,250	1,315	0,074	0,251	0,297	0,010
	3	0,372	0,226	1,646	3,667	2,250	1,630	0,146	0,275	0,532	0,014
	4	0,444	0,226	1,963	4,375	2,250	1,944	0,218	0,299	0,729	0,017
	5	0,517	0,226	2,289	5,083	2,250	2,259	0,291	0,323	0,902	0,021
II	1	0,305	0,298	1,023	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,023	0,010
	2	0,389	0,298	1,307	3,833	3,000	1,278	0,092	0,328	0,279	0,012
	3	0,472	0,298	1,584	4,667	3,000	1,556	0,174	0,356	0,489	0,016
	4	0,558	0,298	1,872	5,500	3,000	1,833	0,260	0,385	0,676	0,020
	5	0,590	0,298	1,982	6,333	3,000	2,111	0,293	0,395	0,740	0,021
III	1	0,381	0,350	1,091	0,375	0,375	1,000	0,032	0,360	0,088	0,011
	2	0,460	0,349	1,315	0,454	0,375	1,210	0,110	0,386	0,285	0,014
	3	0,542	0,349	1,550	0,533	0,375	1,420	0,192	0,414	0,465	0,016
	4	0,621	0,350	1,777	0,611	0,375	1,630	0,272	0,440	0,617	0,019
	5	0,701	0,350	2,005	0,690	0,375	1,840	0,351	0,467	0,753	0,023
IV	1	0,455	0,450	1,011	0,450	0,450	1,000	0,005	0,452	0,011	0,007
	2	0,528	0,449	1,175	0,520	0,450	1,154	0,078	0,476	0,165	0,013
	3	0,599	0,449	1,334	0,589	0,450	1,309	0,150	0,499	0,300	0,015
	4	0,668	0,449	1,488	0,659	0,450	1,463	0,219	0,522	0,420	0,018
	5	0,742	0,449	1,651	0,728	0,450	1,618	0,293	0,547	0,535	0,023
V	1	0,535	0,525	1,019	0,525	0,525	1,000	0,010	0,528	0,019	0,010
	2	0,617	0,524	1,177	0,606	0,525	1,155	0,093	0,555	0,167	0,013
	3	0,698	0,524	1,332	0,688	0,525	1,310	0,174	0,582	0,299	0,018
	4	0,780	0,525	1,485	0,769	0,525	1,464	0,255	0,610	0,417	0,021
	5	0,864	0,524	1,649	0,850	0,525	1,619	0,340	0,637	0,533	0,028

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,325

TP-F8

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,230	0,226	1,016	2,250	2,250	1,000	0,004	0,228	0,015	0,005
	2	0,300	0,226	1,328	2,958	2,250	1,315	0,074	0,251	0,295	0,007
	3	0,372	0,226	1,643	3,667	2,250	1,630	0,145	0,275	0,529	0,009
	4	0,444	0,226	1,960	4,375	2,250	1,944	0,217	0,299	0,727	0,010
	5	0,517	0,226	2,286	5,083	2,250	2,259	0,291	0,323	0,900	0,014
		0,000	0,000								
II	1	0,305	0,298	1,024	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,024	0,005
	2	0,390	0,298	1,309	3,833	3,000	1,278	0,092	0,329	0,280	0,009
	3	0,472	0,298	1,585	4,667	3,000	1,556	0,174	0,356	0,489	0,011
	4	0,558	0,298	1,871	5,500	3,000	1,833	0,260	0,385	0,675	0,013
	5	0,591	0,298	1,983	6,333	3,000	2,111	0,293	0,396	0,741	0,015
		0,000	0,000								
II	1	0,381	0,350	1,090	0,375	0,375	1,000	0,032	0,360	0,088	0,007
	2	0,460	0,350	1,314	0,454	0,375	1,210	0,110	0,386	0,284	0,008
	3	0,541	0,350	1,549	0,533	0,375	1,420	0,192	0,414	0,464	0,012
	4	0,621	0,350	1,777	0,611	0,375	1,630	0,271	0,440	0,617	0,014
	5	0,700	0,349	2,003	0,690	0,375	1,840	0,351	0,466	0,752	0,016
		0,000	0,000								
IV	1	0,455	0,451	1,010	0,450	0,450	1,000	0,005	0,452	0,010	0,007
	2	0,527	0,451	1,169	0,520	0,450	1,154	0,076	0,476	0,160	0,006
	3	0,600	0,450	1,335	0,589	0,450	1,309	0,151	0,500	0,301	0,011
	4	0,669	0,451	1,484	0,659	0,450	1,463	0,218	0,523	0,417	0,012
	5	0,744	0,450	1,651	0,728	0,450	1,618	0,293	0,548	0,535	0,017
		0,000	0,000								
V	1	0,535	0,524	1,019	0,525	0,525	1,000	0,010	0,528	0,019	0,008
	2	0,617	0,524	1,176	0,606	0,525	1,155	0,093	0,555	0,167	0,010
	3	0,699	0,524	1,335	0,688	0,525	1,310	0,175	0,582	0,301	0,014
	4	0,780	0,523	1,490	0,769	0,525	1,464	0,256	0,609	0,421	0,016
	5	0,865	0,524	1,651	0,850	0,525	1,619	0,341	0,638	0,535	0,020

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,329

TP-F9

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,230	0,226	1,015	2,250	2,250	1,000	0,003	0,228	0,015	0,004
	2	0,300	0,226	1,326	2,958	2,250	1,315	0,074	0,251	0,294	0,006
	3	0,372	0,226	1,643	3,667	2,250	1,630	0,146	0,275	0,529	0,009
	4	0,444	0,226	1,960	4,375	2,250	1,944	0,217	0,299	0,727	0,010
	5	0,518	0,226	2,289	5,083	2,250	2,259	0,292	0,324	0,902	0,012
II	1	0,305	0,298	1,023	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,023	0,005
	2	0,390	0,298	1,308	3,833	3,000	1,278	0,092	0,329	0,279	0,007
	3	0,472	0,298	1,585	4,667	3,000	1,556	0,174	0,356	0,490	0,010
	4	0,558	0,298	1,872	5,500	3,000	1,833	0,260	0,385	0,676	0,011
	5	0,592	0,298	1,986	6,333	3,000	2,111	0,294	0,396	0,742	0,014
III	1	0,381	0,350	1,091	0,375	0,375	1,000	0,032	0,360	0,088	0,005
	2	0,460	0,349	1,316	0,454	0,375	1,210	0,110	0,386	0,286	0,006
	3	0,541	0,349	1,547	0,533	0,375	1,420	0,191	0,413	0,462	0,008
	4	0,622	0,350	1,780	0,611	0,375	1,630	0,273	0,440	0,619	0,013
	5	0,701	0,350	2,006	0,690	0,375	1,840	0,352	0,467	0,754	0,017
IV	1	0,455	0,449	1,013	0,450	0,450	1,000	0,006	0,451	0,013	0,005
	2	0,527	0,450	1,172	0,520	0,450	1,154	0,077	0,475	0,162	0,006
	3	0,598	0,450	1,329	0,589	0,450	1,309	0,148	0,499	0,297	0,011
	4	0,668	0,450	1,486	0,659	0,450	1,463	0,218	0,523	0,418	0,012
	5	0,742	0,450	1,650	0,728	0,450	1,618	0,292	0,547	0,534	0,014
V	1	0,534	0,523	1,020	0,525	0,525	1,000	0,011	0,526	0,020	0,006
	2	0,616	0,524	1,176	0,606	0,525	1,155	0,092	0,554	0,167	0,009
	3	0,698	0,525	1,329	0,688	0,525	1,310	0,173	0,582	0,297	0,011
	4	0,780	0,524	1,489	0,769	0,525	1,464	0,256	0,609	0,420	0,014
	5	0,865	0,524	1,651	0,850	0,525	1,619	0,341	0,638	0,535	0,016

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,511

TP-F10

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,226	1,017	2,250	2,250	1,000	0,004	0,227	0,017	o. A.
	2	0,301	0,226	1,330	2,958	2,250	1,315	0,075	0,251	0,298	0,006
	3	0,371	0,226	1,643	3,667	2,250	1,630	0,145	0,274	0,530	0,008
	4	0,444	0,226	1,964	4,375	2,250	1,944	0,218	0,299	0,729	0,010
	5	0,518	0,226	2,293	5,083	2,250	2,259	0,292	0,323	0,904	0,012
II	1	0,305	0,298	1,024	3,000	3,000	1,000	0,007	0,300	0,024	o. A.
	2	0,390	0,298	1,309	3,833	3,000	1,278	0,092	0,328	0,280	0,004
	3	0,473	0,298	1,588	4,667	3,000	1,556	0,175	0,356	0,491	0,007
	4	0,558	0,298	1,874	5,500	3,000	1,833	0,260	0,384	0,677	0,009
	5	0,591	0,298	1,985	6,333	3,000	2,111	0,293	0,395	0,742	0,011
III	1	0,382	0,349	1,093	0,375	0,375	1,000	0,032	0,360	0,090	o. A.
	2	0,460	0,349	1,316	0,454	0,375	1,210	0,111	0,386	0,286	0,006
	3	0,541	0,349	1,549	0,533	0,375	1,420	0,192	0,413	0,464	0,009
	4	0,622	0,349	1,781	0,611	0,375	1,630	0,273	0,440	0,620	0,013
	5	0,701	0,349	2,009	0,690	0,375	1,840	0,352	0,466	0,755	0,015
IV	1	0,455	0,450	1,013	0,450	0,450	1,000	0,006	0,452	0,013	0,006
	2	0,528	0,449	1,176	0,520	0,450	1,154	0,079	0,475	0,166	0,007
	3	0,599	0,449	1,334	0,589	0,450	1,309	0,150	0,499	0,300	0,010
	4	0,671	0,448	1,497	0,659	0,450	1,463	0,223	0,522	0,426	0,011
	5	0,742	0,448	1,654	0,728	0,450	1,618	0,293	0,546	0,537	0,013
V	1	0,531	0,511	1,041	0,525	0,525	1,000	0,021	0,518	0,040	0,008
	2	0,615	0,511	1,204	0,606	0,525	1,155	0,104	0,545	0,191	0,010
	3	0,700	0,511	1,370	0,688	0,525	1,310	0,189	0,574	0,330	0,011
	4	0,781	0,511	1,528	0,769	0,525	1,464	0,270	0,601	0,449	0,013
	5	0,867	0,511	1,695	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,564	0,016

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,59

TP-T1

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,228	0,232	0,985	2,250	2,250	1,000	-0,004	0,231	-0,015	0,005
	2	2,958	2,250	1,315	2,958	2,250	1,315	0,708	2,486	0,285	0,017
	3	3,667	2,250	1,630	3,667	2,250	1,630	1,417	2,722	0,520	0,035
	4	4,375	2,250	1,944	4,375	2,250	1,944	2,125	2,958	0,718	0,053
	5	5,083	2,250	2,259	5,083	2,250	2,259	2,833	3,194	0,887	0,073
II	1	3,000	3,000	1,000	3,000	3,000	1,000	0,000	3,000	0,000	0,010
	2	3,833	3,000	1,278	3,833	3,000	1,278	0,833	3,278	0,254	0,029
	3	4,667	3,000	1,556	4,667	3,000	1,556	1,667	3,556	0,469	0,050
	4	5,500	3,000	1,833	5,500	3,000	1,833	2,500	3,833	0,652	0,074
	5	6,333	3,000	2,111	6,333	3,000	2,111	3,333	4,111	0,811	0,082
III	1	0,375	0,375	1,000	0,375	0,375	1,000	0,000	0,375	0,000	0,018
	2	0,454	0,375	1,210	0,454	0,375	1,210	0,079	0,401	0,196	0,043
	3	0,533	0,375	1,420	0,533	0,375	1,420	0,158	0,428	0,368	0,065
	4	0,611	0,375	1,630	0,611	0,375	1,630	0,236	0,454	0,521	0,090
	5	0,690	0,375	1,840	0,690	0,375	1,840	0,315	0,480	0,656	0,118
IV	1	0,450	0,450	1,000	0,450	0,450	1,000	0,000	0,450	0,000	0,022
	2	0,520	0,450	1,154	0,520	0,450	1,154	0,070	0,473	0,147	0,043
	3	0,589	0,450	1,309	0,589	0,450	1,309	0,139	0,496	0,280	0,063
	4	0,659	0,450	1,463	0,659	0,450	1,463	0,209	0,520	0,401	0,091
	5	0,728	0,450	1,618	0,728	0,450	1,618	0,278	0,543	0,512	0,116
V	1	0,525	0,525	1,000	0,525	0,525	1,000	0,000	0,525	0,000	0,028
	2	0,606	0,525	1,155	0,606	0,525	1,155	0,081	0,552	0,147	0,056
	3	0,688	0,525	1,310	0,688	0,525	1,310	0,163	0,579	0,281	0,087
	4	0,769	0,525	1,464	0,769	0,525	1,464	0,244	0,606	0,402	0,116
	5	0,850	0,525	1,619	0,850	0,525	1,619	0,325	0,633	0,513	0,145

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,04

TP-T2

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,228	0,233	0,979	2,250	2,250	1,000	-0,005	0,231	-0,022	0,016
	2	0,299	0,233	1,282	2,958	2,250	1,315	0,066	0,255	0,258	0,048
	3	0,372	0,234	1,592	3,667	2,250	1,630	0,138	0,280	0,494	0,085
	4	0,444	0,234	1,901	4,375	2,250	1,944	0,211	0,304	0,693	0,130
	5	0,519	0,234	2,220	5,083	2,250	2,259	0,285	0,329	0,867	0,168
II	1	0,304	0,305	0,997	3,000	3,000	1,000	-0,001	0,305	-0,003	0,028
	2	0,389	0,305	1,275	3,833	3,000	1,278	0,084	0,333	0,252	0,073
	3	0,475	0,305	1,554	4,667	3,000	1,556	0,169	0,362	0,468	0,119
	4	0,559	0,305	1,831	5,500	3,000	1,833	0,254	0,390	0,651	0,164
	5	0,592	0,306	1,937	6,333	3,000	2,111	0,286	0,401	0,714	0,183
III	1	0,381	0,357	1,066	0,375	0,375	1,000	0,024	0,365	0,065	0,053
	2	0,462	0,357	1,292	0,454	0,375	1,210	0,104	0,392	0,266	0,098
	3	0,542	0,357	1,517	0,533	0,375	1,420	0,185	0,419	0,441	0,144
	4	0,623	0,358	1,741	0,611	0,375	1,630	0,265	0,446	0,594	0,188
	5	0,703	0,358	1,965	0,690	0,375	1,840	0,345	0,473	0,730	0,238
IV	1	0,458	0,457	1,002	0,450	0,450	1,000	0,001	0,457	0,002	0,067
	2	0,529	0,457	1,156	0,520	0,450	1,154	0,071	0,481	0,149	0,108
	3	0,600	0,457	1,312	0,589	0,450	1,309	0,143	0,505	0,283	0,146
	4	0,671	0,457	1,467	0,659	0,450	1,463	0,214	0,528	0,404	0,191
	5	0,741	0,457	1,622	0,728	0,450	1,618	0,284	0,552	0,515	0,235
V	1	0,534	0,532	1,005	0,525	0,525	1,000	0,003	0,533	0,005	0,091
	2	0,618	0,532	1,161	0,606	0,525	1,155	0,086	0,560	0,153	0,140
	3	0,700	0,532	1,317	0,688	0,525	1,310	0,169	0,588	0,287	0,189
	4	0,784	0,532	1,475	0,769	0,525	1,464	0,252	0,616	0,410	0,240
	5	0,867	0,532	1,630	0,850	0,525	1,619	0,335	0,643	0,521	0,293

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,72

TP-T3

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,233	0,981	2,250	2,250	1,000	-0,005	0,232	-0,020	0,051
	2	0,300	0,234	1,284	2,958	2,250	1,315	0,066	0,256	0,259	0,109
	3	0,373	0,234	1,595	3,667	2,250	1,630	0,139	0,280	0,496	0,181
	4	0,445	0,234	1,904	4,375	2,250	1,944	0,211	0,304	0,695	0,250
	5	0,520	0,234	2,222	5,083	2,250	2,259	0,286	0,329	0,868	0,319
II	1	0,305	0,305	0,998	3,000	3,000	1,000	0,000	0,305	-0,002	0,082
	2	0,390	0,305	1,277	3,833	3,000	1,278	0,085	0,334	0,254	0,160
	3	0,475	0,305	1,557	4,667	3,000	1,556	0,170	0,362	0,470	0,237
	4	0,560	0,305	1,835	5,500	3,000	1,833	0,255	0,390	0,653	0,319
	5	0,593	0,305	1,941	6,333	3,000	2,111	0,287	0,401	0,716	0,356
III	1	0,382	0,357	1,069	0,375	0,375	1,000	0,025	0,365	0,067	0,138
	2	0,462	0,357	1,295	0,454	0,375	1,210	0,105	0,392	0,268	0,213
	3	0,542	0,357	1,520	0,533	0,375	1,420	0,185	0,419	0,443	0,290
	4	0,623	0,357	1,746	0,611	0,375	1,630	0,266	0,446	0,597	0,360
	5	0,703	0,357	1,970	0,690	0,375	1,840	0,346	0,472	0,733	0,437
IV	1	0,458	0,456	1,003	0,450	0,450	1,000	0,001	0,457	0,003	0,160
	2	0,529	0,457	1,159	0,520	0,450	1,154	0,072	0,481	0,151	0,226
	3	0,600	0,457	1,315	0,589	0,450	1,309	0,144	0,505	0,285	0,293
	4	0,671	0,457	1,470	0,659	0,450	1,463	0,215	0,528	0,406	0,357
	5	0,743	0,457	1,626	0,728	0,450	1,618	0,286	0,552	0,518	0,417
V	1	0,000	0,000								
	2	0,535	0,531	1,006	0,525	0,525	1,000	0,003	0,533	0,006	0,197
	3	0,618	0,532	1,163	0,606	0,525	1,155	0,086	0,560	0,154	0,270
	4	0,701	0,531	1,318	0,688	0,525	1,310	0,169	0,588	0,288	0,343
	5	0,784	0,532	1,475	0,769	0,525	1,464	0,253	0,616	0,410	0,415
		0,868	0,532	1,632	0,850	0,525	1,619	0,336	0,644	0,522	0,496



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,50

TP-T4

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,233	0,986	2,250	2,250	1,000	-0,003	0,232	-0,014	0,127
	2	0,300	0,233	1,288	2,958	2,250	1,315	0,067	0,256	0,263	0,211
	3	0,373	0,233	1,599	3,667	2,250	1,630	0,140	0,280	0,499	0,321
	4	0,446	0,233	1,912	4,375	2,250	1,944	0,213	0,304	0,699	0,430
	5	0,521	0,234	2,230	5,083	2,250	2,259	0,287	0,329	0,872	0,532
II	1	0,305	0,305	1,001	3,000	3,000	1,000	0,000	0,305	0,001	0,189
	2	0,391	0,305	1,281	3,833	3,000	1,278	0,086	0,334	0,257	0,295
	3	0,476	0,305	1,559	4,667	3,000	1,556	0,170	0,362	0,471	0,406
	4	0,561	0,305	1,837	5,500	3,000	1,833	0,255	0,390	0,655	0,515
	5	0,593	0,305	1,942	6,333	3,000	2,111	0,288	0,401	0,717	0,560
III	1	0,382	0,357	1,070	0,375	0,375	1,000	0,025	0,365	0,068	0,262
	2	0,463	0,357	1,295	0,454	0,375	1,210	0,105	0,392	0,269	0,360
	3	0,542	0,357	1,519	0,533	0,375	1,420	0,185	0,419	0,443	0,458
	4	0,623	0,357	1,745	0,611	0,375	1,630	0,266	0,446	0,597	0,557
	5	0,704	0,357	1,972	0,690	0,375	1,840	0,347	0,473	0,734	0,661
IV	1	0,459	0,457	1,004	0,450	0,450	1,000	0,002	0,457	0,004	0,295
	2	0,529	0,457	1,158	0,520	0,450	1,154	0,072	0,481	0,150	0,374
	3	0,601	0,457	1,314	0,589	0,450	1,309	0,144	0,505	0,285	0,459
	4	0,672	0,457	1,470	0,659	0,450	1,463	0,215	0,528	0,406	0,547
	5	0,743	0,457	1,626	0,728	0,450	1,618	0,286	0,552	0,518	0,629
V	1	0,535	0,532	1,006	0,525	0,525	1,000	0,003	0,533	0,006	0,348
	2	0,618	0,532	1,162	0,606	0,525	1,155	0,086	0,560	0,154	0,440
	3	0,701	0,532	1,319	0,688	0,525	1,310	0,170	0,588	0,288	0,534
	4	0,785	0,532	1,476	0,769	0,525	1,464	0,253	0,616	0,411	0,628
	5	0,868	0,532	1,632	0,850	0,525	1,619	0,336	0,644	0,522	0,721

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,37

TP-T5

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,233	0,988	2,250	2,250	1,000	-0,003	0,232	-0,012	0,227
	2	0,301	0,233	1,293	2,958	2,250	1,315	0,068	0,256	0,267	0,338
	3	0,374	0,233	1,603	3,667	2,250	1,630	0,141	0,280	0,502	0,480
	4	0,447	0,233	1,914	4,375	2,250	1,944	0,213	0,304	0,701	0,614
	5	0,520	0,233	2,231	5,083	2,250	2,259	0,287	0,329	0,873	0,738
II	1	0,305	0,305	1,002	3,000	3,000	1,000	0,000	0,305	0,002	0,325
	2	0,391	0,305	1,284	3,833	3,000	1,278	0,087	0,334	0,260	0,470
	3	0,476	0,304	1,563	4,667	3,000	1,556	0,171	0,362	0,474	0,602
	4	0,561	0,304	1,842	5,500	3,000	1,833	0,256	0,390	0,657	0,723
	5	0,593	0,305	1,947	6,333	3,000	2,111	0,289	0,401	0,720	0,776
III	1	0,382	0,356	1,073	0,375	0,375	1,000	0,026	0,365	0,071	0,432
	2	0,463	0,356	1,300	0,454	0,375	1,210	0,107	0,392	0,273	0,550
	3	0,543	0,356	1,524	0,533	0,375	1,420	0,187	0,418	0,446	0,662
	4	0,624	0,356	1,750	0,611	0,375	1,630	0,267	0,445	0,600	0,770
	5	0,705	0,356	1,980	0,690	0,375	1,840	0,349	0,472	0,739	0,890
IV	1	0,458	0,456	1,005	0,450	0,450	1,000	0,002	0,457	0,005	0,479
	2	0,529	0,456	1,161	0,520	0,450	1,154	0,073	0,481	0,153	0,574
	3	0,601	0,456	1,318	0,589	0,450	1,309	0,145	0,504	0,287	0,667
	4	0,672	0,456	1,474	0,659	0,450	1,463	0,216	0,528	0,409	0,759
	5	0,744	0,456	1,630	0,728	0,450	1,618	0,287	0,552	0,520	0,849
V	1	0,535	0,531	1,007	0,525	0,525	1,000	0,004	0,532	0,007	0,544
	2	0,619	0,531	1,165	0,606	0,525	1,155	0,088	0,560	0,156	0,647
	3	0,702	0,531	1,321	0,688	0,525	1,310	0,171	0,588	0,290	0,747
	4	0,786	0,531	1,479	0,769	0,525	1,464	0,254	0,616	0,413	0,846
	5	0,869	0,531	1,636	0,850	0,525	1,619	0,338	0,644	0,525	0,952

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,29

TP-T6

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,231	0,995	2,250	2,250	1,000	-0,001	0,231	-0,005	0,352
	2	0,301	0,231	1,302	2,958	2,250	1,315	0,070	0,255	0,275	0,477
	3	0,375	0,231	1,621	3,667	2,250	1,630	0,143	0,279	0,514	0,644
	4	0,447	0,231	1,935	4,375	2,250	1,944	0,216	0,303	0,713	0,799
	5	0,521	0,231	2,259	5,083	2,250	2,259	0,291	0,328	0,887	0,960
II	1	0,306	0,303	1,012	3,000	3,000	1,000	0,004	0,304	0,012	0,481
	2	0,392	0,302	1,295	3,833	3,000	1,278	0,089	0,332	0,269	0,649
	3	0,476	0,302	1,576	4,667	3,000	1,556	0,174	0,360	0,483	0,802
	4	0,561	0,302	1,857	5,500	3,000	1,833	0,259	0,388	0,666	0,943
	5	0,594	0,302	1,967	6,333	3,000	2,111	0,292	0,399	0,731	1,000
III	1	0,383	0,354	1,081	0,375	0,375	1,000	0,029	0,364	0,079	0,604
	2	0,463	0,354	1,310	0,454	0,375	1,210	0,110	0,390	0,281	0,747
	3	0,543	0,354	1,537	0,533	0,375	1,420	0,190	0,417	0,455	0,872
	4	0,624	0,353	1,767	0,611	0,375	1,630	0,271	0,444	0,611	0,987
	5	0,706	0,353	1,998	0,690	0,375	1,840	0,353	0,471	0,749	1,102
IV	1	0,459	0,454	1,012	0,450	0,450	1,000	0,005	0,456	0,012	0,636
	2	0,530	0,454	1,168	0,520	0,450	1,154	0,076	0,479	0,159	0,748
	3	0,602	0,454	1,326	0,589	0,450	1,309	0,148	0,503	0,294	0,851
	4	0,673	0,454	1,484	0,659	0,450	1,463	0,219	0,527	0,417	0,945
	5	0,744	0,453	1,641	0,728	0,450	1,618	0,290	0,550	0,528	1,040
V	1	0,535	0,529	1,012	0,525	0,525	1,000	0,006	0,531	0,012	0,695
	2	0,619	0,529	1,170	0,606	0,525	1,155	0,090	0,559	0,160	0,808
	3	0,702	0,529	1,328	0,688	0,525	1,310	0,173	0,587	0,295	0,918
	4	0,786	0,529	1,486	0,769	0,525	1,464	0,257	0,615	0,418	1,024
	5	0,869	0,529	1,643	0,850	0,525	1,619	0,340	0,642	0,530	1,119

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,23

TP-T7

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,231	0,229	1,008	2,250	2,250	1,000	0,002	0,229	0,008	0,510
	2	0,301	0,228	1,320	2,958	2,250	1,315	0,073	0,253	0,290	0,630
	3	0,375	0,228	1,643	3,667	2,250	1,630	0,147	0,277	0,530	0,790
	4	0,447	0,228	1,962	4,375	2,250	1,944	0,219	0,301	0,729	0,960
	5	0,522	0,228	2,289	5,083	2,250	2,259	0,294	0,326	0,902	1,127
II	1	0,306	0,301	1,018	3,000	3,000	1,000	0,005	0,302	0,018	0,570
	2	0,392	0,300	1,304	3,833	3,000	1,278	0,091	0,331	0,276	0,773
	3	0,476	0,300	1,585	4,667	3,000	1,556	0,176	0,359	0,490	0,934
	4	0,562	0,300	1,871	5,500	3,000	1,833	0,262	0,387	0,675	1,084
	5	0,594	0,300	1,979	6,333	3,000	2,111	0,294	0,398	0,738	1,139
III	1	0,383	0,353	1,086	0,375	0,375	1,000	0,030	0,363	0,084	0,693
	2	0,463	0,353	1,313	0,454	0,375	1,210	0,110	0,389	0,284	0,846
	3	0,544	0,353	1,542	0,533	0,375	1,420	0,191	0,416	0,459	0,983
	4	0,625	0,353	1,772	0,611	0,375	1,630	0,272	0,443	0,614	1,107
	5	0,706	0,352	2,003	0,690	0,375	1,840	0,353	0,470	0,752	1,221
IV	1	0,459	0,453	1,012	0,450	0,450	1,000	0,005	0,455	0,012	0,730
	2	0,530	0,454	1,169	0,520	0,450	1,154	0,077	0,479	0,160	0,845
	3	0,602	0,453	1,328	0,589	0,450	1,309	0,149	0,503	0,295	0,955
	4	0,673	0,453	1,485	0,659	0,450	1,463	0,220	0,527	0,417	1,056
	5	0,744	0,453	1,642	0,728	0,450	1,618	0,291	0,550	0,529	1,147
V	1	0,536	0,529	1,013	0,525	0,525	1,000	0,007	0,531	0,013	0,795
	2	0,619	0,529	1,171	0,606	0,525	1,155	0,090	0,559	0,162	0,912
	3	0,702	0,529	1,328	0,688	0,525	1,310	0,173	0,587	0,296	1,022
	4	0,786	0,529	1,487	0,769	0,525	1,464	0,257	0,615	0,419	1,123
	5	0,869	0,529	1,643	0,850	0,525	1,619	0,340	0,642	0,530	1,225

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,19

TP-T8

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,155	0,158	0,981	2,250	2,250	1,000	-0,003	0,157	-0,019	0,528
	2	0,214	0,158	1,355	2,958	2,250	1,315	0,056	0,177	0,318	0,651
	3	0,273	0,158	1,732	3,667	2,250	1,630	0,115	0,196	0,588	0,765
	4	0,333	0,158	2,112	4,375	2,250	1,944	0,175	0,216	0,811	0,905
	5	0,375	0,158	2,382	5,083	2,250	2,259	0,218	0,230	0,946	1,031
II	1	0,230	0,228	1,008	3,000	3,000	1,000	0,002	0,229	0,008	0,600
	2	0,302	0,228	1,324	3,833	3,000	1,278	0,074	0,253	0,292	0,749
	3	0,375	0,228	1,644	4,667	3,000	1,556	0,147	0,277	0,530	0,920
	4	0,447	0,228	1,965	5,500	3,000	1,833	0,220	0,301	0,730	1,083
	5	0,522	0,228	2,295	6,333	3,000	2,111	0,295	0,326	0,905	1,247
III	1	0,306	0,301	1,019	0,375	0,375	1,000	0,006	0,302	0,019	0,668
	2	0,392	0,300	1,304	0,454	0,375	1,210	0,091	0,331	0,276	0,848
	3	0,476	0,300	1,587	0,533	0,375	1,420	0,176	0,359	0,491	1,026
	4	0,562	0,300	1,873	0,611	0,375	1,630	0,262	0,387	0,676	1,181
	5	0,595	0,300	1,982	0,690	0,375	1,840	0,295	0,398	0,740	1,241
IV	1	0,383	0,353	1,087	0,450	0,450	1,000	0,031	0,363	0,084	0,753
	2	0,464	0,353	1,315	0,520	0,450	1,154	0,111	0,390	0,285	0,919
	3	0,544	0,352	1,544	0,589	0,450	1,309	0,192	0,416	0,460	1,061
	4	0,625	0,352	1,774	0,659	0,450	1,463	0,273	0,443	0,615	1,194
	5	0,706	0,352	2,003	0,728	0,450	1,618	0,354	0,470	0,752	1,314
V	1	0,459	0,453	1,013	0,525	0,525	1,000	0,006	0,455	0,013	0,786
	2	0,530	0,453	1,170	0,606	0,525	1,155	0,077	0,479	0,161	0,907
	3	0,602	0,453	1,328	0,688	0,525	1,310	0,149	0,503	0,296	1,017
	4	0,673	0,453	1,485	0,769	0,525	1,464	0,220	0,526	0,417	1,125
	5	0,744	0,453	1,642	0,850	0,525	1,619	0,291	0,550	0,529	1,227

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,13

TP-T9

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,156	0,158	0,985	2,250	2,250	1,000	-0,002	0,157	-0,015	0,593
	2	0,215	0,158	1,361	2,958	2,250	1,315	0,057	0,177	0,322	0,720
	3	0,273	0,157	1,737	3,667	2,250	1,630	0,116	0,196	0,592	0,828
	4	0,334	0,157	2,122	4,375	2,250	1,944	0,176	0,216	0,817	0,955
	5	0,376	0,157	2,397	5,083	2,250	2,259	0,219	0,230	0,953	1,069
II	1	0,231	0,228	1,012	3,000	3,000	1,000	0,003	0,229	0,012	0,663
	2	0,302	0,228	1,327	3,833	3,000	1,278	0,074	0,253	0,295	0,805
	3	0,375	0,228	1,648	4,667	3,000	1,556	0,148	0,277	0,533	0,936
	4	0,448	0,228	1,967	5,500	3,000	1,833	0,220	0,301	0,731	1,087
	5	0,522	0,227	2,297	6,333	3,000	2,111	0,295	0,326	0,905	1,246
III	1	0,307	0,300	1,021	0,375	0,375	1,000	0,006	0,303	0,021	0,710
	2	0,392	0,300	1,305	0,454	0,375	1,210	0,092	0,331	0,277	0,854
	3	0,477	0,300	1,589	0,533	0,375	1,420	0,177	0,359	0,493	1,021
	4	0,562	0,300	1,875	0,611	0,375	1,630	0,262	0,387	0,677	1,175
	5	0,595	0,300	1,982	0,690	0,375	1,840	0,295	0,398	0,740	1,239
IV	1	0,383	0,353	1,087	0,450	0,450	1,000	0,031	0,363	0,085	0,787
	2	0,464	0,353	1,316	0,520	0,450	1,154	0,111	0,390	0,286	0,913
	3	0,544	0,352	1,545	0,589	0,450	1,309	0,192	0,416	0,461	1,054
	4	0,625	0,352	1,775	0,659	0,450	1,463	0,273	0,443	0,616	1,187
	5	0,706	0,352	2,003	0,728	0,450	1,618	0,353	0,470	0,752	1,312
V	1	0,459	0,454	1,013	0,525	0,525	1,000	0,006	0,455	0,013	0,783
	2	0,531	0,453	1,170	0,606	0,525	1,155	0,077	0,479	0,161	0,910
	3	0,602	0,453	1,328	0,688	0,525	1,310	0,149	0,503	0,296	1,023
	4	0,673	0,453	1,485	0,769	0,525	1,464	0,220	0,527	0,417	1,129
	5	0,744	0,453	1,641	0,850	0,525	1,619	0,291	0,550	0,528	1,226

### Übersicht Versuchsdaten

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,06

TP-T10

Wassergehalt: w [%]

5

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

97

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,156	0,159	0,985	2,250	2,250	1,000	-0,002	0,158	-0,015	0,613
	2	0,215	0,158	1,361	2,958	2,250	1,315	0,057	0,177	0,322	0,730
	3	0,274	0,158	1,735	3,667	2,250	1,630	0,116	0,196	0,590	0,842
	4	0,333	0,157	2,115	4,375	2,250	1,944	0,176	0,216	0,813	0,964
	5	0,376	0,157	2,393	5,083	2,250	2,259	0,219	0,230	0,951	1,077
II	1	0,231	0,228	1,012	3,000	3,000	1,000	0,003	0,229	0,012	0,672
	2	0,302	0,228	1,326	3,833	3,000	1,278	0,074	0,253	0,294	0,810
	3	0,375	0,228	1,647	4,667	3,000	1,556	0,147	0,277	0,532	0,940
	4	0,448	0,228	1,966	5,500	3,000	1,833	0,220	0,301	0,730	1,089
	5	0,522	0,228	2,295	6,333	3,000	2,111	0,295	0,326	0,905	1,240
III	1	0,307	0,301	1,021	0,375	0,375	1,000	0,006	0,303	0,021	0,721
	2	0,392	0,300	1,305	0,454	0,375	1,210	0,092	0,331	0,277	0,859
	3	0,477	0,300	1,589	0,533	0,375	1,420	0,177	0,359	0,492	1,022
	4	0,562	0,300	1,873	0,611	0,375	1,630	0,262	0,387	0,676	1,173
	5	0,595	0,300	1,983	0,690	0,375	1,840	0,295	0,398	0,740	1,231
IV	1	0,383	0,353	1,087	0,450	0,450	1,000	0,031	0,363	0,085	0,793
	2	0,464	0,353	1,315	0,520	0,450	1,154	0,111	0,390	0,285	0,911
	3	0,545	0,352	1,545	0,589	0,450	1,309	0,192	0,416	0,461	1,056
	4	0,625	0,352	1,774	0,659	0,450	1,463	0,273	0,443	0,615	1,186
	5	0,706	0,352	2,002	0,728	0,450	1,618	0,353	0,470	0,751	1,313
V	1	0,459	0,454	1,013	0,525	0,525	1,000	0,006	0,456	0,013	0,776
	2	0,531	0,453	1,170	0,606	0,525	1,155	0,077	0,479	0,161	0,910
	3	0,602	0,454	1,328	0,688	0,525	1,310	0,149	0,503	0,296	1,022
	4	0,673	0,453	1,484	0,769	0,525	1,464	0,220	0,527	0,417	1,127
	5	0,744	0,453	1,641	0,850	0,525	1,619	0,291	0,550	0,528	1,230

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,219

TP-F1

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,143	1,088	1,500	1,500	1,000	0,013	0,147	0,086	0,069
	2	0,214	0,143	1,503	2,083	1,500	1,389	0,072	0,167	0,430	0,103
	3	0,272	0,143	1,907	2,667	1,500	1,778	0,129	0,186	0,696	0,139
	4	0,332	0,143	2,315	3,250	1,500	2,167	0,189	0,206	0,914	0,173
	5	0,375	0,143	2,616	3,833	1,500	2,556	0,232	0,220	1,050	0,202
II	1	0,229	0,211	1,085	2,250	2,250	1,000	0,018	0,217	0,082	0,095
	2	0,300	0,211	1,422	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,370	0,132
	3	0,372	0,211	1,760	3,667	2,250	1,630	0,161	0,265	0,606	0,171
	4	0,444	0,212	2,100	4,375	2,250	1,944	0,233	0,289	0,805	0,208
	5	0,521	0,212	2,461	5,083	2,250	2,259	0,309	0,315	0,982	0,250
III	1	0,306	0,283	1,080	3,000	3,000	1,000	0,023	0,291	0,078	0,115
	2	0,388	0,283	1,371	3,833	3,000	1,278	0,105	0,318	0,330	0,158
	3	0,475	0,283	1,679	4,667	3,000	1,556	0,192	0,347	0,554	0,197
	4	0,557	0,283	1,967	5,500	3,000	1,833	0,274	0,374	0,731	0,241
	5	0,590	0,283	2,083	6,333	3,000	2,111	0,307	0,385	0,796	0,256
IV	1	0,381	0,335	1,138	0,375	0,375	1,000	0,046	0,351	0,132	0,138
	2	0,461	0,335	1,375	0,454	0,375	1,210	0,126	0,377	0,333	0,174
	3	0,539	0,335	1,609	0,533	0,375	1,420	0,204	0,403	0,506	0,212
	4	0,622	0,335	1,856	0,611	0,375	1,630	0,287	0,431	0,666	0,245
	5	0,703	0,335	2,097	0,690	0,375	1,840	0,368	0,458	0,803	0,283
V	1	0,458	0,435	1,052	0,450	0,450	1,000	0,023	0,443	0,051	0,146
	2	0,526	0,435	1,210	0,520	0,450	1,154	0,091	0,465	0,196	0,177
	3	0,598	0,435	1,375	0,589	0,450	1,309	0,163	0,490	0,333	0,206
	4	0,670	0,435	1,541	0,659	0,450	1,463	0,235	0,514	0,458	0,236
	5	0,742	0,435	1,704	0,728	0,450	1,618	0,306	0,537	0,570	0,264



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,696

TP-F2

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,156	0,145	1,077	1,500	1,500	1,000	0,011	0,148	0,075	0,041
	2	0,214	0,145	1,473	2,083	1,500	1,389	0,069	0,168	0,408	0,068
	3	0,270	0,145	1,863	2,667	1,500	1,778	0,125	0,187	0,670	0,093
	4	0,330	0,145	2,268	3,250	1,500	2,167	0,184	0,207	0,891	0,116
	5	0,374	0,145	2,573	3,833	1,500	2,556	0,229	0,222	1,032	0,135
II	1	0,229	0,215	1,062	2,250	2,250	1,000	0,013	0,220	0,061	0,055
	2	0,301	0,216	1,398	2,958	2,250	1,315	0,086	0,244	0,351	0,082
	3	0,374	0,216	1,733	3,667	2,250	1,630	0,158	0,268	0,589	0,110
	4	0,446	0,216	2,065	4,375	2,250	1,944	0,230	0,293	0,786	0,140
	5	0,520	0,216	2,408	5,083	2,250	2,259	0,304	0,317	0,958	0,167
III	1	0,304	0,285	1,066	3,000	3,000	1,000	0,019	0,291	0,064	0,072
	2	0,391	0,285	1,372	3,833	3,000	1,278	0,106	0,321	0,331	0,100
	3	0,474	0,285	1,663	4,667	3,000	1,556	0,189	0,348	0,543	0,129
	4	0,558	0,285	1,956	5,500	3,000	1,833	0,273	0,376	0,725	0,159
	5	0,590	0,285	2,067	6,333	3,000	2,111	0,304	0,387	0,787	0,170
IV	1	0,381	0,337	1,133	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,127	0,084
	2	0,462	0,337	1,373	0,454	0,375	1,210	0,126	0,379	0,332	0,110
	3	0,541	0,337	1,608	0,533	0,375	1,420	0,205	0,405	0,505	0,137
	4	0,622	0,337	1,848	0,611	0,375	1,630	0,286	0,432	0,661	0,162
	5	0,701	0,337	2,080	0,690	0,375	1,840	0,364	0,458	0,794	0,184
V	1	0,457	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,020	0,443	0,046	0,091
	2	0,529	0,436	1,212	0,520	0,450	1,154	0,093	0,467	0,198	0,111
	3	0,598	0,436	1,372	0,589	0,450	1,309	0,162	0,490	0,331	0,129
	4	0,669	0,436	1,534	0,659	0,450	1,463	0,233	0,514	0,453	0,151
	5	0,743	0,436	1,703	0,728	0,450	1,618	0,307	0,538	0,569	0,168

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,025

TP-F3

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,156	0,146	1,071	1,500	1,500	1,000	0,010	0,149	0,070	0,023
	2	0,214	0,146	1,464	2,083	1,500	1,389	0,068	0,168	0,402	0,039
	3	0,271	0,146	1,854	2,667	1,500	1,778	0,125	0,187	0,665	0,052
	4	0,331	0,146	2,267	3,250	1,500	2,167	0,185	0,208	0,891	0,067
	5	0,374	0,146	2,559	3,833	1,500	2,556	0,228	0,222	1,026	0,080
II	1	0,229	0,218	1,052	2,250	2,250	1,000	0,011	0,221	0,051	0,030
	2	0,300	0,218	1,379	2,958	2,250	1,315	0,082	0,245	0,336	0,048
	3	0,373	0,218	1,713	3,667	2,250	1,630	0,155	0,270	0,576	0,065
	4	0,444	0,218	2,036	4,375	2,250	1,944	0,226	0,293	0,770	0,082
	5	0,518	0,218	2,375	5,083	2,250	2,259	0,300	0,318	0,943	0,102
III	1	0,304	0,287	1,061	3,000	3,000	1,000	0,018	0,293	0,060	0,040
	2	0,390	0,287	1,359	3,833	3,000	1,278	0,103	0,321	0,321	0,057
	3	0,472	0,287	1,646	4,667	3,000	1,556	0,185	0,349	0,531	0,079
	4	0,557	0,287	1,942	5,500	3,000	1,833	0,270	0,377	0,717	0,098
	5	0,593	0,287	2,066	6,333	3,000	2,111	0,306	0,389	0,787	0,103
IV	1	0,381	0,338	1,129	0,375	0,375	1,000	0,043	0,352	0,123	0,048
	2	0,460	0,338	1,362	0,454	0,375	1,210	0,122	0,378	0,323	0,067
	3	0,543	0,338	1,607	0,533	0,375	1,420	0,205	0,406	0,505	0,083
	4	0,622	0,338	1,843	0,611	0,375	1,630	0,285	0,433	0,658	0,099
	5	0,704	0,338	2,083	0,690	0,375	1,840	0,366	0,460	0,796	0,116
V	1	0,457	0,437	1,045	0,450	0,450	1,000	0,020	0,444	0,044	0,051
	2	0,526	0,437	1,204	0,520	0,450	1,154	0,089	0,467	0,191	0,066
	3	0,600	0,437	1,373	0,589	0,450	1,309	0,163	0,491	0,332	0,078
	4	0,668	0,437	1,529	0,659	0,450	1,463	0,231	0,514	0,450	0,094
	5	0,741	0,437	1,695	0,728	0,450	1,618	0,304	0,538	0,565	0,106

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,225

TP-F4

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,218	1,052	2,250	2,250	1,000	0,011	0,222	0,051	0,017
	2	0,301	0,218	1,380	2,958	2,250	1,315	0,083	0,246	0,337	0,029
	3	0,372	0,218	1,703	3,667	2,250	1,630	0,154	0,270	0,570	0,039
	4	0,445	0,219	2,035	4,375	2,250	1,944	0,226	0,294	0,770	0,050
	5	0,519	0,219	2,375	5,083	2,250	2,259	0,301	0,319	0,943	0,061
II	1	0,304	0,288	1,058	3,000	3,000	1,000	0,017	0,293	0,057	0,023
	2	0,390	0,288	1,355	3,833	3,000	1,278	0,102	0,322	0,317	0,033
	3	0,474	0,288	1,647	4,667	3,000	1,556	0,186	0,350	0,532	0,046
	4	0,558	0,288	1,940	5,500	3,000	1,833	0,271	0,378	0,716	0,058
	5	0,594	0,288	2,061	6,333	3,000	2,111	0,306	0,390	0,784	0,063
III	1	0,381	0,338	1,127	0,375	0,375	1,000	0,043	0,353	0,122	0,030
	2	0,461	0,338	1,361	0,454	0,375	1,210	0,122	0,379	0,322	0,038
	3	0,543	0,338	1,605	0,533	0,375	1,420	0,205	0,407	0,503	0,048
	4	0,623	0,338	1,840	0,611	0,375	1,630	0,284	0,433	0,656	0,060
	5	0,699	0,339	2,064	0,690	0,375	1,840	0,360	0,459	0,786	0,072
IV	1	0,457	0,438	1,044	0,450	0,450	1,000	0,019	0,444	0,044	0,031
	2	0,526	0,438	1,203	0,520	0,450	1,154	0,089	0,467	0,190	0,038
	3	0,599	0,438	1,369	0,589	0,450	1,309	0,162	0,492	0,329	0,049
	4	0,669	0,438	1,529	0,659	0,450	1,463	0,232	0,515	0,450	0,058
	5	0,743	0,438	1,697	0,728	0,450	1,618	0,305	0,540	0,566	0,066
V	1	0,531	0,512	1,038	0,525	0,525	1,000	0,020	0,518	0,038	0,035
	2	0,616	0,512	1,204	0,606	0,525	1,155	0,104	0,547	0,191	0,044
	3	0,698	0,512	1,364	0,688	0,525	1,310	0,186	0,574	0,325	0,054
	4	0,781	0,512	1,526	0,769	0,525	1,464	0,269	0,602	0,447	0,064
	5	0,864	0,512	1,688	0,850	0,525	1,619	0,352	0,629	0,560	0,073

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,308

TP-F5

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,219	1,048	2,250	2,250	1,000	0,011	0,222	0,047	0,009
	2	0,301	0,219	1,375	2,958	2,250	1,315	0,082	0,246	0,333	0,016
	3	0,373	0,219	1,701	3,667	2,250	1,630	0,154	0,270	0,568	0,022
	4	0,445	0,219	2,033	4,375	2,250	1,944	0,226	0,295	0,769	0,027
	5	0,521	0,219	2,375	5,083	2,250	2,259	0,302	0,320	0,943	0,035
II	1	0,305	0,289	1,056	3,000	3,000	1,000	0,016	0,294	0,055	0,013
	2	0,390	0,289	1,352	3,833	3,000	1,278	0,102	0,323	0,315	0,018
	3	0,473	0,289	1,636	4,667	3,000	1,556	0,184	0,350	0,525	0,029
	4	0,560	0,289	1,939	5,500	3,000	1,833	0,271	0,379	0,715	0,034
	5	0,591	0,289	2,046	6,333	3,000	2,111	0,302	0,390	0,776	0,037
III	1	0,381	0,339	1,124	0,375	0,375	1,000	0,042	0,353	0,119	0,015
	2	0,460	0,339	1,356	0,454	0,375	1,210	0,121	0,380	0,318	0,022
	3	0,543	0,340	1,600	0,533	0,375	1,420	0,204	0,407	0,500	0,029
	4	0,621	0,340	1,829	0,611	0,375	1,630	0,281	0,433	0,649	0,034
	5	0,702	0,340	2,066	0,690	0,375	1,840	0,362	0,460	0,786	0,042
IV	1	0,457	0,438	1,042	0,450	0,450	1,000	0,019	0,445	0,042	0,017
	2	0,528	0,438	1,203	0,520	0,450	1,154	0,089	0,468	0,190	0,022
	3	0,600	0,439	1,368	0,589	0,450	1,309	0,161	0,492	0,328	0,027
	4	0,669	0,439	1,526	0,659	0,450	1,463	0,231	0,515	0,448	0,032
	5	0,741	0,439	1,689	0,728	0,450	1,618	0,302	0,539	0,560	0,037
V	1	0,532	0,513	1,038	0,525	0,525	1,000	0,020	0,519	0,038	0,021
	2	0,666	0,513	1,299	0,606	0,525	1,155	0,153	0,564	0,272	0,027
	3	0,802	0,513	1,563	0,688	0,525	1,310	0,289	0,609	0,474	0,038
	4	0,935	0,513	1,824	0,769	0,525	1,464	0,422	0,654	0,646	0,049
	5	1,073	0,513	2,092	0,850	0,525	1,619	0,560	0,700	0,800	0,059

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,313

TP-F6

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,219	1,047	2,250	2,250	1,000	0,010	0,223	0,047	0,006
	2	0,301	0,219	1,372	2,958	2,250	1,315	0,082	0,246	0,331	0,010
	3	0,373	0,219	1,698	3,667	2,250	1,630	0,153	0,270	0,566	0,015
	4	0,444	0,219	2,022	4,375	2,250	1,944	0,224	0,294	0,762	0,018
	5	0,519	0,220	2,364	5,083	2,250	2,259	0,300	0,319	0,938	0,023
II	1	0,305	0,290	1,054	3,000	3,000	1,000	0,015	0,295	0,053	0,008
	2	0,390	0,290	1,345	3,833	3,000	1,278	0,100	0,323	0,309	0,011
	3	0,473	0,290	1,631	4,667	3,000	1,556	0,183	0,351	0,521	0,019
	4	0,560	0,290	1,933	5,500	3,000	1,833	0,270	0,380	0,712	0,019
	5	0,591	0,290	2,037	6,333	3,000	2,111	0,301	0,390	0,771	0,022
III	1	0,381	0,340	1,120	0,375	0,375	1,000	0,041	0,354	0,115	0,006
	2	0,461	0,340	1,355	0,454	0,375	1,210	0,121	0,381	0,317	0,009
	3	0,544	0,340	1,597	0,533	0,375	1,420	0,203	0,408	0,498	0,010
	4	0,620	0,341	1,822	0,611	0,375	1,630	0,280	0,434	0,645	0,015
	5	0,702	0,341	2,061	0,690	0,375	1,840	0,362	0,461	0,784	0,017
IV	1	0,457	0,439	1,041	0,450	0,450	1,000	0,018	0,445	0,040	0,011
	2	0,527	0,439	1,200	0,520	0,450	1,154	0,088	0,469	0,188	0,015
	3	0,599	0,439	1,363	0,589	0,450	1,309	0,159	0,492	0,324	0,015
	4	0,671	0,439	1,527	0,659	0,450	1,463	0,231	0,516	0,448	0,021
	5	0,739	0,439	1,683	0,728	0,450	1,618	0,300	0,539	0,556	0,026
V	1	0,533	0,514	1,039	0,525	0,525	1,000	0,020	0,520	0,038	0,012
	2	0,615	0,514	1,198	0,606	0,525	1,155	0,102	0,548	0,186	0,017
	3	0,698	0,514	1,359	0,688	0,525	1,310	0,184	0,575	0,321	0,020
	4	0,785	0,514	1,529	0,769	0,525	1,464	0,272	0,604	0,450	0,023
	5	0,866	0,514	1,685	0,850	0,525	1,619	0,352	0,631	0,558	0,027

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,317

TP-F7

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,220	1,044	2,250	2,250	1,000	0,010	0,223	0,043	0.A.
	2	0,301	0,220	1,368	2,958	2,250	1,315	0,081	0,247	0,328	0,008
	3	0,372	0,220	1,693	3,667	2,250	1,630	0,152	0,271	0,563	0,010
	4	0,445	0,220	2,022	4,375	2,250	1,944	0,225	0,295	0,762	0,015
	5	0,520	0,220	2,363	5,083	2,250	2,259	0,300	0,320	0,937	0,017
II	1	0,305	0,291	1,050	3,000	3,000	1,000	0,014	0,295	0,049	0,006
	2	0,390	0,291	1,342	3,833	3,000	1,278	0,099	0,324	0,307	0,010
	3	0,473	0,291	1,627	4,667	3,000	1,556	0,182	0,351	0,518	0,014
	4	0,561	0,291	1,929	5,500	3,000	1,833	0,270	0,381	0,709	0,017
	5	0,590	0,291	2,029	6,333	3,000	2,111	0,299	0,391	0,766	0,020
III	1	0,381	0,341	1,117	0,375	0,375	1,000	0,040	0,355	0,112	0.A.
	2	0,461	0,341	1,352	0,454	0,375	1,210	0,120	0,381	0,315	0,012
	3	0,543	0,341	1,591	0,533	0,375	1,420	0,202	0,409	0,494	0,015
	4	0,620	0,341	1,815	0,611	0,375	1,630	0,278	0,434	0,641	0,018
	5	0,702	0,342	2,055	0,690	0,375	1,840	0,360	0,462	0,780	0,019
IV	1	0,457	0,440	1,039	0,450	0,450	1,000	0,017	0,446	0,038	0,010
	2	0,528	0,440	1,200	0,520	0,450	1,154	0,088	0,469	0,187	0,012
	3	0,599	0,440	1,362	0,589	0,450	1,309	0,159	0,493	0,323	0,014
	4	0,671	0,440	1,526	0,659	0,450	1,463	0,231	0,517	0,447	0,017
	5	0,740	0,440	1,681	0,728	0,450	1,618	0,300	0,540	0,555	0,018
V	1	0,534	0,515	1,038	0,525	0,525	1,000	0,020	0,521	0,038	0,010
	2	0,615	0,515	1,195	0,606	0,525	1,155	0,100	0,548	0,183	0,012
	3	0,698	0,515	1,356	0,688	0,525	1,310	0,183	0,576	0,318	0,017
	4	0,786	0,515	1,527	0,769	0,525	1,464	0,271	0,605	0,448	0,020
	5	0,867	0,515	1,684	0,850	0,525	1,619	0,352	0,632	0,557	0,021

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,325

TP-F8

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,220	1,043	2,250	2,250	1,000	0,009	0,223	0,042	0,005
	2	0,301	0,220	1,366	2,958	2,250	1,315	0,081	0,247	0,326	0,010
	3	0,373	0,220	1,692	3,667	2,250	1,630	0,152	0,271	0,562	0,011
	4	0,445	0,220	2,021	4,375	2,250	1,944	0,225	0,295	0,762	0,014
	5	0,519	0,220	2,355	5,083	2,250	2,259	0,298	0,320	0,933	0,015
		0,000	0,000								
II	1	0,305	0,291	1,048	3,000	3,000	1,000	0,014	0,296	0,047	0,007
	2	0,390	0,291	1,339	3,833	3,000	1,278	0,099	0,324	0,305	0,009
	3	0,473	0,291	1,622	4,667	3,000	1,556	0,181	0,352	0,515	0,012
	4	0,560	0,291	1,923	5,500	3,000	1,833	0,269	0,381	0,706	0,014
	5	0,592	0,291	2,030	6,333	3,000	2,111	0,300	0,391	0,767	0,016
		0,000	0,000								
III	1	0,380	0,342	1,113	0,375	0,375	1,000	0,039	0,355	0,109	0,008
	2	0,462	0,342	1,350	0,454	0,375	1,210	0,120	0,382	0,313	0,011
	3	0,543	0,342	1,588	0,533	0,375	1,420	0,201	0,409	0,492	0,013
	4	0,620	0,342	1,814	0,611	0,375	1,630	0,278	0,435	0,640	0,017
	5	0,702	0,342	2,054	0,690	0,375	1,840	0,360	0,462	0,780	0,018
		0,000	0,000								
IV	1	0,457	0,440	1,037	0,450	0,450	1,000	0,016	0,446	0,037	0,009
	2	0,529	0,440	1,201	0,520	0,450	1,154	0,088	0,470	0,188	0,011
	3	0,600	0,440	1,361	0,589	0,450	1,309	0,159	0,493	0,322	0,012
	4	0,669	0,441	1,519	0,659	0,450	1,463	0,229	0,517	0,442	0,015
	5	0,740	0,441	1,680	0,728	0,450	1,618	0,300	0,541	0,554	0,017
		0,000	0,000								
V	1	0,534	0,515	1,038	0,525	0,525	1,000	0,020	0,521	0,038	0,008
	2	0,614	0,515	1,193	0,606	0,525	1,155	0,100	0,548	0,182	0,012
	3	0,697	0,515	1,354	0,688	0,525	1,310	0,182	0,576	0,317	0,014
	4	0,784	0,515	1,524	0,769	0,525	1,464	0,270	0,605	0,446	0,018
	5	0,867	0,515	1,684	0,850	0,525	1,619	0,352	0,632	0,557	0,020

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,329

TP-F9

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,220	1,043	2,250	2,250	1,000	0,009	0,223	0,042	0,006
	2	0,300	0,220	1,364	2,958	2,250	1,315	0,080	0,247	0,325	0,006
	3	0,372	0,220	1,690	3,667	2,250	1,630	0,152	0,271	0,561	0,012
	4	0,444	0,220	2,014	4,375	2,250	1,944	0,223	0,295	0,758	0,011
	5	0,518	0,220	2,351	5,083	2,250	2,259	0,298	0,320	0,931	0,015
II	1	0,305	0,292	1,046	3,000	3,000	1,000	0,013	0,296	0,045	0,005
	2	0,390	0,292	1,338	3,833	3,000	1,278	0,098	0,324	0,303	0,010
	3	0,473	0,292	1,621	4,667	3,000	1,556	0,181	0,352	0,514	0,011
	4	0,559	0,292	1,918	5,500	3,000	1,833	0,268	0,381	0,703	0,014
	5	0,592	0,292	2,029	6,333	3,000	2,111	0,300	0,392	0,766	0,015
III	1	0,381	0,342	1,113	0,375	0,375	1,000	0,039	0,355	0,109	0,009
	2	0,461	0,342	1,346	0,454	0,375	1,210	0,119	0,382	0,311	0,012
	3	0,543	0,342	1,587	0,533	0,375	1,420	0,201	0,409	0,491	0,012
	4	0,619	0,342	1,809	0,611	0,375	1,630	0,277	0,435	0,637	0,015
	5	0,703	0,342	2,054	0,690	0,375	1,840	0,361	0,463	0,780	0,016
IV	1	0,457	0,441	1,036	0,450	0,450	1,000	0,016	0,446	0,036	0,009
	2	0,530	0,441	1,203	0,520	0,450	1,154	0,089	0,470	0,190	0,011
	3	0,598	0,441	1,358	0,589	0,450	1,309	0,158	0,493	0,319	0,012
	4	0,669	0,441	1,517	0,659	0,450	1,463	0,228	0,517	0,441	0,014
	5	0,740	0,441	1,678	0,728	0,450	1,618	0,299	0,541	0,553	0,015
V	1	0,535	0,515	1,039	0,525	0,525	1,000	0,020	0,522	0,038	0,007
	2	0,614	0,515	1,191	0,606	0,525	1,155	0,098	0,548	0,179	0,010
	3	0,699	0,515	1,357	0,688	0,525	1,310	0,184	0,577	0,319	0,012
	4	0,782	0,515	1,518	0,769	0,525	1,464	0,267	0,604	0,442	0,015
	5	0,867	0,515	1,682	0,850	0,525	1,619	0,352	0,632	0,556	0,019



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,511

TP-F10

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,220	1,042	2,250	2,250	1,000	0,009	0,223	0,042	0.A.
	2	0,301	0,220	1,364	2,958	2,250	1,315	0,080	0,247	0,325	0,008
	3	0,373	0,220	1,690	3,667	2,250	1,630	0,152	0,271	0,561	0,010
	4	0,443	0,220	2,008	4,375	2,250	1,944	0,222	0,295	0,755	0,012
	5	0,518	0,221	2,348	5,083	2,250	2,259	0,297	0,320	0,930	0,014
II	1	0,306	0,292	1,046	3,000	3,000	1,000	0,014	0,296	0,046	o. A.
	2	0,389	0,292	1,333	3,833	3,000	1,278	0,097	0,324	0,300	0,008
	3	0,473	0,292	1,621	4,667	3,000	1,556	0,181	0,352	0,515	0,011
	4	0,558	0,292	1,913	5,500	3,000	1,833	0,266	0,381	0,700	0,014
	5	0,593	0,292	2,030	6,333	3,000	2,111	0,301	0,392	0,767	0,017
III	1	0,382	0,343	1,114	0,375	0,375	1,000	0,039	0,356	0,110	0,007
	2	0,461	0,343	1,345	0,454	0,375	1,210	0,118	0,382	0,310	0,009
	3	0,543	0,343	1,585	0,533	0,375	1,420	0,200	0,409	0,490	0,011
	4	0,619	0,343	1,807	0,611	0,375	1,630	0,276	0,435	0,636	0,015
	5	0,704	0,343	2,053	0,690	0,375	1,840	0,361	0,463	0,780	0,018
IV	1	0,457	0,441	1,037	0,450	0,450	1,000	0,016	0,446	0,036	0,007
	2	0,529	0,441	1,201	0,520	0,450	1,154	0,089	0,470	0,188	0,009
	3	0,598	0,441	1,357	0,589	0,450	1,309	0,158	0,493	0,319	0,012
	4	0,669	0,441	1,518	0,659	0,450	1,463	0,228	0,517	0,442	0,014
	5	0,741	0,441	1,680	0,728	0,450	1,618	0,300	0,541	0,554	0,018
V	1	0,534	0,516	1,036	0,525	0,525	1,000	0,019	0,522	0,036	0,008
	2	0,613	0,516	1,190	0,606	0,525	1,155	0,098	0,548	0,178	0,010
	3	0,699	0,515	1,356	0,688	0,525	1,310	0,183	0,577	0,318	0,014
	4	0,784	0,515	1,520	0,769	0,525	1,464	0,268	0,605	0,443	0,017
	5	0,868	0,516	1,683	0,850	0,525	1,619	0,352	0,633	0,556	0,019

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,59

TP-T1

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,221	1,037	2,250	2,250	1,000	0,008	0,223	0,037	0,005
	2	2,958	2,250	1,315	2,958	2,250	1,315	0,708	2,486	0,285	0,015
	3	3,667	2,250	1,630	3,667	2,250	1,630	1,417	2,722	0,520	0,029
	4	4,375	2,250	1,944	4,375	2,250	1,944	2,125	2,958	0,718	0,048
	5	5,083	2,250	2,259	5,083	2,250	2,259	2,833	3,194	0,887	0,063
II	1	3,000	3,000	1,000	3,000	3,000	1,000	0,000	3,000	0,000	0,008
	2	3,833	3,000	1,278	3,833	3,000	1,278	0,833	3,278	0,254	0,024
	3	4,667	3,000	1,556	4,667	3,000	1,556	1,667	3,556	0,469	0,041
	4	5,500	3,000	1,833	5,500	3,000	1,833	2,500	3,833	0,652	0,063
	5	6,333	3,000	2,111	6,333	3,000	2,111	3,333	4,111	0,811	0,074
III	1	0,375	0,375	1,000	0,375	0,375	1,000	0,000	0,375	0,000	0,013
	2	0,454	0,375	1,210	0,454	0,375	1,210	0,079	0,401	0,196	0,035
	3	0,533	0,375	1,420	0,533	0,375	1,420	0,158	0,428	0,368	0,056
	4	0,611	0,375	1,630	0,611	0,375	1,630	0,236	0,454	0,521	0,083
	5	0,690	0,375	1,840	0,690	0,375	1,840	0,315	0,480	0,656	0,107
IV	1	0,450	0,450	1,000	0,450	0,450	1,000	0,000	0,450	0,000	0,021
	2	0,520	0,450	1,154	0,520	0,450	1,154	0,070	0,473	0,147	0,041
	3	0,589	0,450	1,309	0,589	0,450	1,309	0,139	0,496	0,280	0,063
	4	0,659	0,450	1,463	0,659	0,450	1,463	0,209	0,520	0,401	0,085
	5	0,728	0,450	1,618	0,728	0,450	1,618	0,278	0,543	0,512	0,107
V	1	0,525	0,525	1,000	0,525	0,525	1,000	0,000	0,525	0,000	0,033
	2	0,606	0,525	1,155	0,606	0,525	1,155	0,081	0,552	0,147	0,058
	3	0,688	0,525	1,310	0,688	0,525	1,310	0,163	0,579	0,281	0,082
	4	0,769	0,525	1,464	0,769	0,525	1,464	0,244	0,606	0,402	0,111
	5	0,850	0,525	1,619	0,850	0,525	1,619	0,325	0,633	0,513	0,141

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,04

TP-T2

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [‰]
I	1	0,229	0,220	1,041	2,250	2,250	1,000	0,009	0,223	0,040	0,025
	2	0,300	0,221	1,358	2,958	2,250	1,315	0,079	0,247	0,320	0,053
	3	0,373	0,221	1,692	3,667	2,250	1,630	0,153	0,271	0,562	0,089
	4	0,446	0,221	2,021	4,375	2,250	1,944	0,225	0,296	0,762	0,128
	5	0,520	0,221	2,355	5,083	2,250	2,259	0,299	0,320	0,934	0,168
II	1	0,305	0,293	1,040	3,000	3,000	1,000	0,012	0,297	0,040	0,032
	2	0,390	0,293	1,332	3,833	3,000	1,278	0,097	0,326	0,299	0,077
	3	0,475	0,293	1,618	4,667	3,000	1,556	0,181	0,354	0,513	0,119
	4	0,560	0,293	1,910	5,500	3,000	1,833	0,267	0,382	0,698	0,161
	5	0,593	0,293	2,020	6,333	3,000	2,111	0,299	0,393	0,761	0,182
III	1	0,382	0,345	1,107	0,375	0,375	1,000	0,037	0,357	0,103	0,058
	2	0,462	0,345	1,339	0,454	0,375	1,210	0,117	0,384	0,305	0,099
	3	0,543	0,345	1,574	0,533	0,375	1,420	0,198	0,411	0,481	0,140
	4	0,623	0,345	1,807	0,611	0,375	1,630	0,278	0,438	0,636	0,182
	5	0,704	0,345	2,040	0,690	0,375	1,840	0,359	0,465	0,772	0,224
IV	1	0,458	0,443	1,034	0,450	0,450	1,000	0,015	0,448	0,033	0,066
	2	0,529	0,443	1,193	0,520	0,450	1,154	0,086	0,472	0,182	0,104
	3	0,601	0,443	1,355	0,589	0,450	1,309	0,157	0,496	0,317	0,143
	4	0,672	0,443	1,515	0,659	0,450	1,463	0,229	0,520	0,440	0,178
	5	0,743	0,443	1,675	0,728	0,450	1,618	0,299	0,543	0,551	0,216
V	1	0,535	0,517	1,033	0,525	0,525	1,000	0,017	0,523	0,033	0,090
	2	0,618	0,518	1,194	0,606	0,525	1,155	0,101	0,551	0,182	0,133
	3	0,701	0,518	1,354	0,688	0,525	1,310	0,183	0,579	0,317	0,173
	4	0,785	0,518	1,516	0,769	0,525	1,464	0,267	0,607	0,440	0,216
	5	0,868	0,518	1,677	0,850	0,525	1,619	0,350	0,634	0,552	0,259

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,72

TP-T3

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,220	1,042	2,250	2,250	1,000	0,009	0,223	0,042	0,063
	2	0,300	0,220	1,363	2,958	2,250	1,315	0,080	0,247	0,324	0,111
	3	0,374	0,220	1,695	3,667	2,250	1,630	0,153	0,272	0,564	0,172
	4	0,446	0,220	2,024	4,375	2,250	1,944	0,226	0,296	0,763	0,230
	5	0,520	0,221	2,359	5,083	2,250	2,259	0,300	0,320	0,935	0,289
II	1	0,305	0,293	1,043	3,000	3,000	1,000	0,012	0,297	0,042	0,083
	2	0,391	0,293	1,333	3,833	3,000	1,278	0,098	0,325	0,300	0,150
	3	0,475	0,293	1,622	4,667	3,000	1,556	0,182	0,354	0,515	0,215
	4	0,561	0,293	1,912	5,500	3,000	1,833	0,267	0,382	0,699	0,276
	5	0,593	0,293	2,023	6,333	3,000	2,111	0,300	0,393	0,763	0,301
III	1	0,382	0,345	1,108	0,375	0,375	1,000	0,037	0,357	0,104	0,124
	2	0,462	0,345	1,341	0,454	0,375	1,210	0,118	0,384	0,306	0,187
	3	0,543	0,345	1,575	0,533	0,375	1,420	0,198	0,411	0,482	0,245
	4	0,624	0,345	1,808	0,611	0,375	1,630	0,279	0,438	0,636	0,299
	5	0,705	0,345	2,042	0,690	0,375	1,840	0,360	0,465	0,774	0,358
IV	1	0,458	0,443	1,035	0,450	0,450	1,000	0,015	0,448	0,035	0,139
	2	0,530	0,443	1,195	0,520	0,450	1,154	0,086	0,472	0,183	0,191
	3	0,601	0,443	1,357	0,589	0,450	1,309	0,158	0,496	0,319	0,246
	4	0,672	0,443	1,516	0,659	0,450	1,463	0,229	0,519	0,440	0,297
	5	0,743	0,443	1,677	0,728	0,450	1,618	0,300	0,543	0,552	0,344
V	1	0,535	0,517	1,034	0,525	0,525	1,000	0,018	0,523	0,034	0,173
	2	0,618	0,517	1,196	0,606	0,525	1,155	0,101	0,551	0,184	0,233
	3	0,701	0,517	1,356	0,688	0,525	1,310	0,184	0,579	0,318	0,290
	4	0,785	0,517	1,517	0,769	0,525	1,464	0,267	0,607	0,441	0,345
	5	0,868	0,518	1,678	0,850	0,525	1,619	0,351	0,635	0,553	0,404

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,50

TP-T4

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,220	1,043	2,250	2,250	1,000	0,010	0,223	0,043	0,129
	2	0,301	0,220	1,367	2,958	2,250	1,315	0,081	0,247	0,327	0,206
	3	0,374	0,220	1,698	3,667	2,250	1,630	0,154	0,271	0,566	0,289
	4	0,446	0,220	2,026	4,375	2,250	1,944	0,226	0,296	0,765	0,372
	5	0,521	0,220	2,363	5,083	2,250	2,259	0,300	0,320	0,937	0,448
II	1	0,306	0,293	1,044	3,000	3,000	1,000	0,013	0,297	0,043	0,171
	2	0,391	0,293	1,334	3,833	3,000	1,278	0,098	0,325	0,301	0,265
	3	0,475	0,293	1,623	4,667	3,000	1,556	0,183	0,354	0,516	0,351
	4	0,561	0,293	1,914	5,500	3,000	1,833	0,268	0,382	0,701	0,432
	5	0,594	0,293	2,025	6,333	3,000	2,111	0,301	0,393	0,764	0,465
III	1	0,382	0,345	1,109	0,375	0,375	1,000	0,038	0,357	0,105	0,232
	2	0,463	0,345	1,342	0,454	0,375	1,210	0,118	0,384	0,307	0,315
	3	0,543	0,345	1,576	0,533	0,375	1,420	0,199	0,411	0,483	0,392
	4	0,624	0,345	1,811	0,611	0,375	1,630	0,279	0,438	0,638	0,459
	5	0,705	0,345	2,044	0,690	0,375	1,840	0,360	0,465	0,775	0,534
IV	1	0,459	0,443	1,036	0,450	0,450	1,000	0,016	0,448	0,035	0,256
	2	0,530	0,443	1,197	0,520	0,450	1,154	0,087	0,472	0,184	0,322
	3	0,601	0,443	1,357	0,589	0,450	1,309	0,158	0,496	0,319	0,388
	4	0,672	0,443	1,517	0,659	0,450	1,463	0,229	0,520	0,441	0,455
	5	0,744	0,443	1,678	0,728	0,450	1,618	0,301	0,543	0,553	0,509
V	1	0,535	0,517	1,035	0,525	0,525	1,000	0,018	0,523	0,035	0,299
	2	0,619	0,517	1,196	0,606	0,525	1,155	0,101	0,551	0,184	0,373
	3	0,702	0,517	1,356	0,688	0,525	1,310	0,184	0,579	0,318	0,444
	4	0,785	0,517	1,518	0,769	0,525	1,464	0,268	0,607	0,442	0,511
	5	0,869	0,517	1,679	0,850	0,525	1,619	0,351	0,635	0,553	0,576

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,37

TP-T5

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,220	1,046	2,250	2,250	1,000	0,010	0,223	0,045	0,224
	2	0,301	0,220	1,369	2,958	2,250	1,315	0,081	0,247	0,329	0,315
	3	0,374	0,220	1,699	3,667	2,250	1,630	0,154	0,271	0,567	0,412
	4	0,446	0,220	2,028	4,375	2,250	1,944	0,226	0,296	0,765	0,512
	5	0,521	0,220	2,367	5,083	2,250	2,259	0,301	0,320	0,939	0,609
II	1	0,306	0,293	1,045	3,000	3,000	1,000	0,013	0,297	0,044	0,274
	2	0,391	0,293	1,335	3,833	3,000	1,278	0,098	0,325	0,301	0,392
	3	0,476	0,293	1,625	4,667	3,000	1,556	0,183	0,354	0,517	0,498
	4	0,561	0,293	1,917	5,500	3,000	1,833	0,268	0,382	0,702	0,591
	5	0,594	0,293	2,027	6,333	3,000	2,111	0,301	0,393	0,765	0,627
III	1	0,382	0,345	1,110	0,375	0,375	1,000	0,038	0,357	0,106	0,361
	2	0,463	0,345	1,344	0,454	0,375	1,210	0,119	0,384	0,309	0,453
	3	0,544	0,345	1,578	0,533	0,375	1,420	0,199	0,411	0,485	0,542
	4	0,625	0,345	1,813	0,611	0,375	1,630	0,280	0,438	0,639	0,624
	5	0,706	0,345	2,046	0,690	0,375	1,840	0,361	0,465	0,776	0,697
IV	1	0,459	0,443	1,037	0,450	0,450	1,000	0,016	0,448	0,036	0,388
	2	0,530	0,443	1,197	0,520	0,450	1,154	0,087	0,472	0,185	0,463
	3	0,602	0,443	1,359	0,589	0,450	1,309	0,159	0,496	0,320	0,540
	4	0,673	0,443	1,518	0,659	0,450	1,463	0,230	0,520	0,442	0,608
	5	0,744	0,443	1,679	0,728	0,450	1,618	0,301	0,543	0,554	0,673
V	1	0,536	0,517	1,036	0,525	0,525	1,000	0,018	0,523	0,035	0,443
	2	0,619	0,517	1,197	0,606	0,525	1,155	0,102	0,551	0,185	0,521
	3	0,702	0,517	1,357	0,688	0,525	1,310	0,185	0,579	0,319	0,600
	4	0,786	0,517	1,518	0,769	0,525	1,464	0,268	0,607	0,442	0,671
	5	0,869	0,517	1,679	0,850	0,525	1,619	0,352	0,635	0,554	0,738

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,29

TP-T6

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,230	0,220	1,049	2,250	2,250	1,000	0,011	0,223	0,048	0,332
	2	0,302	0,220	1,373	2,958	2,250	1,315	0,082	0,247	0,331	0,420
	3	0,374	0,220	1,701	3,667	2,250	1,630	0,154	0,271	0,569	0,517
	4	0,447	0,220	2,031	4,375	2,250	1,944	0,227	0,296	0,767	0,630
	5	0,522	0,220	2,371	5,083	2,250	2,259	0,302	0,321	0,941	0,741
II	1	0,306	0,293	1,046	3,000	3,000	1,000	0,013	0,297	0,045	0,377
	2	0,391	0,293	1,336	3,833	3,000	1,278	0,098	0,326	0,303	0,506
	3	0,476	0,293	1,627	4,667	3,000	1,556	0,183	0,354	0,518	0,614
	4	0,562	0,293	1,917	5,500	3,000	1,833	0,269	0,382	0,703	0,716
	5	0,594	0,293	2,029	6,333	3,000	2,111	0,301	0,393	0,766	0,754
III	1	0,383	0,344	1,111	0,375	0,375	1,000	0,038	0,357	0,107	0,468
	2	0,463	0,345	1,344	0,454	0,375	1,210	0,119	0,384	0,309	0,565
	3	0,544	0,345	1,578	0,533	0,375	1,420	0,199	0,411	0,485	0,661
	4	0,625	0,345	1,813	0,611	0,375	1,630	0,280	0,438	0,640	0,744
	5	0,706	0,345	2,048	0,690	0,375	1,840	0,361	0,465	0,776	0,827
IV	1	0,459	0,443	1,037	0,450	0,450	1,000	0,016	0,448	0,037	0,498
	2	0,530	0,443	1,197	0,520	0,450	1,154	0,087	0,472	0,185	0,576
	3	0,602	0,443	1,359	0,589	0,450	1,309	0,159	0,496	0,321	0,647
	4	0,673	0,443	1,519	0,659	0,450	1,463	0,230	0,520	0,443	0,722
	5	0,744	0,443	1,680	0,728	0,450	1,618	0,301	0,543	0,554	0,789
V	1	0,536	0,517	1,036	0,525	0,525	1,000	0,019	0,523	0,036	0,547
	2	0,620	0,517	1,198	0,606	0,525	1,155	0,102	0,551	0,185	0,625
	3	0,703	0,517	1,358	0,688	0,525	1,310	0,185	0,579	0,320	0,705
	4	0,786	0,517	1,519	0,769	0,525	1,464	0,269	0,607	0,443	0,780
	5	0,869	0,517	1,680	0,850	0,525	1,619	0,352	0,635	0,554	0,849

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,23

TP-T7

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [‰]
I	1	0,231	0,220	1,051	2,250	2,250	1,000	0,011	0,223	0,050	0,400
	2	0,302	0,220	1,374	2,958	2,250	1,315	0,082	0,247	0,333	0,479
	3	0,375	0,220	1,703	3,667	2,250	1,630	0,155	0,271	0,570	0,577
	4	0,447	0,220	2,032	4,375	2,250	1,944	0,227	0,296	0,768	0,693
	5	0,522	0,220	2,372	5,083	2,250	2,259	0,302	0,320	0,941	0,819
II	1	0,306	0,292	1,047	3,000	3,000	1,000	0,014	0,297	0,046	0,433
	2	0,391	0,292	1,338	3,833	3,000	1,278	0,099	0,325	0,304	0,566
	3	0,476	0,293	1,627	4,667	3,000	1,556	0,184	0,354	0,519	0,679
	4	0,562	0,293	1,920	5,500	3,000	1,833	0,269	0,382	0,704	0,784
	5	0,594	0,293	2,030	6,333	3,000	2,111	0,302	0,393	0,767	0,824
III	1	0,383	0,344	1,112	0,375	0,375	1,000	0,038	0,357	0,108	0,525
	2	0,463	0,344	1,345	0,454	0,375	1,210	0,119	0,384	0,309	0,622
	3	0,544	0,345	1,579	0,533	0,375	1,420	0,200	0,411	0,485	0,720
	4	0,625	0,345	1,814	0,611	0,375	1,630	0,281	0,438	0,640	0,804
	5	0,706	0,345	2,048	0,690	0,375	1,840	0,361	0,465	0,777	0,890
IV	1	0,459	0,443	1,037	0,450	0,450	1,000	0,016	0,448	0,037	0,548
	2	0,530	0,443	1,198	0,520	0,450	1,154	0,088	0,472	0,186	0,624
	3	0,602	0,443	1,359	0,589	0,450	1,309	0,159	0,496	0,321	0,698
	4	0,673	0,443	1,520	0,659	0,450	1,463	0,230	0,520	0,443	0,772
	5	0,744	0,443	1,681	0,728	0,450	1,618	0,302	0,543	0,555	0,842
V	1	0,536	0,517	1,036	0,525	0,525	1,000	0,019	0,523	0,036	0,588
	2	0,619	0,517	1,197	0,606	0,525	1,155	0,102	0,551	0,185	0,667
	3	0,703	0,517	1,358	0,688	0,525	1,310	0,185	0,579	0,320	0,749
	4	0,786	0,517	1,519	0,769	0,525	1,464	0,269	0,607	0,443	0,823
	5	0,869	0,518	1,680	0,850	0,525	1,619	0,352	0,635	0,554	0,893



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,19

TP-T8

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,156	0,146	1,072	2,250	2,250	1,000	0,011	0,149	0,071	0,419
	2	0,214	0,146	1,470	2,958	2,250	1,315	0,069	0,169	0,407	0,489
	3	0,273	0,146	1,872	3,667	2,250	1,630	0,127	0,188	0,676	0,557
	4	0,333	0,146	2,278	4,375	2,250	1,944	0,187	0,208	0,896	0,645
	5	0,376	0,146	2,573	5,083	2,250	2,259	0,230	0,223	1,032	0,720
II	1	0,231	0,220	1,050	3,000	3,000	1,000	0,011	0,223	0,049	0,416
	2	0,302	0,220	1,373	3,833	3,000	1,278	0,082	0,247	0,332	0,510
	3	0,374	0,220	1,702	4,667	3,000	1,556	0,154	0,271	0,569	0,613
	4	0,447	0,220	2,033	5,500	3,000	1,833	0,227	0,296	0,768	0,726
	5	0,522	0,220	2,372	6,333	3,000	2,111	0,302	0,321	0,941	0,840
III	1	0,306	0,292	1,048	0,375	0,375	1,000	0,014	0,297	0,047	0,448
	2	0,391	0,293	1,338	0,454	0,375	1,210	0,099	0,326	0,304	0,580
	3	0,476	0,293	1,627	0,533	0,375	1,420	0,184	0,354	0,519	0,696
	4	0,562	0,293	1,919	0,611	0,375	1,630	0,269	0,382	0,703	0,804
	5	0,594	0,293	2,029	0,690	0,375	1,840	0,301	0,393	0,766	0,843
IV	1	0,383	0,344	1,111	0,450	0,450	1,000	0,038	0,357	0,107	0,531
	2	0,463	0,344	1,345	0,520	0,450	1,154	0,119	0,384	0,309	0,635
	3	0,544	0,345	1,579	0,589	0,450	1,309	0,200	0,411	0,485	0,732
	4	0,625	0,345	1,813	0,659	0,450	1,463	0,280	0,438	0,640	0,819
	5	0,706	0,345	2,048	0,728	0,450	1,618	0,361	0,465	0,777	0,901
V	1	0,459	0,443	1,037	0,525	0,525	1,000	0,017	0,448	0,037	0,557
	2	0,530	0,443	1,198	0,606	0,525	1,155	0,088	0,472	0,185	0,637
	3	0,602	0,443	1,359	0,688	0,525	1,310	0,159	0,496	0,321	0,711
	4	0,673	0,443	1,519	0,769	0,525	1,464	0,230	0,520	0,443	0,785
	5	0,744	0,443	1,680	0,850	0,525	1,619	0,301	0,543	0,554	0,850

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,13

TP-T9

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,157	0,146	1,074	2,250	2,250	1,000	0,011	0,149	0,072	0,443
	2	0,215	0,146	1,471	2,958	2,250	1,315	0,069	0,169	0,407	0,511
	3	0,273	0,146	1,872	3,667	2,250	1,630	0,127	0,188	0,676	0,577
	4	0,333	0,146	2,279	4,375	2,250	1,944	0,187	0,208	0,897	0,660
	5	0,376	0,146	2,574	5,083	2,250	2,259	0,230	0,223	1,032	0,725
II	1	0,231	0,220	1,050	3,000	3,000	1,000	0,011	0,224	0,049	0,435
	2	0,302	0,220	1,375	3,833	3,000	1,278	0,083	0,247	0,333	0,521
	3	0,375	0,220	1,703	4,667	3,000	1,556	0,155	0,272	0,570	0,617
	4	0,447	0,220	2,032	5,500	3,000	1,833	0,227	0,296	0,768	0,724
	5	0,521	0,220	2,370	6,333	3,000	2,111	0,301	0,320	0,941	0,832
III	1	0,306	0,292	1,048	0,375	0,375	1,000	0,014	0,297	0,047	0,458
	2	0,391	0,293	1,338	0,454	0,375	1,210	0,099	0,326	0,304	0,576
	3	0,476	0,293	1,628	0,533	0,375	1,420	0,184	0,354	0,519	0,694
	4	0,562	0,293	1,919	0,611	0,375	1,630	0,269	0,382	0,704	0,799
	5	0,594	0,293	2,029	0,690	0,375	1,840	0,301	0,393	0,766	0,836
IV	1	0,383	0,344	1,113	0,450	0,450	1,000	0,039	0,357	0,109	0,531
	2	0,464	0,344	1,346	0,520	0,450	1,154	0,119	0,384	0,310	0,635
	3	0,544	0,345	1,579	0,589	0,450	1,309	0,200	0,411	0,485	0,729
	4	0,625	0,345	1,813	0,659	0,450	1,463	0,280	0,438	0,640	0,816
	5	0,706	0,345	2,047	0,728	0,450	1,618	0,361	0,465	0,776	0,895
V	1	0,459	0,443	1,038	0,525	0,525	1,000	0,017	0,448	0,037	0,559
	2	0,530	0,443	1,198	0,606	0,525	1,155	0,088	0,472	0,185	0,636
	3	0,602	0,443	1,358	0,688	0,525	1,310	0,159	0,496	0,320	0,708
	4	0,673	0,443	1,519	0,769	0,525	1,464	0,230	0,520	0,443	0,781
	5	0,744	0,443	1,679	0,850	0,525	1,619	0,301	0,543	0,554	0,842

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,06

TP-T10

Wassergehalt: w [%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{pr}$  [%]

100

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	$q^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$p^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$q^{(ist)}/p^{(ist)}$ [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,157	0,146	1,076	2,250	2,250	1,000	0,011	0,150	0,074	0,456
	2	0,215	0,146	1,473	2,958	2,250	1,315	0,069	0,169	0,409	0,527
	3	0,274	0,146	1,874	3,667	2,250	1,630	0,128	0,189	0,677	0,587
	4	0,333	0,146	2,282	4,375	2,250	1,944	0,187	0,208	0,898	0,657
	5	0,376	0,146	2,575	5,083	2,250	2,259	0,230	0,223	1,033	0,724
II	1	0,231	0,220	1,050	3,000	3,000	1,000	0,011	0,224	0,050	0,446
	2	0,303	0,220	1,375	3,833	3,000	1,278	0,083	0,248	0,333	0,525
	3	0,375	0,220	1,704	4,667	3,000	1,556	0,155	0,272	0,570	0,613
	4	0,447	0,220	2,033	5,500	3,000	1,833	0,227	0,296	0,768	0,716
	5	0,522	0,220	2,370	6,333	3,000	2,111	0,302	0,321	0,941	0,827
III	1	0,307	0,292	1,048	0,375	0,375	1,000	0,014	0,297	0,047	0,458
	2	0,391	0,293	1,338	0,454	0,375	1,210	0,099	0,325	0,303	0,566
	3	0,476	0,293	1,628	0,533	0,375	1,420	0,184	0,354	0,519	0,684
	4	0,562	0,293	1,920	0,611	0,375	1,630	0,269	0,382	0,704	0,792
	5	0,594	0,293	2,030	0,690	0,375	1,840	0,301	0,393	0,767	0,833
IV	1	0,383	0,344	1,114	0,450	0,450	1,000	0,039	0,357	0,110	0,523
	2	0,464	0,344	1,347	0,520	0,450	1,154	0,119	0,384	0,311	0,629
	3	0,544	0,344	1,579	0,589	0,450	1,309	0,200	0,411	0,486	0,726
	4	0,625	0,345	1,813	0,659	0,450	1,463	0,280	0,438	0,640	0,811
	5	0,706	0,345	2,048	0,728	0,450	1,618	0,361	0,465	0,776	0,891
V	1	0,459	0,442	1,038	0,525	0,525	1,000	0,017	0,448	0,038	0,557
	2	0,531	0,443	1,199	0,606	0,525	1,155	0,088	0,472	0,186	0,629
	3	0,602	0,443	1,359	0,688	0,525	1,310	0,159	0,496	0,321	0,709
	4	0,673	0,443	1,520	0,769	0,525	1,464	0,230	0,519	0,443	0,776
	5	0,744	0,443	1,680	0,850	0,525	1,619	0,301	0,543	0,554	0,845

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,219

TP-F1

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,155	0,144	1,072	1,500	1,500	1,000	0,010	0,148	0,070	0,057
	2	0,215	0,144	1,487	2,083	1,500	1,389	0,070	0,168	0,419	0,092
	3	0,271	0,144	1,879	2,667	1,500	1,778	0,127	0,187	0,680	0,121
	4	0,330	0,144	2,287	3,250	1,500	2,167	0,186	0,206	0,901	0,153
	5	0,372	0,144	2,576	3,833	1,500	2,556	0,228	0,220	1,033	0,174
II	1	0,229	0,212	1,081	2,250	2,250	1,000	0,017	0,218	0,079	0,081
	2	0,300	0,212	1,415	2,958	2,250	1,315	0,088	0,241	0,365	0,117
	3	0,373	0,212	1,760	3,667	2,250	1,630	0,161	0,266	0,606	0,147
	4	0,445	0,212	2,101	4,375	2,250	1,944	0,233	0,290	0,805	0,181
	5	0,518	0,212	2,445	5,083	2,250	2,259	0,306	0,314	0,975	0,216
II	1	0,305	0,282	1,081	3,000	3,000	1,000	0,023	0,290	0,078	0,100
	2	0,389	0,282	1,377	3,833	3,000	1,278	0,106	0,318	0,335	0,138
	3	0,471	0,282	1,670	4,667	3,000	1,556	0,189	0,345	0,548	0,171
	4	0,559	0,282	1,982	5,500	3,000	1,833	0,277	0,375	0,740	0,206
	5	0,591	0,282	2,092	6,333	3,000	2,111	0,308	0,385	0,801	0,218
IV	1	0,381	0,334	1,138	0,375	0,375	1,000	0,046	0,350	0,132	0,119
	2	0,461	0,334	1,378	0,454	0,375	1,210	0,126	0,376	0,336	0,149
	3	0,539	0,334	1,612	0,533	0,375	1,420	0,205	0,403	0,509	0,178
	4	0,620	0,334	1,855	0,611	0,375	1,630	0,286	0,430	0,665	0,209
	5	0,700	0,334	2,092	0,690	0,375	1,840	0,365	0,456	0,801	0,240
V	1	0,456	0,435	1,049	0,450	0,450	1,000	0,021	0,442	0,048	0,127
	2	0,530	0,435	1,219	0,520	0,450	1,154	0,095	0,467	0,204	0,148
	3	0,600	0,435	1,379	0,589	0,450	1,309	0,165	0,490	0,337	0,175
	4	0,672	0,435	1,546	0,659	0,450	1,463	0,237	0,514	0,462	0,200
	5	0,743	0,435	1,707	0,728	0,450	1,618	0,308	0,538	0,572	0,224

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-0,696

TP-F2

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,154	0,145	1,067	1,500	1,500	1,000	0,010	0,148	0,066	0,037
	2	0,213	0,145	1,473	2,083	1,500	1,389	0,068	0,167	0,409	0,056
	3	0,271	0,145	1,873	2,667	1,500	1,778	0,126	0,187	0,676	0,079
	4	0,329	0,145	2,278	3,250	1,500	2,167	0,185	0,206	0,896	0,100
	5	0,371	0,145	2,568	3,833	1,500	2,556	0,227	0,220	1,030	0,113
II	1	0,228	0,212	1,078	2,250	2,250	1,000	0,016	0,217	0,076	0,051
	2	0,300	0,212	1,415	2,958	2,250	1,315	0,088	0,241	0,365	0,072
	3	0,371	0,212	1,748	3,667	2,250	1,630	0,159	0,265	0,599	0,094
	4	0,443	0,212	2,091	4,375	2,250	1,944	0,231	0,289	0,800	0,117
	5	0,516	0,212	2,435	5,083	2,250	2,259	0,304	0,313	0,971	0,141
II	1	0,304	0,283	1,076	3,000	3,000	1,000	0,022	0,290	0,074	0,061
	2	0,388	0,283	1,371	3,833	3,000	1,278	0,105	0,318	0,330	0,085
	3	0,472	0,283	1,667	4,667	3,000	1,556	0,189	0,346	0,546	0,107
	4	0,558	0,283	1,972	5,500	3,000	1,833	0,275	0,375	0,734	0,134
	5	0,592	0,283	2,091	6,333	3,000	2,111	0,309	0,386	0,800	0,142
IV	1	0,381	0,335	1,136	0,375	0,375	1,000	0,046	0,350	0,130	0,070
	2	0,461	0,335	1,375	0,454	0,375	1,210	0,126	0,377	0,333	0,093
	3	0,539	0,335	1,607	0,533	0,375	1,420	0,204	0,403	0,505	0,115
	4	0,622	0,335	1,855	0,611	0,375	1,630	0,287	0,431	0,666	0,134
	5	0,702	0,335	2,095	0,690	0,375	1,840	0,367	0,458	0,802	0,154
V	1	0,455	0,436	1,044	0,450	0,450	1,000	0,019	0,442	0,044	0,076
	2	0,530	0,435	1,220	0,520	0,450	1,154	0,096	0,467	0,205	0,091
	3	0,598	0,435	1,376	0,589	0,450	1,309	0,164	0,489	0,334	0,110
	4	0,672	0,435	1,546	0,659	0,450	1,463	0,238	0,514	0,462	0,125
	5	0,738	0,435	1,696	0,728	0,450	1,618	0,303	0,536	0,565	0,139

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,025

TP-F3

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,154	0,145	1,063	1,500	1,500	1,000	0,009	0,148	0,062	0,017
	2	0,213	0,145	1,470	2,083	1,500	1,389	0,068	0,167	0,406	0,029
	3	0,270	0,145	1,864	2,667	1,500	1,778	0,125	0,186	0,671	0,045
	4	0,329	0,145	2,271	3,250	1,500	2,167	0,184	0,206	0,893	0,056
	5	0,371	0,145	2,561	3,833	1,500	2,556	0,226	0,220	1,027	0,064
II	1	0,228	0,213	1,073	2,250	2,250	1,000	0,015	0,218	0,071	0,028
	2	0,300	0,213	1,409	2,958	2,250	1,315	0,087	0,242	0,360	0,040
	3	0,371	0,213	1,742	3,667	2,250	1,630	0,158	0,265	0,595	0,050
	4	0,443	0,213	2,081	4,375	2,250	1,944	0,230	0,289	0,795	0,069
	5	0,517	0,213	2,428	5,083	2,250	2,259	0,304	0,314	0,968	0,085
II	1	0,305	0,284	1,073	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,071	0,030
	2	0,390	0,284	1,373	3,833	3,000	1,278	0,106	0,319	0,332	0,048
	3	0,473	0,284	1,666	4,667	3,000	1,556	0,189	0,347	0,545	0,061
	4	0,557	0,284	1,957	5,500	3,000	1,833	0,272	0,375	0,726	0,078
	5	0,591	0,284	2,079	6,333	3,000	2,111	0,307	0,387	0,793	0,084
IV	1	0,381	0,336	1,131	0,375	0,375	1,000	0,044	0,351	0,126	0,039
	2	0,461	0,337	1,369	0,454	0,375	1,210	0,124	0,378	0,329	0,053
	3	0,542	0,337	1,610	0,533	0,375	1,420	0,206	0,405	0,507	0,068
	4	0,622	0,337	1,848	0,611	0,375	1,630	0,285	0,432	0,661	0,081
	5	0,705	0,337	2,093	0,690	0,375	1,840	0,368	0,459	0,801	0,093
V	1	0,453	0,436	1,039	0,450	0,450	1,000	0,017	0,442	0,039	0,043
	2	0,528	0,436	1,211	0,520	0,450	1,154	0,092	0,467	0,197	0,054
	3	0,598	0,436	1,371	0,589	0,450	1,309	0,162	0,490	0,331	0,062
	4	0,670	0,437	1,532	0,659	0,450	1,463	0,233	0,515	0,452	0,075
	5	0,741	0,437	1,695	0,728	0,450	1,618	0,304	0,539	0,564	0,084

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,225

TP-F4

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,213	1,076	2,250	2,250	1,000	0,016	0,219	0,074	0,014
	2	0,300	0,213	1,406	2,958	2,250	1,315	0,086	0,242	0,358	0,023
	3	0,370	0,213	1,736	3,667	2,250	1,630	0,157	0,265	0,591	0,030
	4	0,442	0,213	2,076	4,375	2,250	1,944	0,229	0,290	0,792	0,038
	5	0,519	0,213	2,433	5,083	2,250	2,259	0,305	0,315	0,970	0,048
II	1	0,304	0,285	1,068	3,000	3,000	1,000	0,019	0,291	0,066	0,017
	2	0,389	0,285	1,366	3,833	3,000	1,278	0,104	0,319	0,326	0,025
	3	0,473	0,285	1,662	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,542	0,036
	4	0,558	0,285	1,958	5,500	3,000	1,833	0,273	0,376	0,726	0,046
	5	0,592	0,285	2,078	6,333	3,000	2,111	0,307	0,387	0,793	0,050
II	1	0,380	0,337	1,129	0,375	0,375	1,000	0,043	0,351	0,123	0,020
	2	0,459	0,337	1,363	0,454	0,375	1,210	0,122	0,378	0,324	0,030
	3	0,543	0,337	1,612	0,533	0,375	1,420	0,206	0,406	0,508	0,039
	4	0,622	0,337	1,846	0,611	0,375	1,630	0,285	0,432	0,660	0,046
	5	0,703	0,337	2,087	0,690	0,375	1,840	0,366	0,459	0,798	0,057
IV	1	0,454	0,436	1,040	0,450	0,450	1,000	0,017	0,442	0,039	0,025
	2	0,528	0,435	1,211	0,520	0,450	1,154	0,092	0,466	0,197	0,030
	3	0,599	0,436	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,490	0,333	0,038
	4	0,667	0,436	1,531	0,659	0,450	1,463	0,231	0,513	0,451	0,045
	5	0,742	0,438	1,695	0,728	0,450	1,618	0,304	0,539	0,564	0,048
V	1	0,533	0,511	1,045	0,525	0,525	1,000	0,023	0,518	0,044	0,026
	2	0,619	0,511	1,212	0,606	0,525	1,155	0,108	0,547	0,198	0,032
	3	0,700	0,512	1,367	0,688	0,525	1,310	0,188	0,574	0,327	0,040
	4	0,782	0,512	1,528	0,769	0,525	1,464	0,270	0,602	0,449	0,049
	5	0,865	0,510	1,695	0,850	0,525	1,619	0,355	0,629	0,564	0,054

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,308

TP-F5

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,214	1,068	2,250	2,250	1,000	0,015	0,219	0,067	0,007
	2	0,300	0,214	1,401	2,958	2,250	1,315	0,086	0,243	0,353	0,010
	3	0,371	0,214	1,735	3,667	2,250	1,630	0,157	0,267	0,590	0,015
	4	0,444	0,214	2,072	4,375	2,250	1,944	0,230	0,291	0,790	0,019
	5	0,517	0,214	2,415	5,083	2,250	2,259	0,303	0,315	0,961	0,026
II	1	0,304	0,285	1,068	3,000	3,000	1,000	0,019	0,291	0,066	0,009
	2	0,388	0,285	1,362	3,833	3,000	1,278	0,103	0,320	0,323	0,011
	3	0,474	0,285	1,660	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,541	0,018
	4	0,557	0,285	1,951	5,500	3,000	1,833	0,272	0,376	0,722	0,024
	5	0,592	0,286	2,075	6,333	3,000	2,111	0,307	0,388	0,791	0,027
II	1	0,381	0,337	1,129	0,375	0,375	1,000	0,044	0,352	0,124	0,010
	2	0,461	0,337	1,366	0,454	0,375	1,210	0,123	0,378	0,326	0,015
	3	0,543	0,337	1,610	0,533	0,375	1,420	0,206	0,406	0,507	0,021
	4	0,621	0,337	1,842	0,611	0,375	1,630	0,284	0,432	0,658	0,026
	5	0,703	0,337	2,085	0,690	0,375	1,840	0,366	0,459	0,797	0,031
IV	1	0,457	0,437	1,045	0,450	0,450	1,000	0,020	0,444	0,044	0,014
	2	0,525	0,437	1,203	0,520	0,450	1,154	0,089	0,466	0,191	0,016
	3	0,599	0,437	1,370	0,589	0,450	1,309	0,162	0,491	0,329	0,020
	4	0,669	0,436	1,533	0,659	0,450	1,463	0,232	0,514	0,453	0,026
	5	0,740	0,436	1,696	0,728	0,450	1,618	0,304	0,538	0,565	0,030
V	1	0,533	0,511	1,044	0,525	0,525	1,000	0,023	0,518	0,044	0,014
	2	0,665	0,511	1,303	0,606	0,525	1,155	0,155	0,562	0,275	0,024
	3	0,799	0,512	1,563	0,688	0,525	1,310	0,288	0,608	0,474	0,029
	4	0,937	0,511	1,832	0,769	0,525	1,464	0,425	0,653	0,652	0,038
	5	1,071	0,511	2,096	0,850	0,525	1,619	0,560	0,698	0,803	0,044



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,313

TP-F6

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,215	1,062	2,250	2,250	1,000	0,013	0,220	0,061	0,002
	2	0,300	0,215	1,395	2,958	2,250	1,315	0,085	0,244	0,349	0,006
	3	0,371	0,215	1,724	3,667	2,250	1,630	0,156	0,267	0,583	0,012
	4	0,445	0,215	2,066	4,375	2,250	1,944	0,229	0,292	0,787	0,014
	5	0,519	0,215	2,411	5,083	2,250	2,259	0,304	0,316	0,960	0,018
II	1	0,304	0,285	1,064	3,000	3,000	1,000	0,018	0,292	0,063	0,007
	2	0,389	0,286	1,361	3,833	3,000	1,278	0,103	0,320	0,322	0,010
	3	0,474	0,286	1,658	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,539	0,014
	4	0,557	0,286	1,948	5,500	3,000	1,833	0,271	0,376	0,720	0,018
	5	0,592	0,286	2,071	6,333	3,000	2,111	0,306	0,388	0,789	0,018
II	1	0,381	0,337	1,129	0,375	0,375	1,000	0,044	0,352	0,124	0,011
	2	0,461	0,337	1,365	0,454	0,375	1,210	0,123	0,378	0,326	0,013
	3	0,542	0,337	1,608	0,533	0,375	1,420	0,205	0,406	0,506	0,014
	4	0,622	0,337	1,844	0,611	0,375	1,630	0,285	0,432	0,659	0,018
	5	0,703	0,337	2,085	0,690	0,375	1,840	0,366	0,459	0,797	0,021
IV	1	0,457	0,436	1,047	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,047	0,010
	2	0,527	0,436	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,466	0,195	0,012
	3	0,598	0,437	1,369	0,589	0,450	1,309	0,161	0,490	0,328	0,015
	4	0,668	0,437	1,530	0,659	0,450	1,463	0,231	0,514	0,451	0,017
	5	0,741	0,436	1,699	0,728	0,450	1,618	0,305	0,538	0,567	0,021
V	1	0,532	0,512	1,038	0,525	0,525	1,000	0,019	0,519	0,037	0,009
	2	0,620	0,511	1,212	0,606	0,525	1,155	0,109	0,547	0,198	0,012
	3	0,700	0,511	1,370	0,688	0,525	1,310	0,189	0,574	0,330	0,015
	4	0,781	0,511	1,527	0,769	0,525	1,464	0,269	0,601	0,448	0,018
	5	0,865	0,510	1,696	0,850	0,525	1,619	0,355	0,629	0,565	0,021

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,317

TP-F7

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,215	1,065	2,250	2,250	1,000	0,014	0,220	0,064	o. A.
	2	0,300	0,215	1,398	2,958	2,250	1,315	0,085	0,243	0,351	0,005
	3	0,371	0,215	1,729	3,667	2,250	1,630	0,157	0,267	0,587	0,008
	4	0,445	0,215	2,071	4,375	2,250	1,944	0,230	0,291	0,789	0,013
	5	0,519	0,215	2,418	5,083	2,250	2,259	0,304	0,316	0,963	0,015
II	1	0,304	0,285	1,064	3,000	3,000	1,000	0,018	0,291	0,063	0,006
	2	0,389	0,285	1,364	3,833	3,000	1,278	0,104	0,320	0,325	0,008
	3	0,473	0,285	1,657	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,539	0,011
	4	0,557	0,286	1,951	5,500	3,000	1,833	0,271	0,376	0,722	0,013
	5	0,592	0,286	2,073	6,333	3,000	2,111	0,307	0,388	0,791	0,016
II	1	0,380	0,337	1,126	0,375	0,375	1,000	0,043	0,351	0,121	0,008
	2	0,461	0,337	1,365	0,454	0,375	1,210	0,123	0,378	0,326	0,012
	3	0,543	0,337	1,610	0,533	0,375	1,420	0,206	0,406	0,507	0,013
	4	0,621	0,337	1,841	0,611	0,375	1,630	0,284	0,432	0,657	0,015
	5	0,705	0,337	2,090	0,690	0,375	1,840	0,368	0,460	0,800	0,020
IV	1	0,456	0,436	1,046	0,450	0,450	1,000	0,020	0,443	0,045	0,008
	2	0,527	0,437	1,207	0,520	0,450	1,154	0,090	0,467	0,193	0,009
	3	0,600	0,437	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,491	0,332	0,013
	4	0,669	0,437	1,531	0,659	0,450	1,463	0,232	0,515	0,451	0,014
	5	0,741	0,437	1,696	0,728	0,450	1,618	0,304	0,539	0,565	0,016
V	1	0,531	0,512	1,038	0,525	0,525	1,000	0,020	0,518	0,038	0,010
	2	0,618	0,512	1,208	0,606	0,525	1,155	0,106	0,547	0,194	0,011
	3	0,699	0,512	1,366	0,688	0,525	1,310	0,187	0,574	0,326	0,014
	4	0,780	0,512	1,525	0,769	0,525	1,464	0,269	0,601	0,447	0,018
	5	0,867	0,512	1,693	0,850	0,525	1,619	0,355	0,630	0,563	0,020

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,325 TP-F8

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,214	1,069	2,250	2,250	1,000	0,015	0,219	0,068	0,004
	2	0,300	0,214	1,404	2,958	2,250	1,315	0,086	0,243	0,356	0,006
	3	0,371	0,214	1,735	3,667	2,250	1,630	0,157	0,266	0,591	0,008
	4	0,445	0,214	2,079	4,375	2,250	1,944	0,231	0,291	0,794	0,011
	5	0,519	0,214	2,427	5,083	2,250	2,259	0,305	0,316	0,967	0,013
		0,000	0,000								
II	1	0,303	0,285	1,064	3,000	3,000	1,000	0,018	0,291	0,063	0,005
	2	0,389	0,285	1,364	3,833	3,000	1,278	0,104	0,320	0,325	0,008
	3	0,474	0,285	1,660	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,541	0,010
	4	0,556	0,285	1,949	5,500	3,000	1,833	0,271	0,376	0,721	0,013
	5	0,593	0,285	2,077	6,333	3,000	2,111	0,307	0,388	0,792	0,013
		0,000	0,000								
II	1	0,381	0,337	1,129	0,375	0,375	1,000	0,043	0,352	0,123	0,007
	2	0,461	0,337	1,369	0,454	0,375	1,210	0,124	0,379	0,328	0,010
	3	0,543	0,337	1,610	0,533	0,375	1,420	0,206	0,406	0,507	0,011
	4	0,622	0,337	1,844	0,611	0,375	1,630	0,285	0,432	0,659	0,015
	5	0,703	0,337	2,085	0,690	0,375	1,840	0,366	0,459	0,797	0,017
		0,000	0,000								
IV	1	0,456	0,436	1,046	0,450	0,450	1,000	0,020	0,443	0,046	0,008
	2	0,527	0,435	1,210	0,520	0,450	1,154	0,092	0,466	0,196	0,007
	3	0,601	0,436	1,378	0,589	0,450	1,309	0,165	0,491	0,336	0,013
	4	0,669	0,438	1,529	0,659	0,450	1,463	0,231	0,515	0,449	0,013
	5	0,741	0,437	1,696	0,728	0,450	1,618	0,304	0,539	0,565	0,016
		0,000	0,000								
V	1	0,532	0,511	1,041	0,525	0,525	1,000	0,021	0,518	0,040	0,008
	2	0,619	0,512	1,209	0,606	0,525	1,155	0,107	0,548	0,195	0,011
	3	0,700	0,512	1,366	0,688	0,525	1,310	0,188	0,575	0,327	0,013
	4	0,781	0,512	1,527	0,769	0,525	1,464	0,270	0,602	0,448	0,015
	5	0,867	0,511	1,695	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,564	0,017

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,329

TP-F9

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,216	1,063	2,250	2,250	1,000	0,014	0,220	0,062	0,003
	2	0,301	0,216	1,395	2,958	2,250	1,315	0,085	0,244	0,349	0,005
	3	0,371	0,215	1,724	3,667	2,250	1,630	0,156	0,267	0,583	0,009
	4	0,443	0,215	2,058	4,375	2,250	1,944	0,228	0,291	0,782	0,012
	5	0,519	0,215	2,412	5,083	2,250	2,259	0,304	0,317	0,960	0,013
II	1	0,303	0,286	1,062	3,000	3,000	1,000	0,018	0,292	0,061	0,007
	2	0,389	0,286	1,363	3,833	3,000	1,278	0,104	0,320	0,324	0,008
	3	0,473	0,286	1,656	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,538	0,011
	4	0,556	0,286	1,948	5,500	3,000	1,833	0,271	0,376	0,720	0,010
	5	0,592	0,286	2,074	6,333	3,000	2,111	0,307	0,388	0,791	0,013
II	1	0,381	0,337	1,128	0,375	0,375	1,000	0,043	0,352	0,123	0,006
	2	0,460	0,337	1,365	0,454	0,375	1,210	0,123	0,378	0,325	0,009
	3	0,542	0,337	1,606	0,533	0,375	1,420	0,204	0,406	0,504	0,013
	4	0,621	0,337	1,839	0,611	0,375	1,630	0,283	0,432	0,655	0,012
	5	0,704	0,337	2,085	0,690	0,375	1,840	0,366	0,460	0,797	0,015
IV	1	0,456	0,436	1,045	0,450	0,450	1,000	0,019	0,443	0,044	0,008
	2	0,528	0,437	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,467	0,195	0,008
	3	0,600	0,437	1,373	0,589	0,450	1,309	0,163	0,491	0,332	0,011
	4	0,670	0,437	1,535	0,659	0,450	1,463	0,233	0,515	0,454	0,013
	5	0,740	0,437	1,695	0,728	0,450	1,618	0,303	0,538	0,564	0,015
V	1	0,532	0,512	1,039	0,525	0,525	1,000	0,020	0,519	0,039	0,008
	2	0,618	0,511	1,210	0,606	0,525	1,155	0,107	0,547	0,196	0,010
	3	0,699	0,511	1,366	0,688	0,525	1,310	0,187	0,574	0,326	0,014
	4	0,781	0,511	1,527	0,769	0,525	1,464	0,270	0,601	0,449	0,014
	5	0,867	0,512	1,695	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,564	0,016

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,511

TP-F10

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,215	1,067	2,250	2,250	1,000	0,014	0,220	0,066	o. A.
	2	0,301	0,215	1,399	2,958	2,250	1,315	0,086	0,243	0,352	0,005
	3	0,371	0,215	1,730	3,667	2,250	1,630	0,157	0,267	0,587	0,008
	4	0,443	0,215	2,063	4,375	2,250	1,944	0,228	0,291	0,785	0,010
	5	0,520	0,215	2,425	5,083	2,250	2,259	0,306	0,316	0,966	0,012
II	1	0,303	0,285	1,063	3,000	3,000	1,000	0,018	0,291	0,062	o. A.
	2	0,389	0,285	1,363	3,833	3,000	1,278	0,104	0,320	0,324	0,007
	3	0,474	0,285	1,660	4,667	3,000	1,556	0,188	0,348	0,541	0,010
	4	0,556	0,285	1,949	5,500	3,000	1,833	0,271	0,376	0,721	0,012
	5	0,592	0,285	2,075	6,333	3,000	2,111	0,307	0,388	0,791	0,013
II	1	0,381	0,337	1,131	0,375	0,375	1,000	0,044	0,352	0,125	0,006
	2	0,461	0,337	1,366	0,454	0,375	1,210	0,123	0,378	0,326	0,008
	3	0,542	0,337	1,606	0,533	0,375	1,420	0,204	0,405	0,504	0,010
	4	0,621	0,337	1,840	0,611	0,375	1,630	0,283	0,432	0,656	0,013
	5	0,704	0,337	2,086	0,690	0,375	1,840	0,366	0,459	0,797	0,014
IV	1	0,456	0,437	1,042	0,450	0,450	1,000	0,018	0,443	0,041	0,006
	2	0,528	0,437	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,467	0,195	0,008
	3	0,601	0,438	1,371	0,589	0,450	1,309	0,163	0,492	0,330	0,010
	4	0,669	0,437	1,531	0,659	0,450	1,463	0,232	0,514	0,451	0,012
	5	0,739	0,436	1,696	0,728	0,450	1,618	0,303	0,537	0,565	0,015
V	1	0,532	0,511	1,042	0,525	0,525	1,000	0,021	0,518	0,041	0,007
	2	0,618	0,512	1,207	0,606	0,525	1,155	0,106	0,547	0,194	0,009
	3	0,700	0,511	1,368	0,688	0,525	1,310	0,188	0,574	0,328	0,013
	4	0,781	0,512	1,526	0,769	0,525	1,464	0,269	0,602	0,447	0,015
	5	0,868	0,511	1,698	0,850	0,525	1,619	0,357	0,630	0,566	0,016

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,59

TP-T1

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,228	0,211	1,079	2,250	2,250	1,000	0,017	0,217	0,077	0,004
	2	2,958	2,250	1,315	2,958	2,250	1,315	0,708	2,486	0,285	0,008
	3	3,667	2,250	1,630	3,667	2,250	1,630	1,417	2,722	0,520	0,023
	4	4,375	2,250	1,944	4,375	2,250	1,944	2,125	2,958	0,718	0,039
	5	5,083	2,250	2,259	5,083	2,250	2,259	2,833	3,194	0,887	0,055
II	1	3,000	3,000	1,000	3,000	3,000	1,000	0,000	3,000	0,000	0,003
	2	3,833	3,000	1,278	3,833	3,000	1,278	0,833	3,278	0,254	0,018
	3	4,667	3,000	1,556	4,667	3,000	1,556	1,667	3,556	0,469	0,036
	4	5,500	3,000	1,833	5,500	3,000	1,833	2,500	3,833	0,652	0,052
	5	6,333	3,000	2,111	6,333	3,000	2,111	3,333	4,111	0,811	0,064
II	1	0,375	0,375	1,000	0,375	0,375	1,000	0,000	0,375	0,000	0,008
	2	0,454	0,375	1,210	0,454	0,375	1,210	0,079	0,401	0,196	0,028
	3	0,533	0,375	1,420	0,533	0,375	1,420	0,158	0,428	0,368	0,046
	4	0,611	0,375	1,630	0,611	0,375	1,630	0,236	0,454	0,521	0,068
	5	0,690	0,375	1,840	0,690	0,375	1,840	0,315	0,480	0,656	0,089
IV	1	0,450	0,450	1,000	0,450	0,450	1,000	0,000	0,450	0,000	0,010
	2	0,520	0,450	1,154	0,520	0,450	1,154	0,070	0,473	0,147	0,027
	3	0,589	0,450	1,309	0,589	0,450	1,309	0,139	0,496	0,280	0,047
	4	0,659	0,450	1,463	0,659	0,450	1,463	0,209	0,520	0,401	0,067
	5	0,728	0,450	1,618	0,728	0,450	1,618	0,278	0,543	0,512	0,088
V	1	0,525	0,525	1,000	0,525	0,525	1,000	0,000	0,525	0,000	0,019
	2	0,606	0,525	1,155	0,606	0,525	1,155	0,081	0,552	0,147	0,043
	3	0,688	0,525	1,310	0,688	0,525	1,310	0,163	0,579	0,281	0,069
	4	0,769	0,525	1,464	0,769	0,525	1,464	0,244	0,606	0,402	0,092
	5	0,850	0,525	1,619	0,850	0,525	1,619	0,325	0,633	0,513	0,118

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-2,04

TP-T2

Wassergehalt: w [M.-%] 4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%] 103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,228	0,211	1,082	2,250	2,250	1,000	0,017	0,216	0,079	0,011
	2	0,300	0,211	1,419	2,958	2,250	1,315	0,088	0,241	0,368	0,041
	3	0,371	0,212	1,755	3,667	2,250	1,630	0,160	0,265	0,603	0,077
	4	0,445	0,212	2,100	4,375	2,250	1,944	0,233	0,290	0,805	0,112
	5	0,520	0,212	2,454	5,083	2,250	2,259	0,308	0,315	0,979	0,148
II	1	0,304	0,284	1,071	3,000	3,000	1,000	0,020	0,291	0,069	0,024
	2	0,389	0,284	1,369	3,833	3,000	1,278	0,105	0,319	0,329	0,064
	3	0,475	0,284	1,671	4,667	3,000	1,556	0,191	0,348	0,549	0,104
	4	0,560	0,284	1,970	5,500	3,000	1,833	0,276	0,376	0,733	0,143
	5	0,591	0,284	2,079	6,333	3,000	2,111	0,307	0,387	0,794	0,162
II	1	0,380	0,336	1,129	0,375	0,375	1,000	0,044	0,351	0,124	0,051
	2	0,462	0,336	1,374	0,454	0,375	1,210	0,126	0,378	0,333	0,090
	3	0,542	0,336	1,610	0,533	0,375	1,420	0,205	0,405	0,507	0,130
	4	0,621	0,336	1,846	0,611	0,375	1,630	0,285	0,431	0,660	0,168
	5	0,701	0,336	2,084	0,690	0,375	1,840	0,365	0,458	0,797	0,208
IV	1	0,458	0,437	1,048	0,450	0,450	1,000	0,021	0,444	0,047	0,064
	2	0,528	0,437	1,209	0,520	0,450	1,154	0,091	0,467	0,195	0,101
	3	0,599	0,437	1,371	0,589	0,450	1,309	0,162	0,491	0,330	0,137
	4	0,671	0,437	1,534	0,659	0,450	1,463	0,234	0,515	0,453	0,170
	5	0,741	0,437	1,696	0,728	0,450	1,618	0,304	0,539	0,565	0,204
V	1	0,535	0,512	1,044	0,525	0,525	1,000	0,022	0,520	0,043	0,089
	2	0,616	0,512	1,202	0,606	0,525	1,155	0,104	0,547	0,189	0,129
	3	0,701	0,512	1,367	0,688	0,525	1,310	0,188	0,575	0,327	0,166
	4	0,783	0,513	1,528	0,769	0,525	1,464	0,271	0,603	0,449	0,206
	5	0,866	0,513	1,690	0,850	0,525	1,619	0,354	0,630	0,561	0,246

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,72

TP-T3

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,228	0,211	1,083	2,250	2,250	1,000	0,017	0,216	0,081	0,061
	2	0,300	0,211	1,421	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,369	0,118
	3	0,372	0,212	1,760	3,667	2,250	1,630	0,161	0,265	0,607	0,172
	4	0,446	0,212	2,106	4,375	2,250	1,944	0,234	0,290	0,808	0,225
	5	0,519	0,212	2,450	5,083	2,250	2,259	0,307	0,314	0,978	0,277
II	1	0,304	0,284	1,072	3,000	3,000	1,000	0,020	0,291	0,070	0,090
	2	0,389	0,284	1,371	3,833	3,000	1,278	0,105	0,319	0,330	0,152
	3	0,475	0,284	1,671	4,667	3,000	1,556	0,191	0,348	0,548	0,214
	4	0,559	0,284	1,968	5,500	3,000	1,833	0,275	0,376	0,732	0,268
	5	0,592	0,284	2,082	6,333	3,000	2,111	0,307	0,387	0,795	0,291
II	1	0,381	0,336	1,134	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,129	0,130
	2	0,462	0,336	1,373	0,454	0,375	1,210	0,125	0,378	0,332	0,187
	3	0,542	0,336	1,611	0,533	0,375	1,420	0,206	0,405	0,508	0,240
	4	0,622	0,336	1,850	0,611	0,375	1,630	0,286	0,432	0,662	0,291
	5	0,703	0,336	2,090	0,690	0,375	1,840	0,367	0,459	0,799	0,345
IV	1	0,458	0,437	1,049	0,450	0,450	1,000	0,021	0,444	0,048	0,143
	2	0,529	0,437	1,210	0,520	0,450	1,154	0,092	0,467	0,196	0,194
	3	0,600	0,437	1,373	0,589	0,450	1,309	0,163	0,491	0,331	0,238
	4	0,671	0,437	1,536	0,659	0,450	1,463	0,234	0,515	0,455	0,282
	5	0,742	0,437	1,698	0,728	0,450	1,618	0,305	0,539	0,566	0,326
V		0,000	0,000								
	1	0,534	0,512	1,043	0,525	0,525	1,000	0,022	0,520	0,042	0,170
	2	0,617	0,512	1,205	0,606	0,525	1,155	0,105	0,547	0,192	0,224
	3	0,701	0,512	1,367	0,688	0,525	1,310	0,188	0,575	0,327	0,276
	4	0,785	0,512	1,532	0,769	0,525	1,464	0,272	0,603	0,452	0,327
	5	0,868	0,512	1,693	0,850	0,525	1,619	0,355	0,631	0,563	0,375



**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,50

TP-T4

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,228	0,211	1,084	2,250	2,250	1,000	0,018	0,216	0,082	0,133
	2	0,300	0,211	1,421	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,369	0,210
	3	0,373	0,211	1,765	3,667	2,250	1,630	0,162	0,265	0,610	0,285
	4	0,446	0,212	2,108	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,809	0,353
	5	0,519	0,212	2,453	5,083	2,250	2,259	0,308	0,314	0,979	0,422
II	1	0,304	0,284	1,071	3,000	3,000	1,000	0,020	0,291	0,070	0,170
	2	0,390	0,284	1,374	3,833	3,000	1,278	0,106	0,320	0,333	0,253
	3	0,475	0,284	1,672	4,667	3,000	1,556	0,191	0,348	0,549	0,329
	4	0,559	0,284	1,969	5,500	3,000	1,833	0,275	0,376	0,732	0,400
	5	0,592	0,284	2,082	6,333	3,000	2,111	0,308	0,387	0,795	0,428
II	1	0,382	0,336	1,135	0,375	0,375	1,000	0,045	0,351	0,129	0,220
	2	0,462	0,336	1,373	0,454	0,375	1,210	0,125	0,378	0,331	0,293
	3	0,542	0,337	1,611	0,533	0,375	1,420	0,206	0,405	0,508	0,359
	4	0,623	0,337	1,850	0,611	0,375	1,630	0,286	0,432	0,662	0,420
	5	0,704	0,337	2,091	0,690	0,375	1,840	0,367	0,459	0,800	0,484
IV	1	0,458	0,437	1,048	0,450	0,450	1,000	0,021	0,444	0,047	0,237
	2	0,529	0,437	1,210	0,520	0,450	1,154	0,092	0,468	0,196	0,296
	3	0,600	0,437	1,374	0,589	0,450	1,309	0,163	0,492	0,332	0,354
	4	0,672	0,437	1,538	0,659	0,450	1,463	0,235	0,515	0,456	0,408
	5	0,743	0,437	1,700	0,728	0,450	1,618	0,306	0,539	0,568	0,461
V	1	0,534	0,512	1,042	0,525	0,525	1,000	0,022	0,520	0,042	0,276
	2	0,618	0,512	1,205	0,606	0,525	1,155	0,105	0,547	0,192	0,339
	3	0,701	0,512	1,368	0,688	0,525	1,310	0,189	0,575	0,328	0,402
	4	0,785	0,512	1,532	0,769	0,525	1,464	0,273	0,603	0,452	0,461
	5	0,868	0,512	1,694	0,850	0,525	1,619	0,355	0,631	0,563	0,521

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,37

TP-T5

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,229	0,211	1,087	2,250	2,250	1,000	0,018	0,217	0,085	0,218
	2	0,300	0,211	1,420	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,368	0,310
	3	0,374	0,211	1,767	3,667	2,250	1,630	0,162	0,266	0,611	0,398
	4	0,446	0,212	2,107	4,375	2,250	1,944	0,234	0,290	0,808	0,480
	5	0,520	0,212	2,456	5,083	2,250	2,259	0,308	0,315	0,980	0,559
II	1	0,305	0,284	1,074	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,072	0,263
	2	0,390	0,284	1,376	3,833	3,000	1,278	0,107	0,319	0,334	0,364
	3	0,475	0,284	1,672	4,667	3,000	1,556	0,191	0,347	0,549	0,449
	4	0,560	0,284	1,972	5,500	3,000	1,833	0,276	0,376	0,734	0,532
	5	0,593	0,284	2,087	6,333	3,000	2,111	0,309	0,387	0,798	0,563
II	1	0,382	0,336	1,137	0,375	0,375	1,000	0,046	0,351	0,131	0,327
	2	0,462	0,336	1,375	0,454	0,375	1,210	0,126	0,378	0,333	0,408
	3	0,543	0,336	1,615	0,533	0,375	1,420	0,207	0,405	0,510	0,484
	4	0,624	0,336	1,856	0,611	0,375	1,630	0,288	0,432	0,666	0,554
	5	0,704	0,336	2,095	0,690	0,375	1,840	0,368	0,459	0,802	0,622
IV	1	0,457	0,436	1,048	0,450	0,450	1,000	0,021	0,443	0,047	0,349
	2	0,529	0,437	1,212	0,520	0,450	1,154	0,093	0,467	0,198	0,412
	3	0,601	0,437	1,376	0,589	0,450	1,309	0,164	0,491	0,334	0,478
	4	0,672	0,437	1,539	0,659	0,450	1,463	0,235	0,515	0,457	0,537
	5	0,743	0,437	1,702	0,728	0,450	1,618	0,307	0,539	0,569	0,594
V	1	0,535	0,512	1,044	0,525	0,525	1,000	0,023	0,520	0,044	0,388
	2	0,618	0,512	1,207	0,606	0,525	1,155	0,106	0,547	0,194	0,457
	3	0,701	0,512	1,369	0,688	0,525	1,310	0,189	0,575	0,329	0,524
	4	0,785	0,512	1,533	0,769	0,525	1,464	0,273	0,603	0,453	0,589
	5	0,868	0,512	1,695	0,850	0,525	1,619	0,356	0,631	0,564	0,649

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,29

TP-T6

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,229	0,211	1,090	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,087	0,299
	2	0,300	0,211	1,422	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,370	0,401
	3	0,374	0,211	1,769	3,667	2,250	1,630	0,162	0,266	0,612	0,495
	4	0,446	0,211	2,109	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,810	0,581
	5	0,520	0,212	2,459	5,083	2,250	2,259	0,309	0,315	0,982	0,666
II	1	0,305	0,284	1,075	3,000	3,000	1,000	0,021	0,291	0,074	0,346
	2	0,391	0,284	1,376	3,833	3,000	1,278	0,107	0,319	0,334	0,453
	3	0,475	0,284	1,674	4,667	3,000	1,556	0,191	0,348	0,551	0,550
	4	0,560	0,284	1,974	5,500	3,000	1,833	0,277	0,376	0,735	0,633
	5	0,593	0,284	2,088	6,333	3,000	2,111	0,309	0,387	0,798	0,668
II	1	0,382	0,336	1,137	0,375	0,375	1,000	0,046	0,351	0,131	0,416
	2	0,462	0,336	1,375	0,454	0,375	1,210	0,126	0,378	0,333	0,497
	3	0,543	0,336	1,616	0,533	0,375	1,420	0,207	0,405	0,511	0,580
	4	0,624	0,336	1,856	0,611	0,375	1,630	0,288	0,432	0,666	0,653
	5	0,705	0,336	2,097	0,690	0,375	1,840	0,369	0,459	0,803	0,724
IV	1	0,458	0,436	1,050	0,450	0,450	1,000	0,022	0,443	0,049	0,437
	2	0,529	0,436	1,213	0,520	0,450	1,154	0,093	0,467	0,199	0,501
	3	0,601	0,436	1,378	0,589	0,450	1,309	0,165	0,491	0,335	0,569
	4	0,672	0,436	1,540	0,659	0,450	1,463	0,236	0,515	0,458	0,630
	5	0,743	0,436	1,703	0,728	0,450	1,618	0,307	0,539	0,570	0,687
V	1	0,535	0,512	1,045	0,525	0,525	1,000	0,023	0,519	0,045	0,476
	2	0,618	0,512	1,208	0,606	0,525	1,155	0,106	0,547	0,194	0,547
	3	0,702	0,512	1,371	0,688	0,525	1,310	0,190	0,575	0,330	0,617
	4	0,785	0,512	1,534	0,769	0,525	1,464	0,273	0,603	0,453	0,678
	5	0,868	0,512	1,696	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,565	0,739

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,23

TP-T7

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,230	0,211	1,090	2,250	2,250	1,000	0,019	0,217	0,087	0,353
	2	0,300	0,211	1,423	2,958	2,250	1,315	0,089	0,241	0,371	0,456
	3	0,374	0,211	1,771	3,667	2,250	1,630	0,163	0,266	0,613	0,552
	4	0,446	0,211	2,111	4,375	2,250	1,944	0,235	0,290	0,811	0,642
	5	0,520	0,212	2,459	5,083	2,250	2,259	0,309	0,314	0,982	0,734
II	1	0,305	0,284	1,076	3,000	3,000	1,000	0,022	0,291	0,074	0,400
	2	0,391	0,284	1,378	3,833	3,000	1,278	0,107	0,319	0,336	0,513
	3	0,475	0,284	1,673	4,667	3,000	1,556	0,191	0,347	0,550	0,606
	4	0,560	0,284	1,975	5,500	3,000	1,833	0,277	0,376	0,736	0,697
	5	0,593	0,284	2,091	6,333	3,000	2,111	0,310	0,387	0,800	0,730
II	1	0,382	0,336	1,138	0,375	0,375	1,000	0,046	0,351	0,132	0,469
	2	0,462	0,336	1,377	0,454	0,375	1,210	0,126	0,378	0,335	0,554
	3	0,543	0,336	1,617	0,533	0,375	1,420	0,207	0,405	0,512	0,637
	4	0,624	0,336	1,857	0,611	0,375	1,630	0,288	0,432	0,667	0,711
	5	0,705	0,336	2,098	0,690	0,375	1,840	0,369	0,459	0,804	0,779
IV	1	0,458	0,436	1,050	0,450	0,450	1,000	0,022	0,443	0,049	0,487
	2	0,530	0,436	1,214	0,520	0,450	1,154	0,093	0,467	0,200	0,553
	3	0,601	0,436	1,378	0,589	0,450	1,309	0,165	0,491	0,336	0,616
	4	0,672	0,436	1,541	0,659	0,450	1,463	0,236	0,515	0,458	0,676
	5	0,743	0,436	1,704	0,728	0,450	1,618	0,307	0,539	0,570	0,730
V	1	0,535	0,511	1,046	0,525	0,525	1,000	0,024	0,519	0,046	0,516
	2	0,618	0,512	1,209	0,606	0,525	1,155	0,107	0,547	0,195	0,586
	3	0,702	0,512	1,371	0,688	0,525	1,310	0,190	0,575	0,330	0,651
	4	0,785	0,512	1,535	0,769	0,525	1,464	0,274	0,603	0,454	0,714
	5	0,868	0,512	1,696	0,850	0,525	1,619	0,356	0,630	0,565	0,775

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,19

TP-T8

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,154	0,139	1,111	2,250	2,250	1,000	0,015	0,144	0,107	0,356
	2	0,213	0,139	1,532	2,958	2,250	1,315	0,074	0,164	0,452	0,427
	3	0,272	0,139	1,951	3,667	2,250	1,630	0,132	0,183	0,722	0,509
	4	0,332	0,139	2,381	4,375	2,250	1,944	0,193	0,204	0,946	0,607
	5	0,375	0,139	2,688	5,083	2,250	2,259	0,235	0,218	1,080	0,682
II	1	0,229	0,211	1,088	3,000	3,000	1,000	0,019	0,217	0,085	0,372
	2	0,301	0,211	1,426	3,833	3,000	1,278	0,090	0,241	0,373	0,482
	3	0,374	0,211	1,770	4,667	3,000	1,556	0,163	0,266	0,613	0,580
	4	0,447	0,211	2,112	5,500	3,000	1,833	0,235	0,290	0,811	0,671
	5	0,520	0,212	2,460	6,333	3,000	2,111	0,309	0,315	0,982	0,757
II	1	0,305	0,283	1,077	0,375	0,375	1,000	0,022	0,291	0,075	0,419
	2	0,391	0,284	1,377	0,454	0,375	1,210	0,107	0,319	0,335	0,529
	3	0,475	0,284	1,675	0,533	0,375	1,420	0,191	0,347	0,551	0,624
	4	0,561	0,284	1,976	0,611	0,375	1,630	0,277	0,376	0,737	0,714
	5	0,593	0,284	2,090	0,690	0,375	1,840	0,309	0,387	0,799	0,744
IV	1	0,382	0,336	1,138	0,450	0,450	1,000	0,046	0,351	0,132	0,481
	2	0,463	0,336	1,377	0,520	0,450	1,154	0,127	0,378	0,335	0,572
	3	0,543	0,336	1,616	0,589	0,450	1,309	0,207	0,405	0,511	0,649
	4	0,624	0,336	1,857	0,659	0,450	1,463	0,288	0,432	0,667	0,722
	5	0,705	0,336	2,097	0,728	0,450	1,618	0,369	0,459	0,803	0,793
V	1	0,458	0,436	1,051	0,525	0,525	1,000	0,022	0,443	0,050	0,496
	2	0,530	0,436	1,214	0,606	0,525	1,155	0,094	0,467	0,200	0,562
	3	0,601	0,436	1,378	0,688	0,525	1,310	0,165	0,491	0,336	0,626
	4	0,672	0,436	1,541	0,769	0,525	1,464	0,236	0,515	0,458	0,687
	5	0,743	0,436	1,704	0,850	0,525	1,619	0,307	0,539	0,570	0,744

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,13

TP-T9

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11_{el}}^m$ [%]
I	1	0,155	0,140	1,107	2,250	2,250	1,000	0,015	0,145	0,103	0,360
	2	0,213	0,140	1,524	2,958	2,250	1,315	0,073	0,164	0,446	0,431
	3	0,272	0,140	1,939	3,667	2,250	1,630	0,132	0,184	0,715	0,509
	4	0,332	0,140	2,365	4,375	2,250	1,944	0,192	0,204	0,938	0,602
	5	0,375	0,140	2,671	5,083	2,250	2,259	0,235	0,219	1,073	0,672
II	1	0,230	0,211	1,089	3,000	3,000	1,000	0,019	0,217	0,086	0,378
	2	0,301	0,211	1,426	3,833	3,000	1,278	0,090	0,241	0,373	0,492
	3	0,374	0,211	1,771	4,667	3,000	1,556	0,163	0,266	0,613	0,587
	4	0,447	0,211	2,114	5,500	3,000	1,833	0,235	0,290	0,812	0,678
	5	0,521	0,211	2,465	6,333	3,000	2,111	0,310	0,315	0,984	0,764
II	1	0,305	0,283	1,078	0,375	0,375	1,000	0,022	0,291	0,076	0,432
	2	0,391	0,284	1,379	0,454	0,375	1,210	0,107	0,319	0,336	0,539
	3	0,476	0,284	1,676	0,533	0,375	1,420	0,192	0,348	0,552	0,629
	4	0,561	0,284	1,976	0,611	0,375	1,630	0,277	0,376	0,736	0,717
	5	0,593	0,284	2,089	0,690	0,375	1,840	0,309	0,387	0,799	0,750
IV	1	0,383	0,336	1,139	0,450	0,450	1,000	0,047	0,351	0,133	0,490
	2	0,462	0,336	1,377	0,520	0,450	1,154	0,127	0,378	0,335	0,575
	3	0,543	0,336	1,616	0,589	0,450	1,309	0,207	0,405	0,511	0,656
	4	0,624	0,336	1,857	0,659	0,450	1,463	0,288	0,432	0,667	0,729
	5	0,705	0,336	2,098	0,728	0,450	1,618	0,369	0,459	0,804	0,803
V	1	0,458	0,436	1,051	0,525	0,525	1,000	0,022	0,443	0,051	0,510
	2	0,530	0,436	1,215	0,606	0,525	1,155	0,094	0,467	0,201	0,574
	3	0,601	0,436	1,378	0,688	0,525	1,310	0,165	0,491	0,336	0,635
	4	0,672	0,436	1,541	0,769	0,525	1,464	0,236	0,515	0,459	0,698
	5	0,743	0,436	1,704	0,850	0,525	1,619	0,307	0,539	0,570	0,755

**Übersicht Versuchsdaten**

Versuchsreihe: KTS

PK-Kerntemperatur: [°C]

-1,06

TP-T10

Wassergehalt: w [M.-%]

4

Vorbelastung: [-]

$\sigma_1/\sigma_{22/33} = 2$

Verdichtungsgrad:  $D_{Pr}$  [%]

103

( $\sigma_{22/33} = 150$  kPa)

Nr. Lastzyklus	Nr. Spannungspfad	$\sigma_{11}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(ist)}$ [-]	$\sigma_{11}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{11}/\sigma_{22/33}^{(soll)}$ [-]	q <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	p <sup>(ist)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	q <sup>(ist)</sup> /p <sup>(ist)</sup> [-]	$\epsilon_{11\_el}^m$ [%]
I	1	0,155	0,142	1,088	2,250	2,250	1,000	0,013	0,147	0,085	0,362
	2	0,214	0,143	1,497	2,958	2,250	1,315	0,071	0,166	0,426	0,434
	3	0,272	0,143	1,907	3,667	2,250	1,630	0,129	0,186	0,696	0,507
	4	0,332	0,143	2,324	4,375	2,250	1,944	0,189	0,206	0,918	0,593
	5	0,375	0,143	2,626	5,083	2,250	2,259	0,232	0,220	1,054	0,669
II	1	0,230	0,212	1,084	3,000	3,000	1,000	0,018	0,218	0,082	0,383
	2	0,301	0,212	1,419	3,833	3,000	1,278	0,089	0,242	0,368	0,494
	3	0,374	0,212	1,763	4,667	3,000	1,556	0,162	0,266	0,609	0,588
	4	0,446	0,212	2,102	5,500	3,000	1,833	0,234	0,290	0,806	0,682
	5	0,521	0,212	2,451	6,333	3,000	2,111	0,308	0,315	0,978	0,772
II	1	0,306	0,284	1,076	0,375	0,375	1,000	0,022	0,291	0,075	0,443
	2	0,391	0,284	1,377	0,454	0,375	1,210	0,107	0,320	0,335	0,546
	3	0,476	0,284	1,674	0,533	0,375	1,420	0,191	0,348	0,550	0,639
	4	0,561	0,284	1,972	0,611	0,375	1,630	0,276	0,376	0,734	0,733
	5	0,593	0,284	2,086	0,690	0,375	1,840	0,309	0,387	0,798	0,766
IV	1	0,383	0,336	1,139	0,450	0,450	1,000	0,047	0,352	0,133	0,503
	2	0,463	0,336	1,376	0,520	0,450	1,154	0,126	0,378	0,334	0,583
	3	0,543	0,337	1,615	0,589	0,450	1,309	0,207	0,405	0,510	0,664
	4	0,624	0,337	1,853	0,659	0,450	1,463	0,287	0,432	0,664	0,740
	5	0,705	0,337	2,094	0,728	0,450	1,618	0,368	0,459	0,802	0,811
V	1	0,459	0,436	1,052	0,525	0,525	1,000	0,023	0,444	0,051	0,518
	2	0,529	0,436	1,213	0,606	0,525	1,155	0,093	0,467	0,199	0,580
	3	0,601	0,436	1,377	0,688	0,525	1,310	0,165	0,491	0,335	0,643
	4	0,673	0,437	1,541	0,769	0,525	1,464	0,236	0,515	0,458	0,703
	5	0,744	0,437	1,703	0,850	0,525	1,619	0,307	0,539	0,570	0,766