Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

D I P L O M A R B E I T

Master's Thesis

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES VISKOELASTISCHEN VERHALTENS VON EIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE VISCOELASTIC BEHAVIOUR OF ICE

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grads eines Diplom-Ingenieurs am

Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen

der

Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.tech. Roman Lackner

durch

Florian SCHREMS

E610 / 0025110

Praterstraße 9/13
A-1020 Wien

Wien, im April 2010

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Danksagung 3
Zusammenfassung 4
Summary 4
Herstellung von Prüfkörpern aus Eis 7
Versuche und Diskussion der Ergebnisse 10
- Prüfeinrichtung 10
- Probekörpervorbereitung 11
- Versuchsdurchführung 12
- Auswertung der Versuche 13
- Einaxiale Druckfestigkeit 14
- Elastizitätsmodul 15
- Ermittlung des Elastizitätsmoduls mittels Ultraschallmessung 17
- Kriechparameter und Aktivierungsenergie 18

Schlussfolgerungen 22
Abbildungsverzeichnis 23
Tabellenverzeichnis 23
Literatur 23
Anhang A: Datenblätter der Kriechversuche 24
Anhang B: Ermittlung der Nachgiebigkeitsraten 40
Anhang C: Analytische Lösung für die Kriechkurve 56

Danksagung

Im Zeitraum der Erstellung der gegenständlichen Arbeit haben mich mehrere Menschen mit ihrem Wissen und ihrem Können unterstützt:

Als erstes möchte ich Christoph Etzenberger danken. Seine Kenntnisse im Bereich der Elektrotechnik haben es ermöglicht, eine präzise Steuerung für die Herstellung von Probekörpern aus Eis zusammenzustellen. Lisa Aigner hat mich am Ende der Arbeit bei der Auswertung der Versuchsergebnisse unterstützt. Olaf Lahayne unterstützte mich bei der Durchführung der Ultraschallversuche. Roman Lackner (Betreuer meiner Diplomarbeit) möchte ich für zahlreiche Hinweise und Ratschläge danken, die er mir im Laufe unserer Zusammenarbeit gegeben hat. Allen weiteren, hier nicht namentlich erwähnten Personen, möchte ich dennoch Danken und hoffe mich bei Zeiten bei ihnen erkenntlich zu zeigen.

Zusammenfassung

Das viskoelastische Materialverhalten von Eis spiegelt sich in den verschiedensten Bereichen des Lebens, wie z.B. dem Kriechen von Gletschern, Setzungsverhalten in Permafrostböden und zeitabhängige Deformationen im Grundbau im Fall künstlicher Bodenvereisung, wieder.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das viskoelastische Verhalten von Eis experimentell untersucht. Hierbei wurden zylindrische Eiskörper mit einem Durchmesser von 100 mm erzeugt, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Homogenität des erzeugten Eisprobekörpers gelegt wurde. Das in dieser Arbeit entwickelte Herstellungsverfahren lieferte sehr gute Ergebnisse. Die Eiskörper wurden einem Kriechversuch mit einaxialem Spannungszustand unterzogen. Einer Belastungsphase von 24 Stunden folgte eine zwölfstündige Entlastungsphase. Zum Abschuss jedes Versuchs wurde die Belastung bis zum Versagen der Eisprobe erhöht.

Die Auswertung der aufgezeichneten Kriechkurven ergab einen linearen Abfall der Kriechnachgiebigkeitsrate in einer doppellogarithmischen Darstellung. Die Neigung des linearen Abfalls von -1 führte im Zuge der Modellbildung zur Annahme eines logarithmischen Kriechverhaltens. Da die Kriechversuche bei zwei verschiedenen Temperaturniveaus (-5 und -10°C) durchgeführt wurden, konnte die dem Kriechprozess zu Grunde liegende Aktivierungsenergie ermittelt werden. Das elastische Materialverhalten des Eises wurde in der Belastungsphase, der Entlastungsphase und der finalen Belastungsphase ermittelt. Hierbei zeigte der in der ersten Belastungsphase ermittelte Elastizitätsmodul weitaus zu geringe Werte, was auf etwaigen Schlupf im Zuge des Probeneinbaus zurückzuführen ist. Einen weiteren Anhaltswert für die elastischen Eigenschaften lieferte der dynamische Elastizitätsmodul, der aus Ultraschallversuchen gewonnen wurde.

Summary

Viscoelastic material behaviour of ice is present in many areas in daily life, like e.g. the flow of glaciers, the behaviour of permafrost soil, and the deformation in the course of artificial ground freezing.

In this work, the viscoeleastic properties of ice are investigeted. For this purpose, cylindrical ice samples with a diameter of 100 mm were produced. Hereby, a special production procedure was developed aiming at good homogeneity of the ice. The ice samples were subjected to a one-dimensional loading situation in order to investigate the creep behaviour. The stress was applied for 24 hours followed by a phase of 12 hours with decreased load level. Subsequently, the stress was increased until failure of the ice sample.

The experiment showed a linear decrease of the creep-compliance rate using a logarithmic scale on both axis. The shape of this linear decrease of -1 indeceted a logarithmic creep behaviour of ice. The experiments were performed at two different temperature levels of -5°C and -10°C, which allowed the determination of the activation energy of the underlying creep process. The elastic properties of ice were determined in three phases of the experiment,

during (i) loading, (ii) unloading, and (iii) reloading in the course of the compression test. The significantly lower values for Young's moduli obtained from the first loading phase were explained by slip within the test setup. Finally, ultra-sonic experiments provided more insight into the elastic properties of ice.

Motivation und Vorwissen

Bei gefrorenem Boden und künstlicher Bodenvereisung, wie sie zum Beispiel im Tunnelbau verwendet wird, spielen die verbesserten mechanischen Eigenschaften des Bodens eine entscheidende Rolle. So sollen aufgrund der erhöhten Belastbarkeit des Bodens durch das gefrorene Bodenwasser Setzungen von bestehenden Bauwerken während der Bauphase reduziert werden.

Boden bei Temperaturen unter 0 °C besteht aus Bodenkörnern, Eis, evt. Wasser und Luft. Das Zusammenwirken aller Bestandteile führt zu einem komplexen Materialverhalten. Hierbei wird das viskoelastische Materialverhalten hauptsächlich vom Kriechverhalten des Eises bestimmt. Die anderen Bestandteile hingegen zeigen kaum bis kein viskoses Verhalten. Der Einfluss der Temperatur auf das viskoelastische Verhalten ist zweifach: Erstens verändert sich durch die Temperatur der Anteil an Eis im gefrorenen Boden und somit die Materialzusammensetzung und zweitens ist das Eis selbst durch ein thermorheologisches Verhalten gekennzeichnet. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wurde dieses thermorheologische Verhalten von Eis experimentell untersucht und einfache Modelle für die Beschreibung des Kriech- und Relaxationsverhalten von Eis entwickelt.

Hierbei sollte das Kriechverhalten an ungestörten Eisproben untersucht werden.

Herstellung von Prüfkörpern aus Eis

Die entwickelte Apparatur für die Herstellung zylinderförmiger Proben aus Eis (Durchmesser 100 mm, Höhe bis zu 250 mm) besteht aus vier Teilkomponenten: (i) eine Kühleinrichtung, (ii) einen Drehtisch, auf dem die Probe während der Herstellung positioniert wurde und der kontinuierlich bewegte Wasserspiegel ein Gefrieren der Wasseroberfläche verhinderte (die Probe gefror von unten), (iii) eine Pumpe mit Wasserstandsmessung und (iv) eine Steuereinheit, mit der die Wasserzufuhr in den Zylinder geregelt wurde (siehe Abbildung 1).

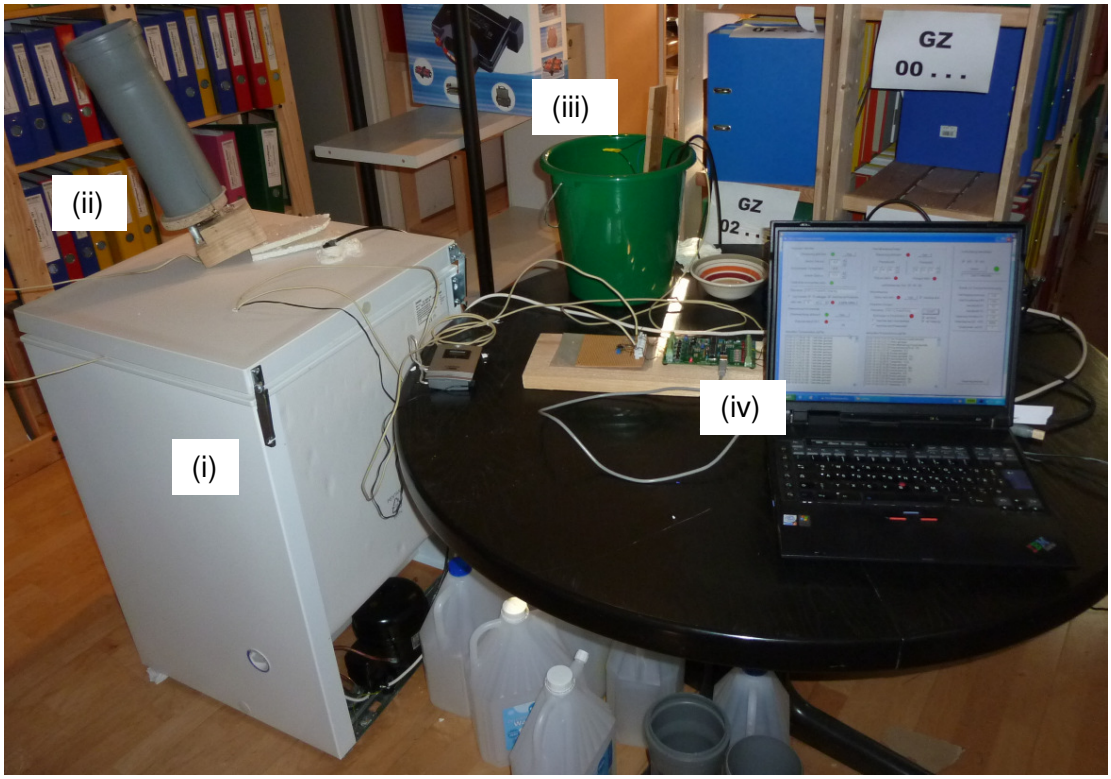


Abbildung 1:Entwickelte Apparatur zur Herstellung von Eisproben

Die erwähnten Bestandteile der Apparatur wurden durch die in Abbildung 2 dargestellte Programmoberfläche gesteuert. Diese gliedert sich in fünf Bereiche:

1. Steuerung der Temperatur (links oben): Die Felder dienen zur Eingabe der Grenztemperaturen und der Anzeige der momentanen Temperatur im Tiefkühler.
2. Überwachung des Wasserstandes im Vorratsbehälter (links Mitte): Anzeige der aktuellen Wassermenge.
3. Zeitsteuerung der Pumpe (rechts oben): Hier können die Pausen zwischen den einzelnen Pumpvorgängen und die Dauer jedes Pumpeneinsatzes eingestellt werden.
4. Steuerung des Motors (rechts Mitte): Start/Stopp-Taste.
5. Protokollfenster: die verschiedenen Protokolle werden sowohl am Bildschirm angezeigt als auch in einer Textdatei gespeichert.

Mit der in Abbildung 2 dargestellten Oberfläche werden über eine Platine (siehe Abbildung 3) drei Relais mit unterschiedlichen Spannungen angesprochen: Ein Relais ist für den Motor des Drehtisches vorgesehen während die beiden anderen Relais die Pumpe und den Tiefkühler steuern.

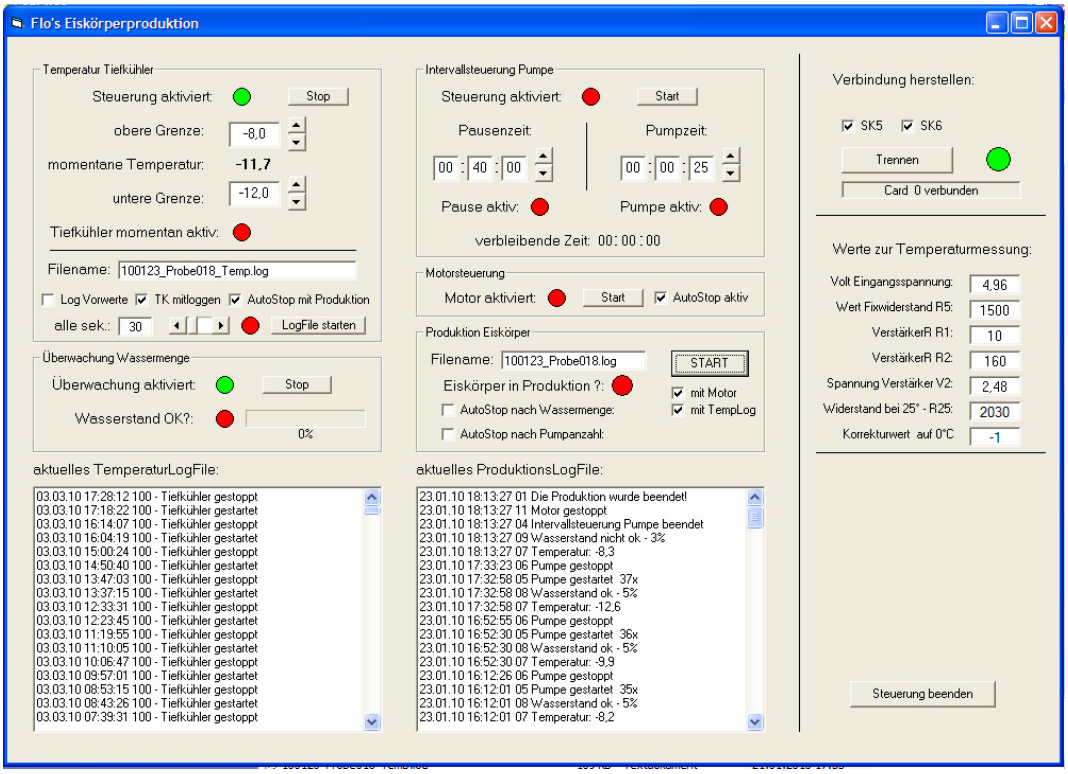


Abbildung 2: Steuerung

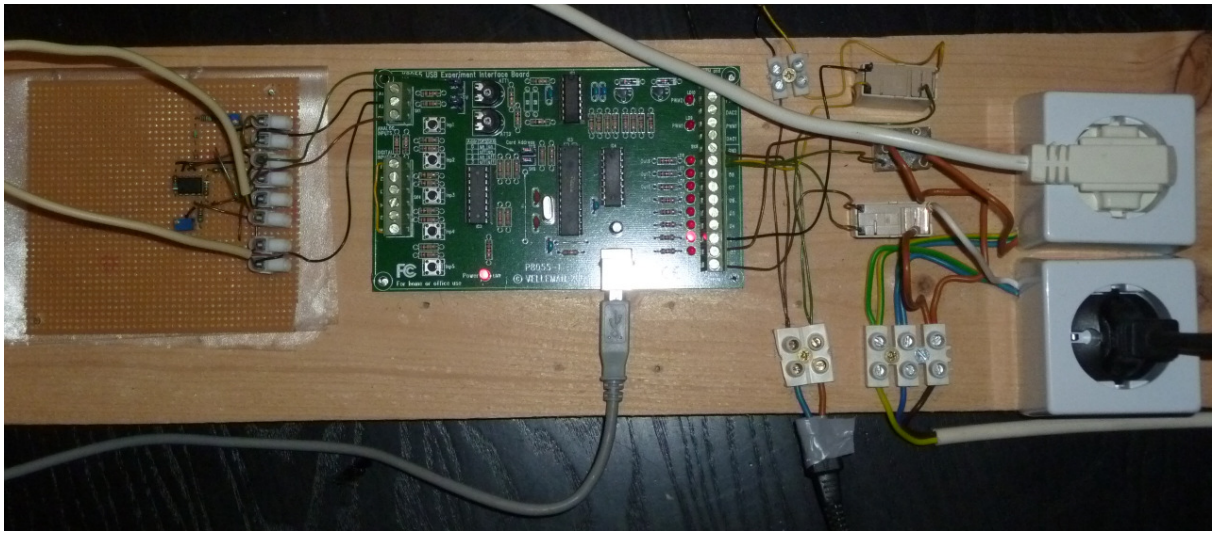


Abbildung 3: Schalteinheit / Interface

Durch die Verwendung eines Drehtisches, der durch eine schräge Aufstandsfläche für die zylindrische Probe gekennzeichnet war, war immer ein Teil des Eises außerhalb des Wassers und der neu gebildete Wasserfilm konnte langsam an das bereits gebildete Eis anfrieren. Abbildung 4 zeigt exemplarisch zwei Probekörper aus Eis.

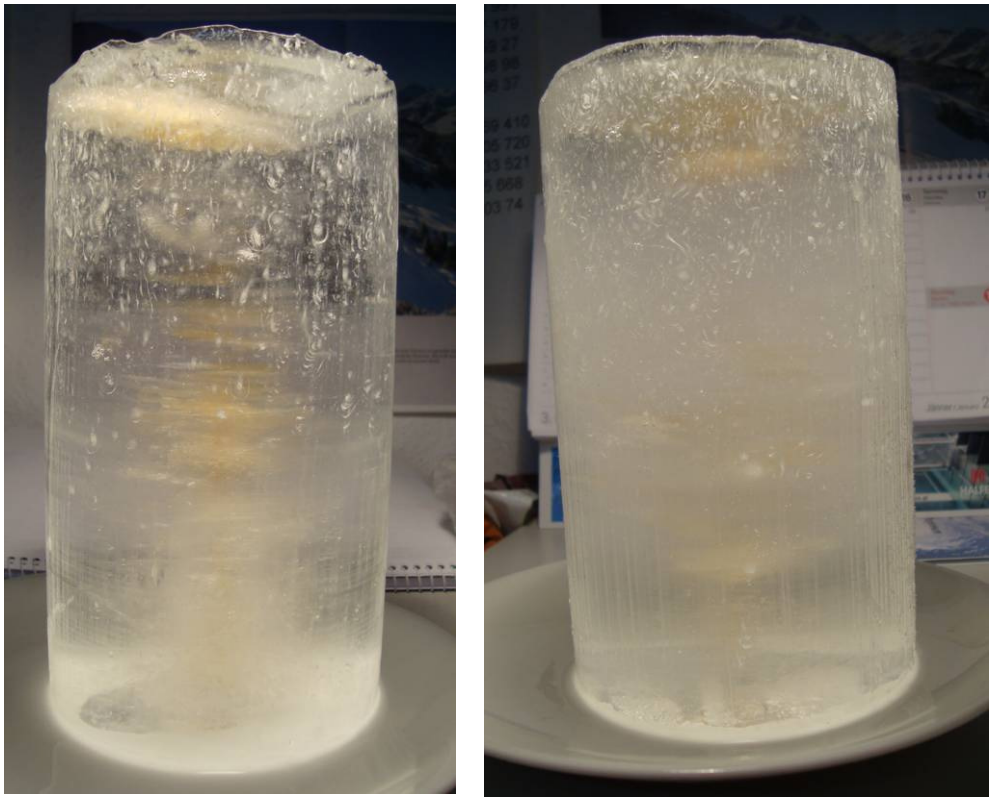


Abbildung 4: Zwei Probekörper aus Eis

Versuche und Diskussion der Ergebnisse

Prüfeinrichtung

Die verwendete Prüfeinrichtung des Instituts für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der TU Wien ist in Abbildung 5 dargestellt.

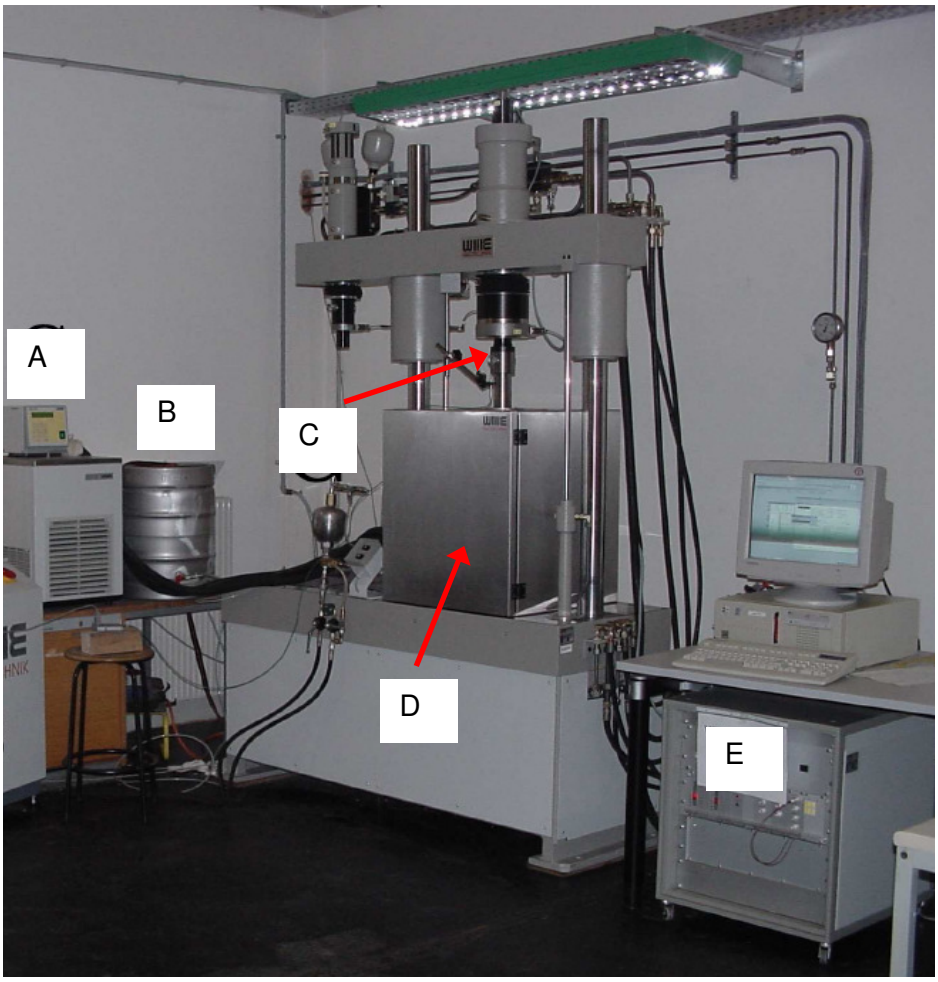


Abbildung 5: Verwendete Prüfeinrichtung

Folgende Komponenten wurde verwendet: (A) Kühlgerät, (B) Kühlflüssigkeit, (C) Druckstempel, (D) Klimaschrank, (E) elektronische Steuerung.
Hierbei werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm eingebaut. Die, den Probekörper umschließende Zelle besteht aus einem doppelmanteligen Stahlzylinder mit zwei Anschlüssen, über die die Kühlflüssigkeit aus dem Kühlgerät durch den Mantel gepumpt wird. Der verbleibende Hohlraum zwischen Eisprobe und Zellenmantel wurde mit einer Kühlflüssigkeit gefüllt, wobei die Eisprobe mit einer 0,7 mm starken Latexhülle überzogen wurde. Die Prüfmaschine wird hydraulisch betrieben und kann eine maximale Axialdruckkraft von 250 kN erzeugen.

Probekörpervorbereitung

Die Eiszylinder haben nach ihrer Herstellung auf der Unterseite eine fast plane Oberfläche, die nur geglättet wurde. Die Oberseite hingegen hatte herstellungsbedingt die Form eines Trichters, der vor dem Einbau abgeschmolzen wurde. Auf der Kopfseite und an der Fußseite wurden 15 mm starke Scheiben, die eine seitlich gefräste Nut aufwiesen, angebracht. Die zuvor erwähnte Latexhülle wurde mit zwei O-Ringen an diesen Scheiben befestigt, wodurch ein Eindringen der Kühlflüssigkeit und somit eine Beeinflussung des Eiskörpers verhindert wurde.

Versuchsdurchführung

Bei allen Versuchen wurde dieselbe Belastungsgeschichte zu Grunde gelegt (siehe Abbildung 6). Es wurden jedoch zwei verschiedene Versuchstemperaturen (-5 und -10 °C) berücksichtigt. Am Ende jedes Versuchs wurde die einaxiale Druckfestigkeit durch kontinuierliche Steigerung der Belastung bestimmt. Jegliche Veränderung der Belastung wurde mit einer Be-/Entlastungsgeschwindigkeit von 200 N/s durchgeführt. Für die Bestimmung des Kriechens von Eis wurde eine Belastung von 4 kN aufgebracht. Für die Untersuchung des Rückkriechens wurde die Belastung von 4 kN auf 1,2 kN reduziert.

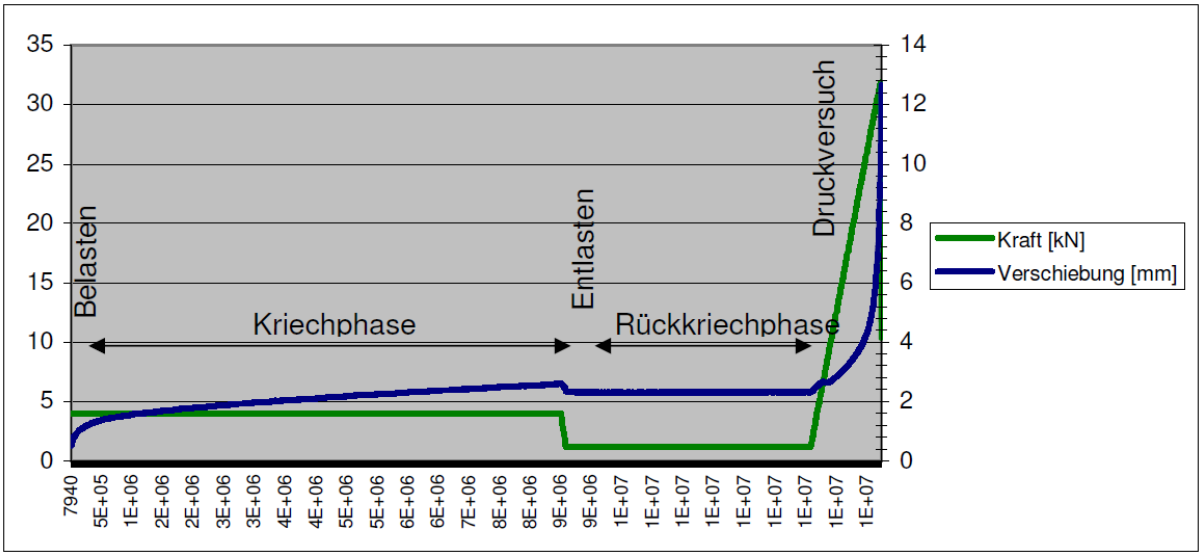


Abbildung 6: Belastungsgeschichte

Tabelle 1 beinhaltet Versuchsbedingungen und Probekörperabmessungen der durchgeführten Versuche.

Versuch	Temperatur [ºC]	Probenhöhe [mm]		Versuch	Temperatur [ºC]	Probenhöhe [mm]
01	-10	146		09	-5	164
02	-10	158		10	-5	165
03	-10	164		11	-5	148
04	-10	162		12	Versuch abgebrochen	
05	-10	158		13	-5	135
06	-10	156		14	-5	179
07	-5	148		15	-5	194
08	-5	164				

Tabelle 1: Daten der durchgeführten Versuche

Auswertung der Versuche

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurden die elastischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul), Kriecheigenschaften (primäres Kriechen, siehe Abbildung 7) und die Festigkeit untersucht. Zusätzlich zu dem aus den Versuchskurven errechneten (statischen) Elastizitsmodul wurde der zughörige dynamische Elastizitätsmodul mittels Ultraschallmessung bestimmt.

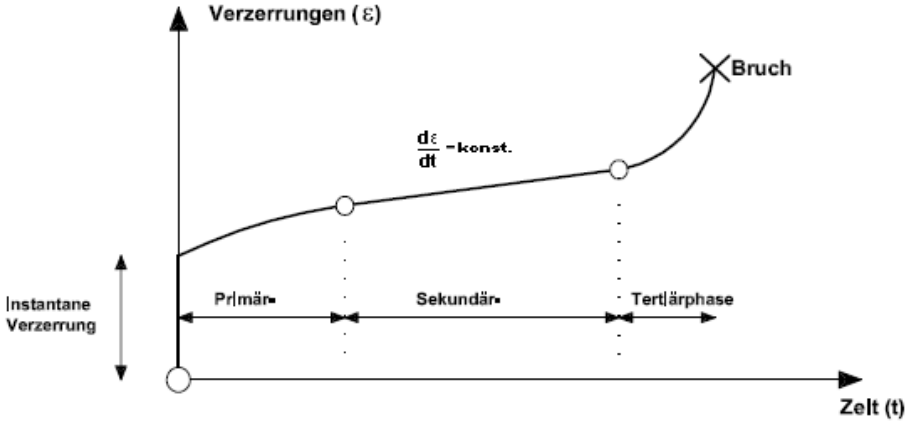


Abbildung 7: Typischer Kriechverlauf

Die erhaltenen Versuchsergebnisse sind im Anhang A dargestellt, wobei die hierfür verwendeten Datenblätter die wichtigsten Versuchs- und Probenparametern sowie den Verlauf und ausgewählte Ergebnisse beinhalten.

Einaxiale Druckfestigkeit

Tabelle 2 zeigt die erhaltenen Bruchlasten und die daraus resultierende Druckfestigkeit der Eisproben.

Versuch	Temperatur [ºC]	Bruchlast [kN]	Verschiebung [mm]	Druckfestigkeit [N/mm²]	Bemerkung
01	-10	35,44	11,93	4,51	
02	-10	31,85	10,41	4,06	
03	-10	35,22	12,52	4,48	
04	-10	40,55	12,54	5,16	
05	-10	36,02	12,31	4,59	
06	-10	35,71	12,83	4,55	
07	-5	36,72	12,70	4,67	
08	-5	0,00	0,00	0,00	Versuch abgebrochen
09	-5	36,42	12,47	4,64	
10	-5	34,59	11,31	4,40	
11	-5	30,58	12,51	3,89	
12					Versuch abgebrochen
13	-5	27,52	10,99	3,50	
14	-5	35,55	12,48	4,53	
15	-5	34,83	12,44	4,44	

Tabelle 2: Druckfestigkeit

Abbildung 8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der erhaltenen Druckfestigkeiten für die beiden untersuchten Versuchstemperaturen.

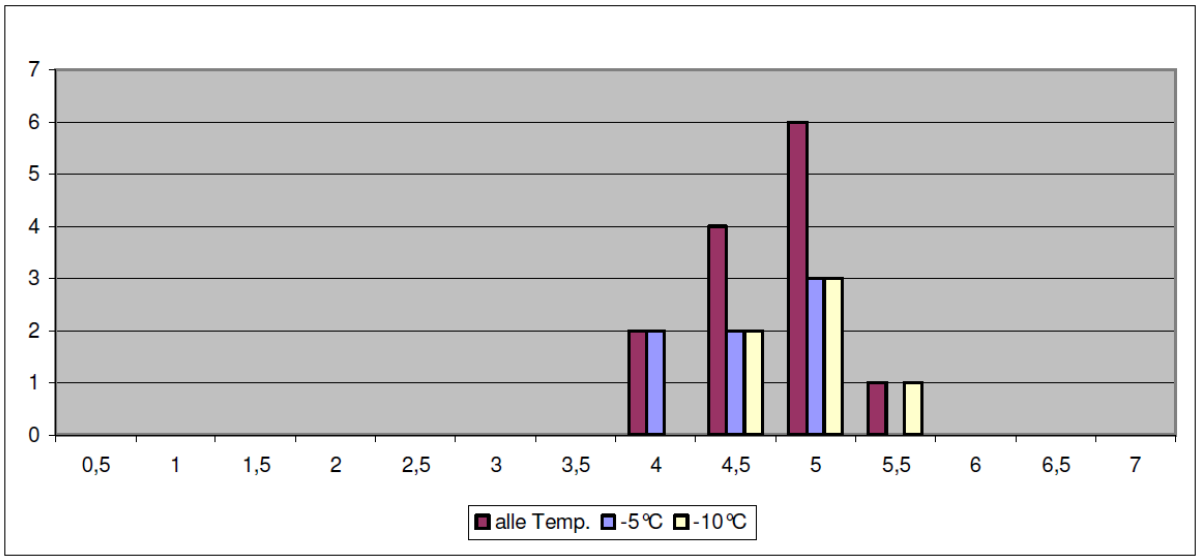


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der experimentell erhaltenen Druckfestigkeit [N/mm²]

Hierbei ist ein Einfluss der Versuchstemperatur auf die erhaltene Druckfestigkeit erkennbar, wobei bei niedrigeren Temperaturen eine höhere Druckfestigkeit erreicht wurde. Auffällig ist die geringe Streuung der Ergebnisse. Die erhaltenen Werte liegen in einem Bereich von 1,5 N/mm².

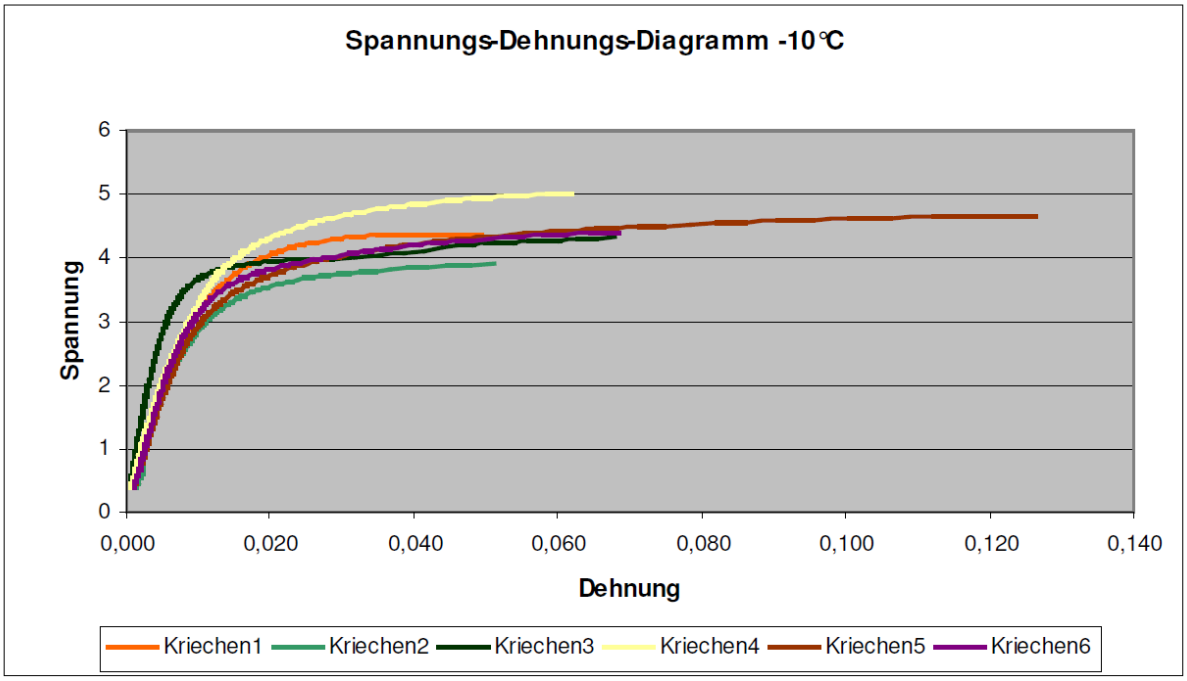
Elastizitätsmodul

Der (statische) Elastizitätsmodul wurde auf Basis der zu Grunde gelegten Belastungsgeschichte in Summe dreimal je Versuch ermittelt: (i) im Zuge der Belastungphase als Sekantenmodul (Belastungsbeginn bis Belastungsende), (ii) im Zuge der Entlastungsphase als Sekantenmodul (Entlastungsbeginn bis Entlastungsende) und (iii) im Zuge des Druckversuchs als Sekantenmodul (Belastungsbeginn bis 40% der erreichten Bruchlast, siehe Abbildung 9). Die so erhalten Werte für den Elastizitätsmodul sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Versuch	Temperatur [°C]	Belastungs-phase	Entlastungs-phase	Druck-versuch
01	-10	161,2	504,3	378,5
02	-10	167,6	280,3	406,4
03	-10	114,7	970,6	670,4
04	-10	88,5	664,5	414,6
05	-10	11,3	384,6	398,6
06	-10	63,0	403,3	392,9
07	-5	368,8	383,1	253,6
08	-5	79,4	658,9	-
09	-5	61,7	1465,1	452,2
10	-5	51,4	501,3	477,6
11	-5	781,3	195,6	210,2
13	-5	33,5	200,1	200,7
14	-5	135,0	415,6	449,6
15	-5	107,8	290,7	324,3

Tabelle 3: Elastizitätsmodul [N/mm²]

Die aus der Belastungsphase erhaltenen Elastizitätsmoduli liegen hierbei deutlich unter den bislang bekannten Werten. Eine Ursache hierfür könnte im Schlupf liegen, der durch den Einbau des Probekörpers verursacht wird und im Zuge der Belastungsphase zum Tragen kommt. Der aus der Entlastungsphase ermittelte Elastizitätsmodul hingegen liefert eine gute Übereinstimmung mit dem aus dem Druckvesuch erhaltenen Elastizitätsmodul. Bei diesen beiden Lastwechseln dürfte der zu Beginn bemerkte Schlupf keine Auswirkung mehr haben.
Bei den Versuchen bei einer Temperatur von -10 °C ist die Übereinstimmung nicht mehr so gut. Hier liegen die ermittelten Werte aus der Entlastungsphase deutlich (50 %) über denen der Druckversuche.



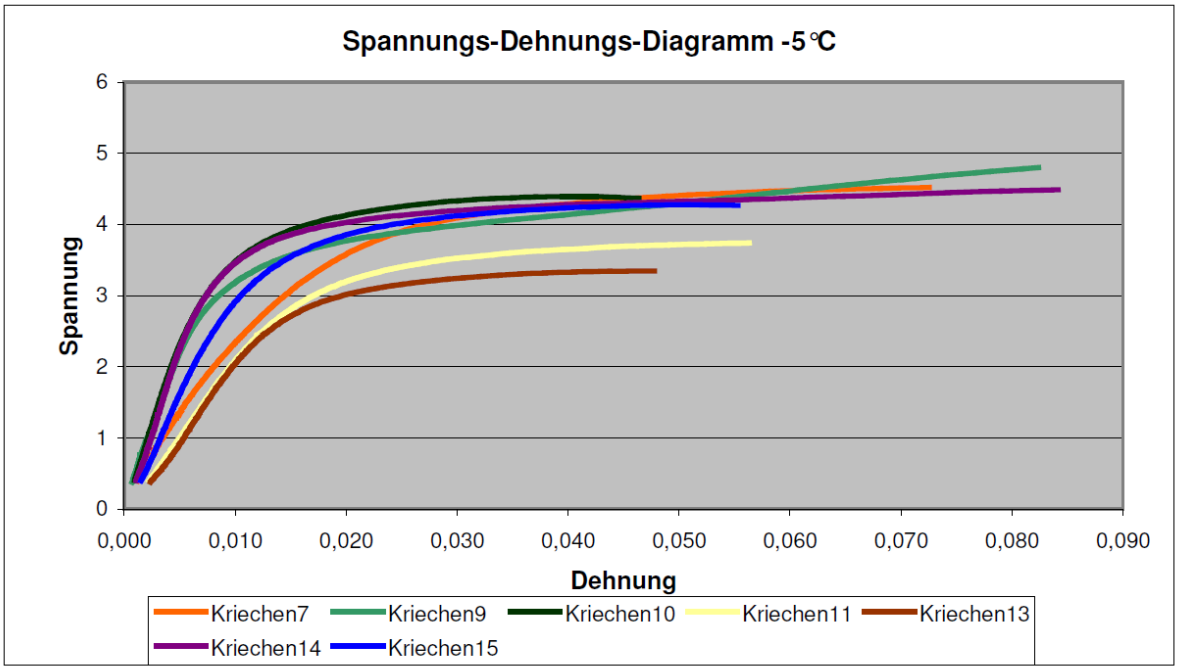


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramme für die am Ende jeder Versuchs durcgeführte Druckversuche für T = -10 und -5 ºC

Ermittlung des Elastizitätsmoduls mittels Ultraschallmessung

Bei den Ultraschallversuchen wurden drei Zylinder mit einer Höhe von ungefähr 70 mm und einem Durchmesser von 100 mm geprüft (siehe Tabelle 4).

Versuch	Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Volumen [cm³]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
1	100	77	604,76	558,4	0,923
2	100	66	518,36	486,2	0,938
3	100	73	573,34	549,7	0,959
				Mittelwert:	0,940

Tabelle 4: Übersicht über die Proben für die Ultraschallmessung

Bei jedem Eiszylinder wurden drei Einzelmessungen an verschiedenen Stellen durchgeführt und ein Mittelwert pro Probe ermittelt. Es wurden Longitudinalwellen mit einer Frequenz von 100 kHz durch die Probe geschickt und deren Laufzeit durch den Probekörper gemessen. Hierzu wurde zuerst die Leersignallaufzeit mit 0,73 µs ermittelt und von der Laufzeit durch den Probekörper abgezogen. Letztere lagen zwischen 18 µs bis 20,7 µs. Zur Ermittlung der Geschwindigkeit v [km/s] wurde die Probenhöhe [mm] durch die gemessene Laufzeit der Welle [µs] dividiert. Der Elastizitätsmodul wurde aus Dichte [g/cm³] multipliziert mit dem Quadrat der Geschwindigkeit errechnet. Die erhaltenen Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen, die Dichte sowie die ermittelten Elastizitätsmoduli sind in Tabelle 5 aufgelistet.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3
Messung 1 [km/s]	3,88	3,81	3,79
Messung 2 [km/s]	3,87	3,79	3,74
Messung 3 [km/s]	3,86	3,80	3,78
Mittelwert [km/s]	3,87	3,80	3,77
Dichte [g/cm³]	0,923	0,938	0,959
E-Modul E [N/mm²]	13830	13530	13630

Tabelle 5: Ergebnisse der Ultraschallmessung (mit E = 13830 N/mm²)

Kriechparameter und Aktivierungsenergie

Für die Auswertung der Kriechversuche wurde der zeitliche Verlauf der Nachgiebigkeitsrate (Anhang B) mit der Funktion *H/t* approximiert. Dabei entspricht *H* [$MPa^{-1}s$] der Nachgiebigkeitsrate, die durch die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen der, aus den gemessenen Verschiebungen berechneten Nachgiebigkeitsrate und *H/t* bestimmt wurde. Hierbei wurden mit dem Fokus auf das Primärkriechen jedoch nur die ersten 90 Minuten berücksichtigt (siehe Abbildung 10). Die Darstellung aller Versuche ist im Anhang B zusammengestellt. Die erhaltenen Werte für den Parameter *H* sind in Tabelle 6 enthalten.

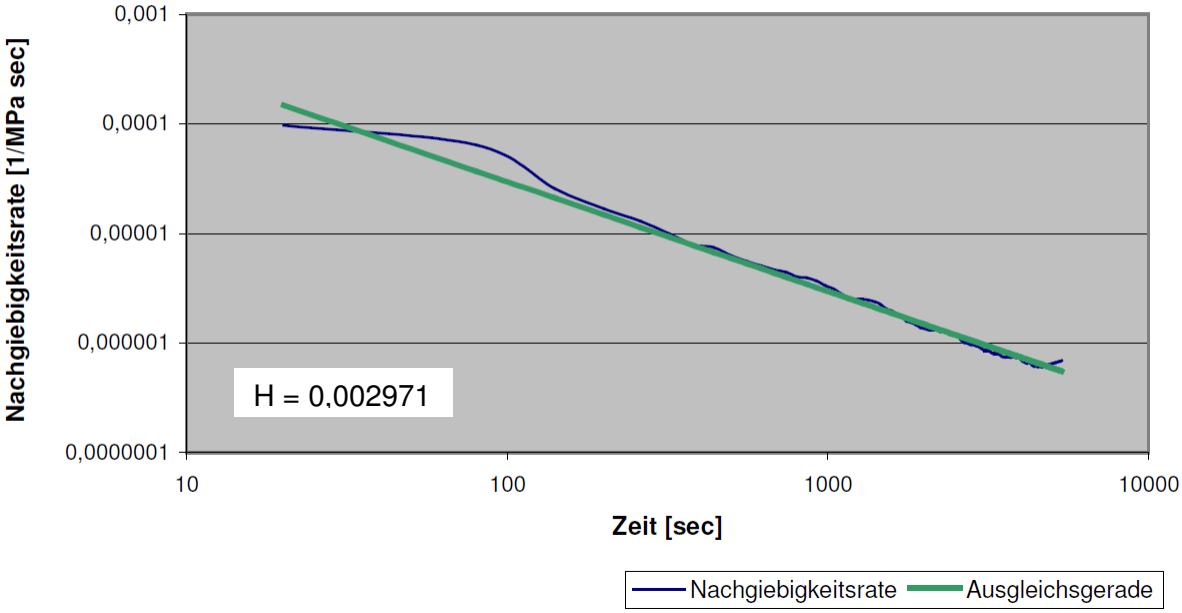


Abbildung 10: Lineare Approximation der Kriechnachgiebigkeitsrate im doppeltlogarithmischen Maßstab (Versuch 13)

Versuch	Temperatur [ºC]	*H* [$MPa^{-1}s$]	Anmerkung
01	-10	0,00896	
02	-10	0,00312	
03	-10	0,00097	
04	-10	0,00186	
05	-10	0,00196	
06	-10	0,00118	
07	-5	0,00108	
08	-5	0,00084	
09	-5	0,00098	
10	-5	0,00097	
11	-5	0,00226	
13	-5	0,00297	
14	-5	0,00076	
15	-5	0,00126	

Tabelle 6: Werte für den Parameter *H* [$MPa^{-1}s$]

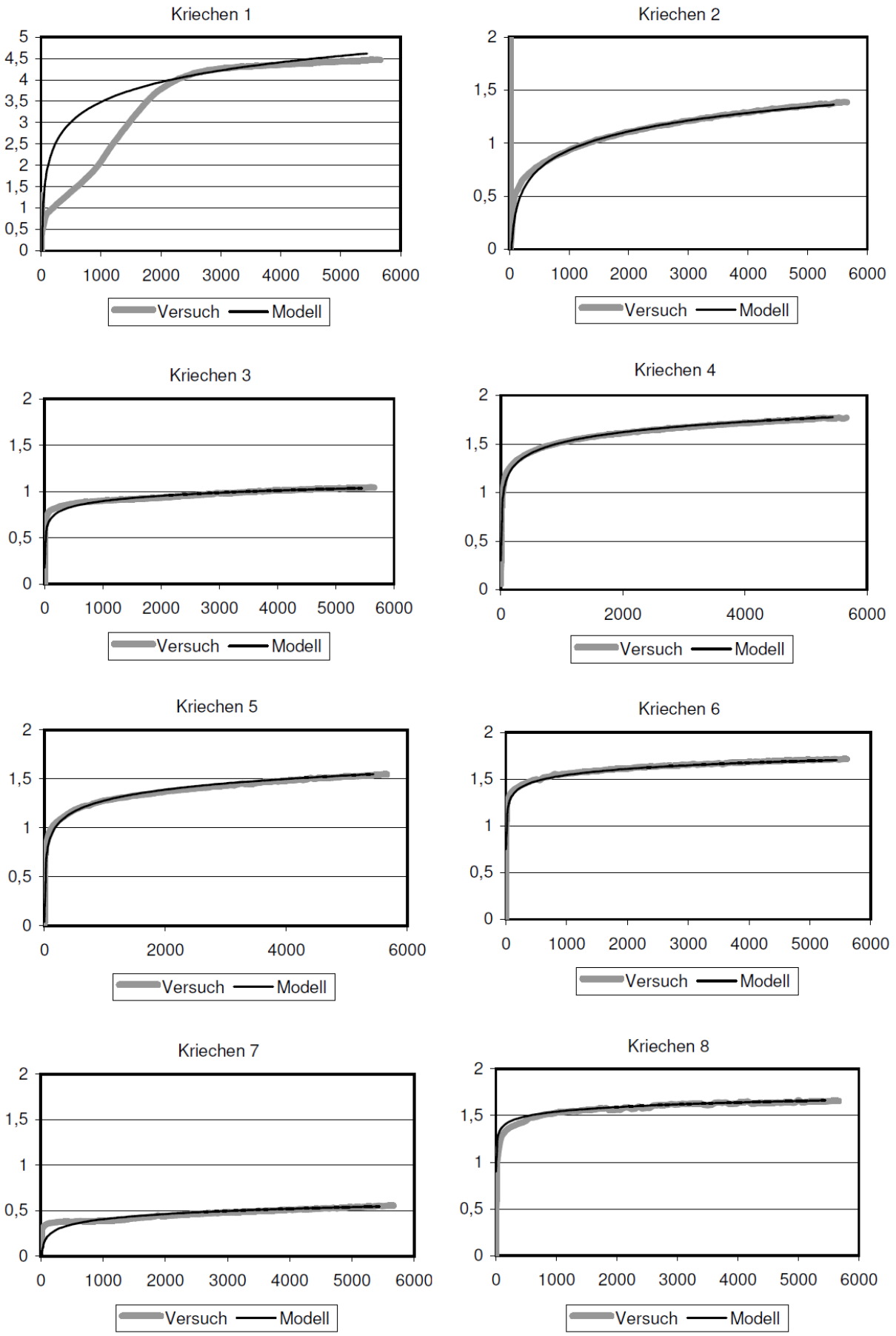


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf von Modellantwort und Versuch (Versuch 1 bis 8)

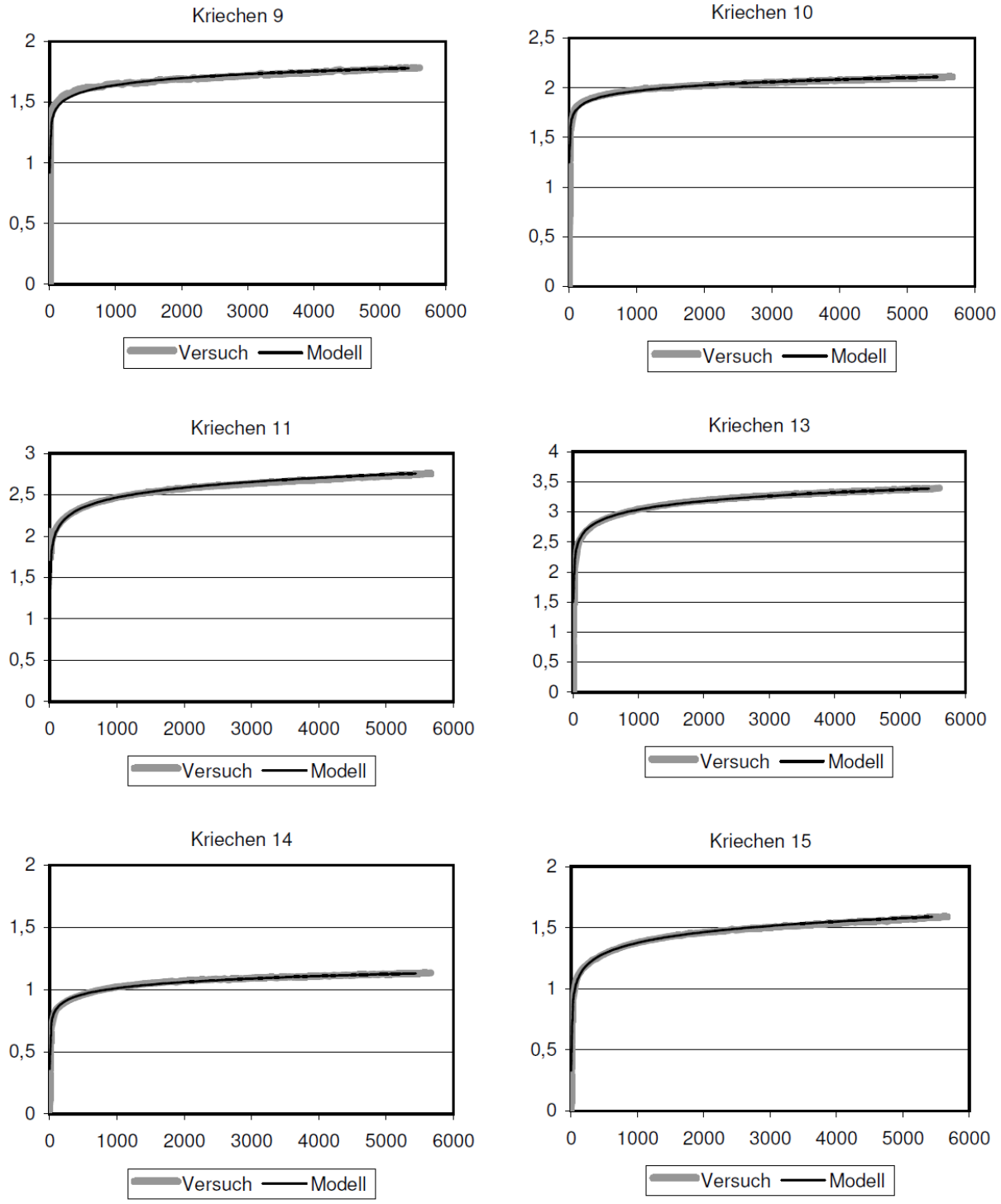


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf von Modellantwort und Versuch (Versuch 9 bis 15)

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den zeitlichen Verlauf der Verschiebung und die Modellantwort. Es kann eine sehr gute Übereinstimmung erkannt werden.

Weiters wurde aus den in Tabelle 6 dargestellten Werten für die untersuchten Temperaturstufen die entsprechenden Mittelwerte bestimmt, mit H(-10ºC) = 0,001817 $MPa^{-1}s$ und H(-5ºC) = 0,001390 $MPa^{-1}s$.

Die Temperaturabhängigkeit des Kriechverhaltens von Eis kann mit dem Arrhenius Gesetz beschrieben werden. Wendet man das Arrhenius Gesetz auf den Kriechparameter *H* an, so erhält man

$$H(T) = H(\overline{T})\ \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{\overline{T}}\right)\right]$$

wobei *R* die allgemeine Gaskonstante, mit *R* = 8,314 J/mol, *Q* die Aktivierungsenergie und $\overline{T}$, mit $\overline{T}$ = 263 K (-10°C), die Referenztemperatur bezeichnen. Anhand der beiden Werte für den Parameter *H* kann die noch unbekannte Aktivierungsenergie aus

$$0{,}001390 = 0{,}001817 * \exp\left[-\frac{\mathrm{Q}}{8{,}314}\left(\frac{1}{268}-\frac{1}{263}\right)\right] \rightarrow \mathrm{Q} = 31{,}45\mathrm{kJ/mol}$$

errechnet werden.

Nach ca. 90 Minuten begann bei den meisten Versuchen die sekundäre Kriechphase, durch die Ausbildung von Mikrorissen gekennzeichnet ist. Durch diese Schädigung der Materialstruktur des Eises kann davon ausgegangen werden, dass das Rückkriechen nicht mit dem aus den Primärkriechen ermittelten Parametern abgebildet werden kann. In der Tat musste auf Basis der im Anhang C ermittelten Formeln eine um Faktor 10 geringere. Nachgiebigkeitsrate für das Rückkriechen verwendet werden, um die experimentellen Daten wiedergeben zu können.

Schlussfolgerungen

Anhand der im Rahmen dieser Diplomarbeit erhaltenen Versuchsergebnisse können folgende Schlussfolgerungen gewonnen werden:

1. Das Kriechverhalten von Eis folgt einem logarithmischen Kriechmodell. Ab einer Kriechdauer von ca. 90 Minuten stellte sich jedoch eine konstante Kriechrate, die auf Sekundärkriechen und somit beginnende Schädigung des Materials rückschließen lässt, ein. Für weitere Arbeiten müsste diese Schädigung des Eises durch die Berücksichtigung verschiedener Belastungsniveaus untersucht werden. Im Bereich des Primärkriechens erwies sich die Approximation der Kriechrate mittels einer Geraden im doppellogarithmische Maßstab als passend, was auf das zuvor erwähnte logarithmisches Kriechen hindeutet.

2. Der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften von Eis konnte im Rahmen dieser Arbeit deutlich bestätigt werden. Die auf Basis der zwei Versuchstemperaturen erhaltene Aktivierungsenergie des zu Grunde gelegten Arrheniusgesetzes ergab im Vergleich mit in der Literatur verfügbaren Werten einen zu geringeren Wert. Nachdem hier nur zwei verschiedene Temperaturstufen (-5 und -10 °C) untersucht wurden, sollte in weiterführenden Arbeiten mehrere Temperaturstufen (mindestens vier) im Versuchsprogramm berücksichtigt werden, um den Einfluss der Temperatur genauer analysieren zu können.

3. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls nach verschiedenen Verfahren lieferte stark schwankende Ergebnisse, wobei nach Beseitigung des durch den Probeneinbau verursachten Schlupfs bessere Werte erhalten wurden. Die Versuchsergebnisse aus den Ultraschallversuchen lieferten einen dynamischen Elastizitätsmodul von 13830 N/mm² wobei die Streuung sehr gering ausfiel.

Mit dieser Arbeit wurden die ersten Grundlagen für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Eis geliefert, wobei der Fokus der Arbeit auf der Herstellung weitgehend homogener Probekörper lag. In weiterführenden Arbeiten gilt es, die in dieser Arbeit vorgestellte Methode der Probekörperherstellung für die Durchführung eines weiter gespannten Versuchsprogramms umzusetzen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:Entwickelte Apparatur zur Herstellung von Eisproben 7
Abbildung 2: Steuerung 8
Abbildung 3: Schalteinheit / Interface 9
Abbildung 4: Zwei Probekörper aus Eis 9
Abbildung 5: Verwendete Prüfeinrichtung 10
Abbildung 6: Belastungsgeschichte 12
Abbildung 7: Typischer Kriechverlauf 13
Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der experimentell erhaltenen Druckfestigkeit [N/mm²] 14
Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramme für die am Ende jeder Versuchs durcgeführte Druckversuche für T = -10 und -5 ºC 16
Abbildung 10: Lineare Approximation der Kriechnachgiebigkeitsrate im doppeltlogarithmischen Maßstab (Versuch 13) 18
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf von Modellantwort und Versuch (Versuch 1 bis 8) 19
Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf von Modellantwort und Versuch (Versuch 9 bis 15) 20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten der durchgeführten Versuche 12
Tabelle 2: Druckfestigkeit 14
Tabelle 3: Elastizitätsmodul [N/mm²] 15
Tabelle 4: Übersicht über die Proben für die Ultraschallmessung 17
Tabelle 5: Ergebnisse der Ultraschallmessung (mit E = 13830 N/mm²) 17
Tabelle 6: Werte für den Parameter H [MPa^{-1}s] 18

Literatur

R. Lackner, Ch. Pichler, A. Kloiber. Artificial Ground Freezing of Fully Saturated Soil: Viscoelastic Behavior Journal of engineering of mechanics. ASCE / January (2008)

Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/arrhenius-Gleichung - Stand 09.03.2010

Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Aktivierungesenergie - Stand 09.03.2010

H.A. Mang, G. Hofstetter: *Festigkeitslehre*, Springer Wien New York, 2000

Anhang A: Datenblätter der Kriechversuche

V E R S U C H S D A T E N B L A T T

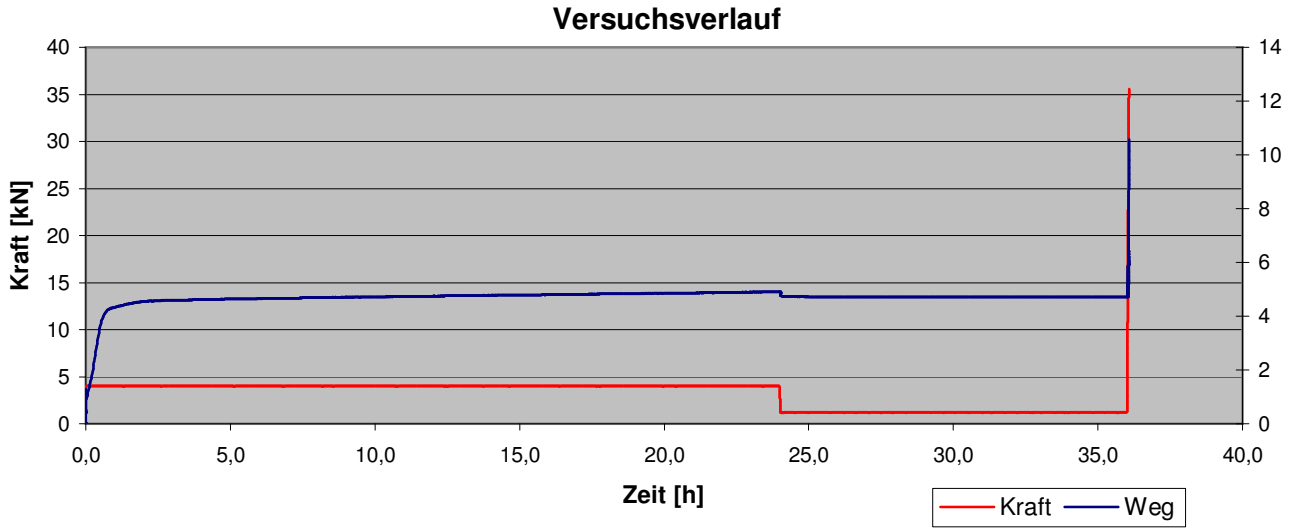
Kriechen1

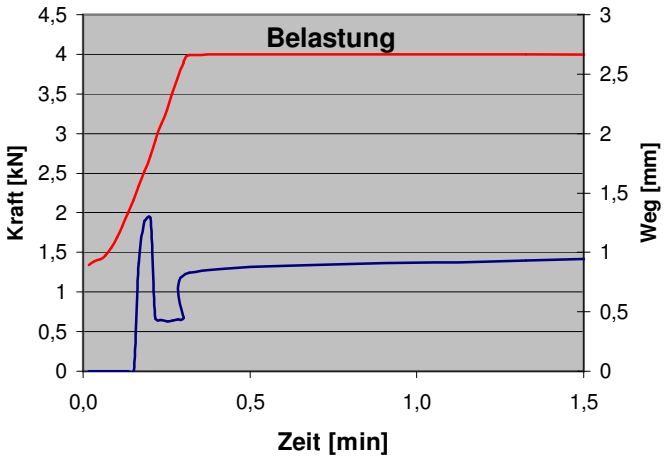
Höhe: 146 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1146,68 cm³

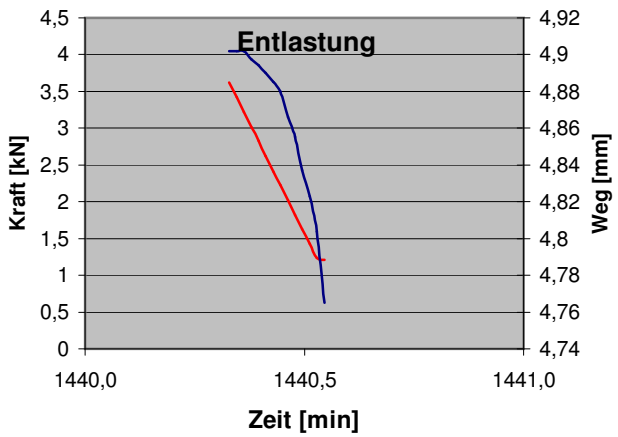
Temperatur: -10 °C

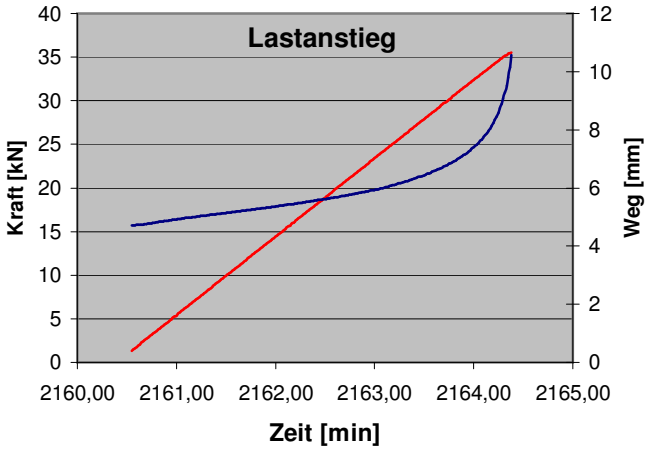
F_{max}= 35,44 kN
σ_{max} = 4,51 N/mm²
Weg bei F_{max} = 11,93 mm

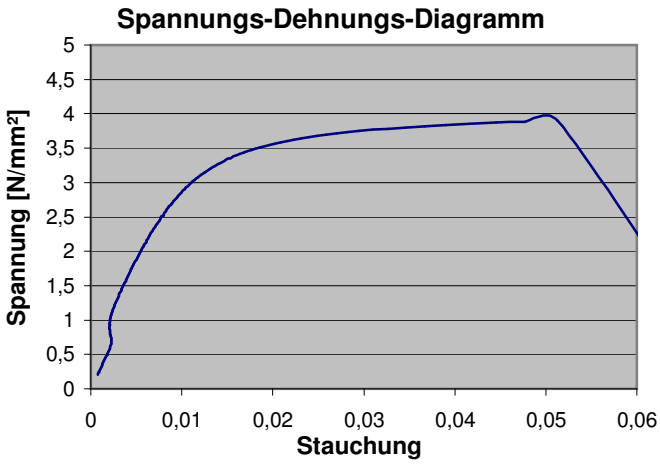
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	4,91 mm	davon elastisch	0,830 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,19 mm	davon elastisch	-0,141 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

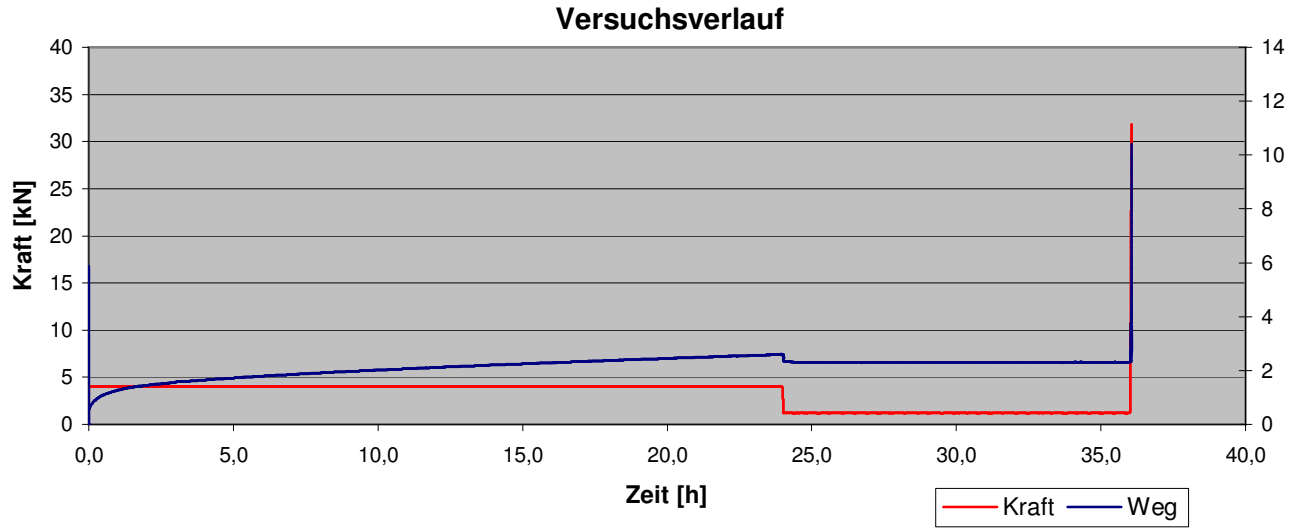
Kriechen2

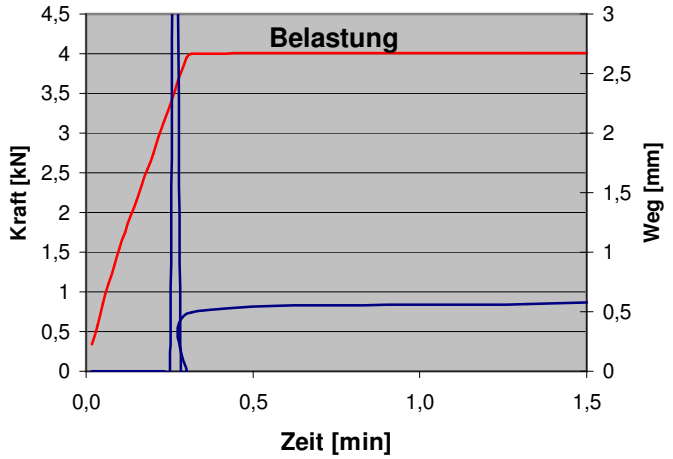
Höhe: 158 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1240,93 cm³

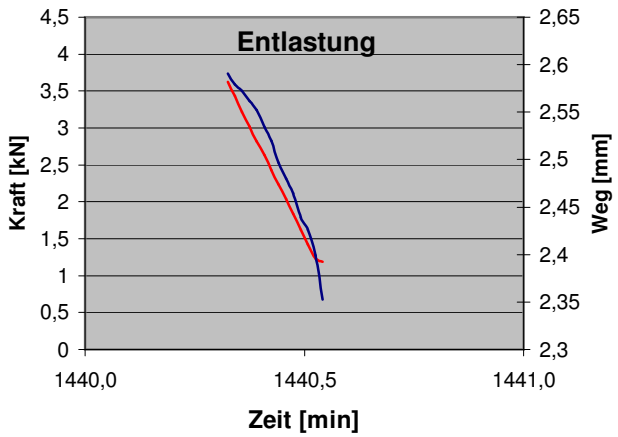
Temperatur: -10 °C

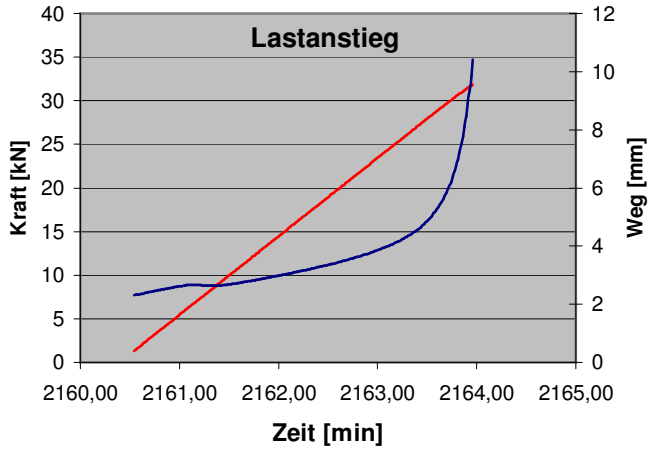
F_{max}= 31,85 kN
σ_{max} = 4,06 N/mm²
Weg bei F_{max} = 10,41 mm

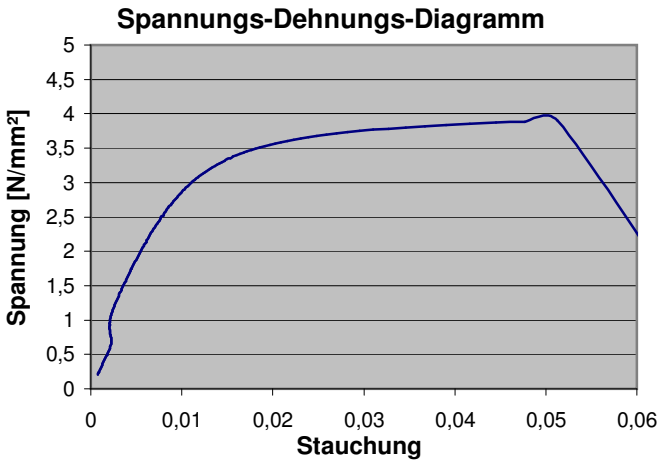
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,60 mm	davon elastisch	0,492 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,29 mm	davon elastisch	-0,245 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

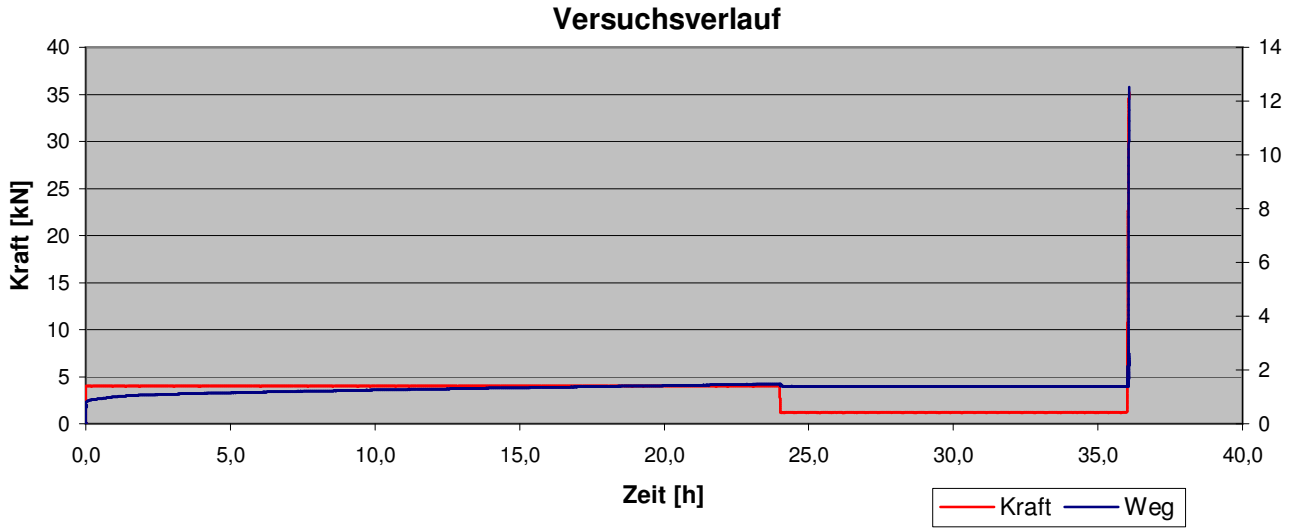
Kriechen3

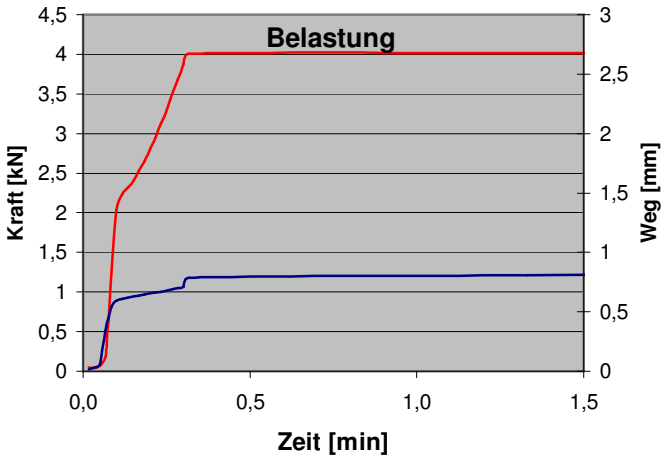
Höhe: 164 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1288,05 cm³

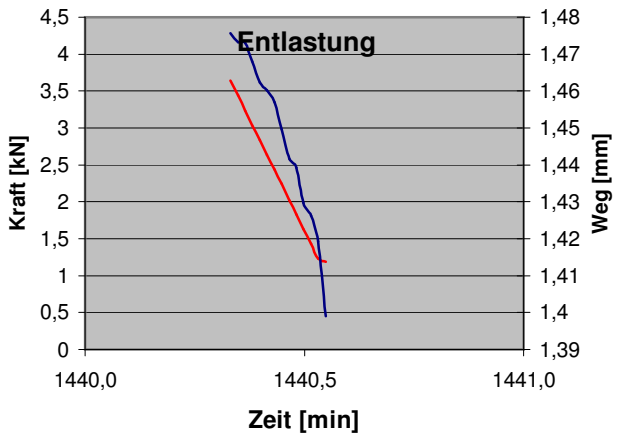
Temperatur: -10 °C

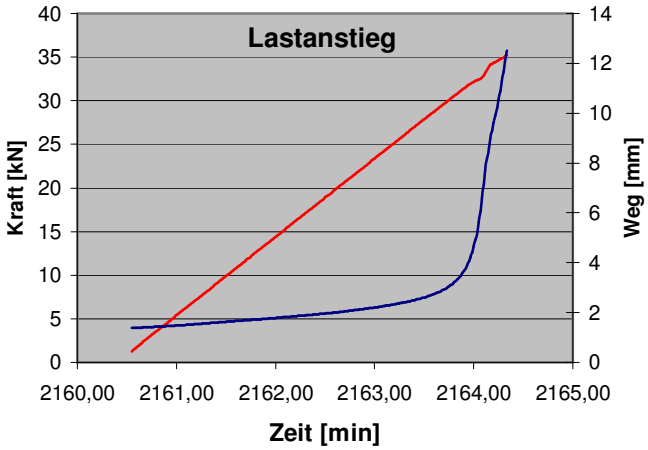
F_{max}= 35,22 kN
σ_{max} = 4,48 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,52 mm

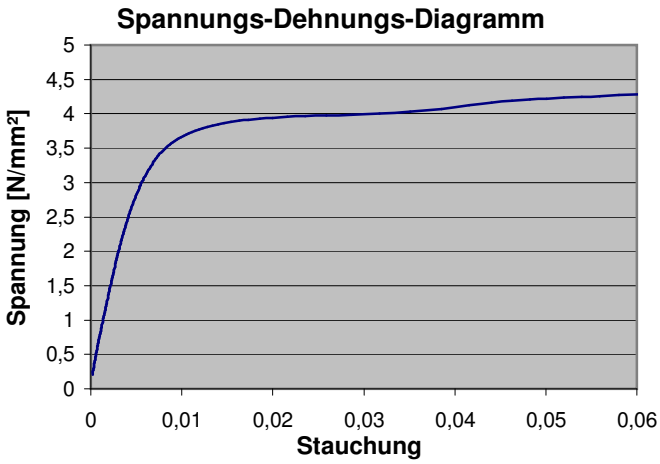
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	1,48 mm	davon elastisch	0,781 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,10 mm	davon elastisch	-0,080 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

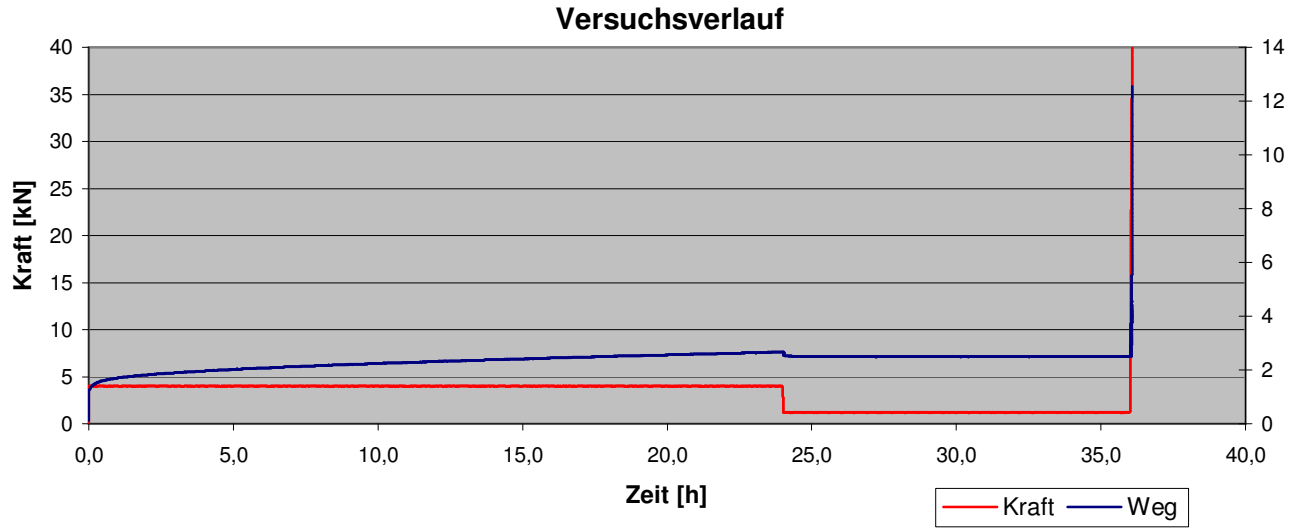
Kriechen4

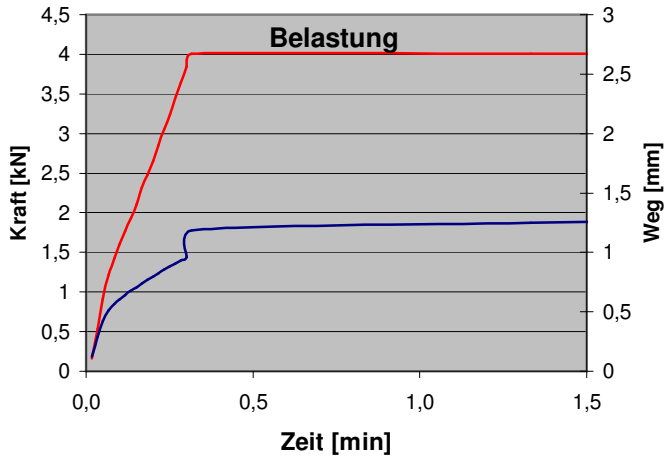
Höhe: 162 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1272,35 cm³

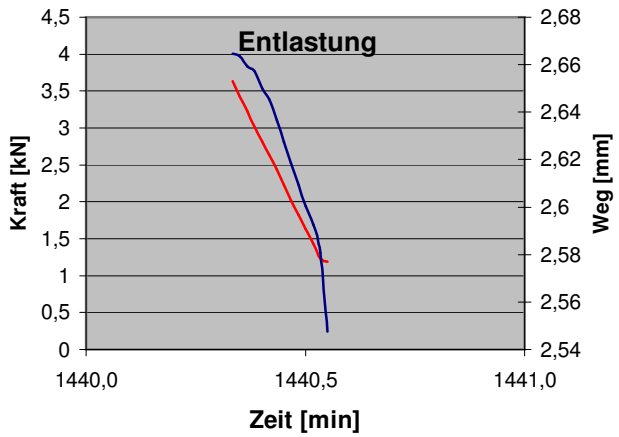
Temperatur: -10 °C

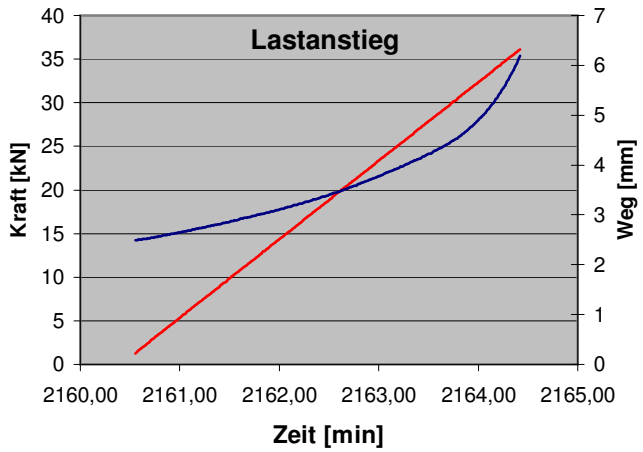
F_{max}= 40,55 kN
σ_{max} = 5,16 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,54 mm

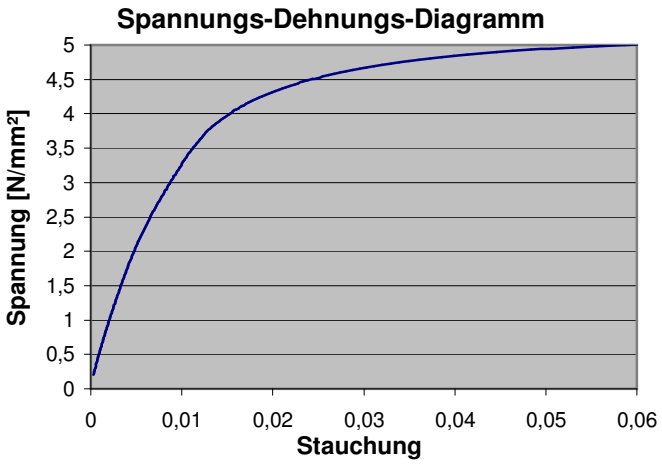
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,61 mm	davon elastisch	1,123 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,17 mm	davon elastisch	-0,120 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

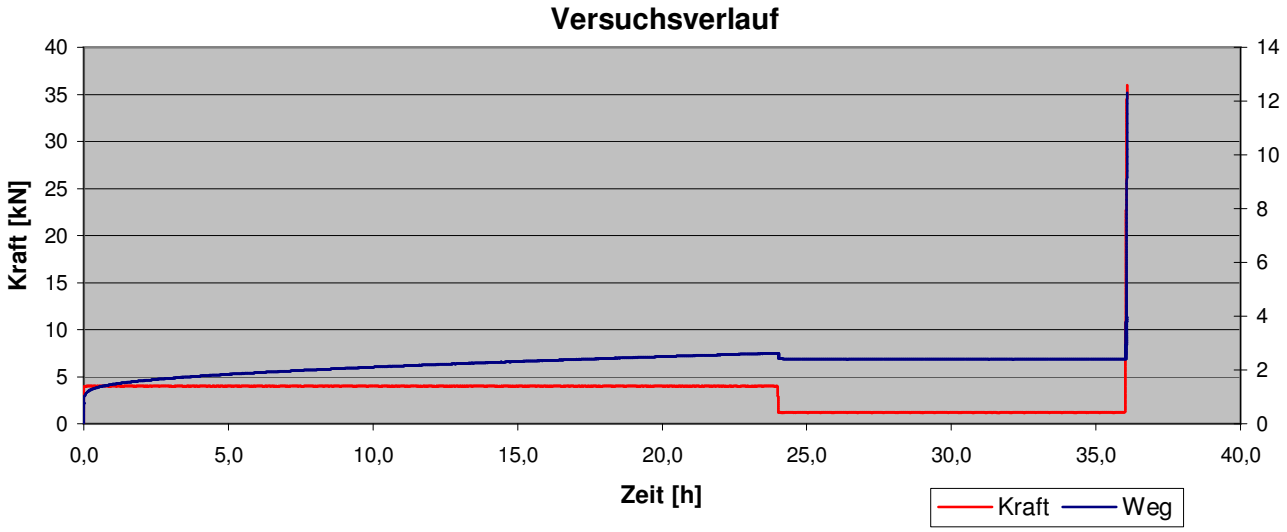
Kriechen5

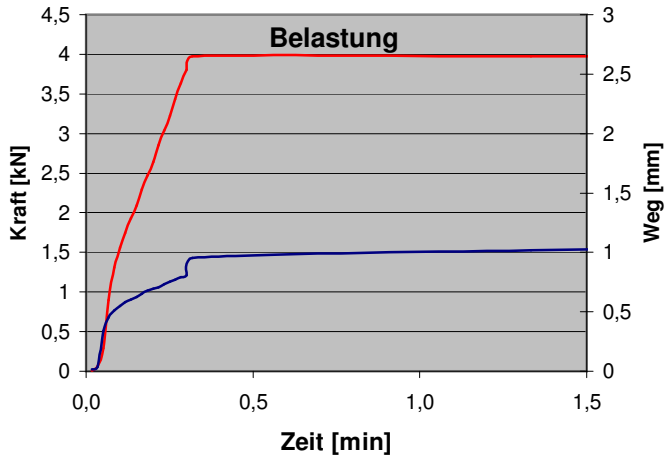
Höhe: 158 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1240,93 cm³

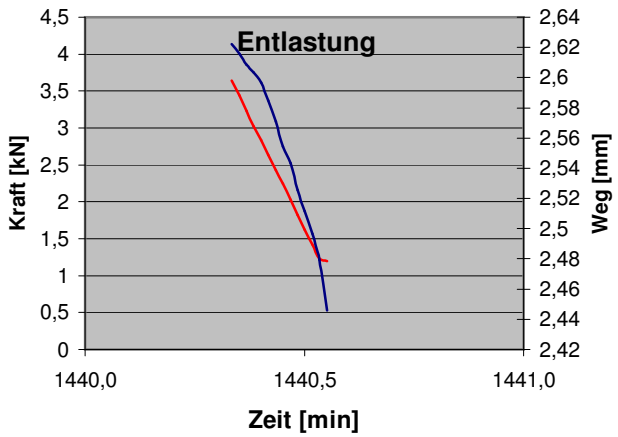
Temperatur: -10 °C

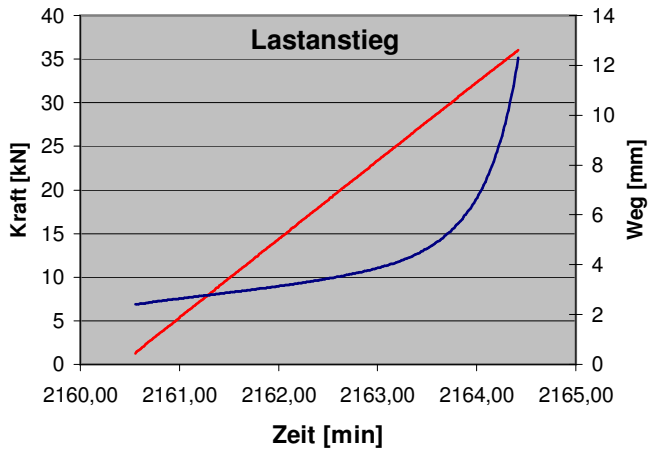
F_{max}= 36,02 kN
σ_{max} = 4,59 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,31 mm

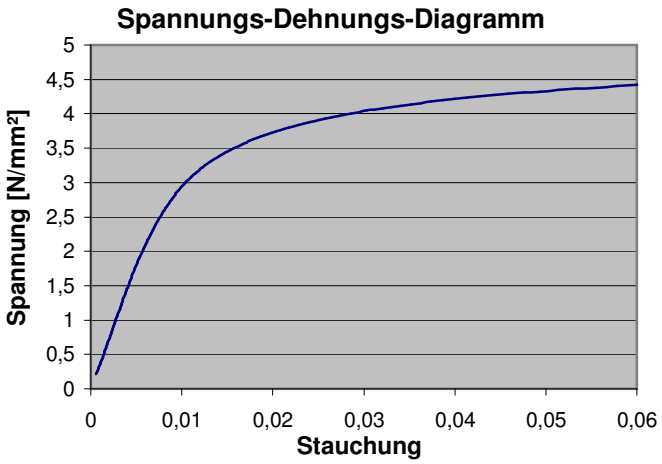
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,62 mm	davon elastisch	0,947 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,22 mm	davon elastisch	-0,178 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

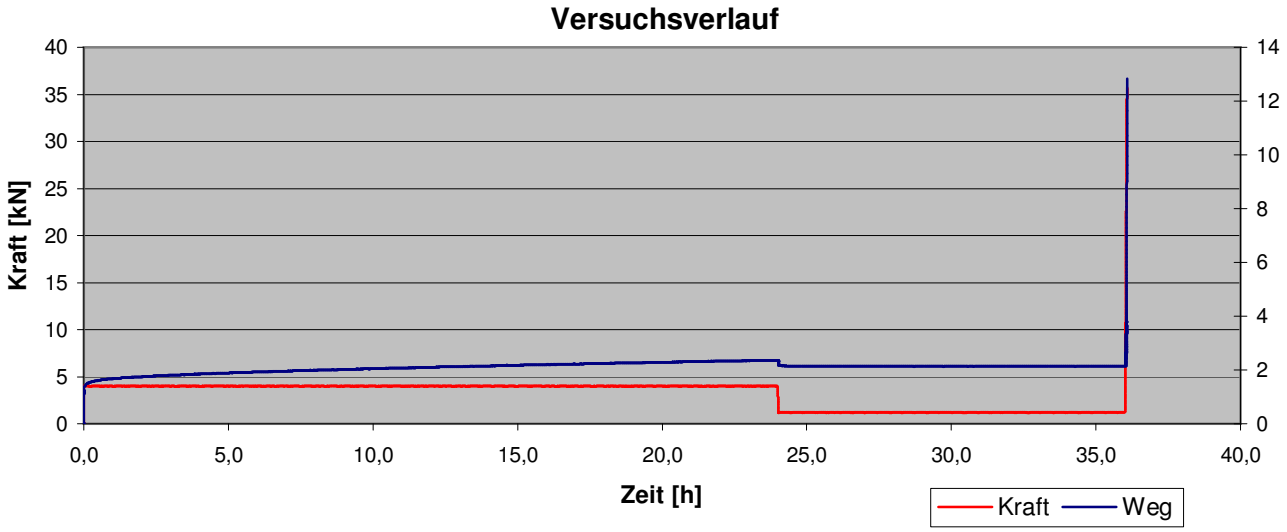
Kriechen6

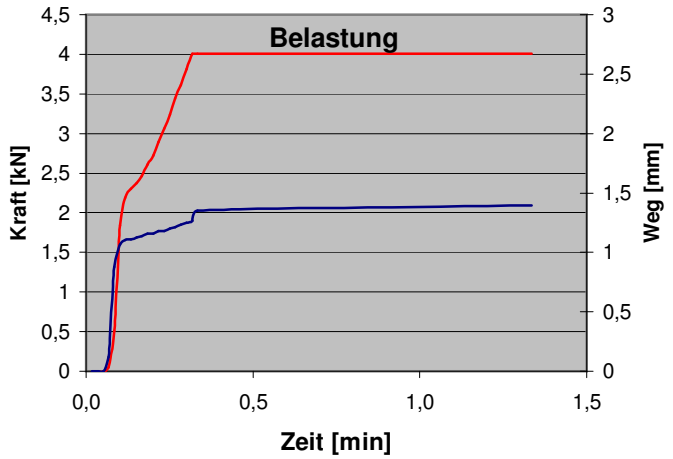
Höhe: 156 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1225,22 cm³

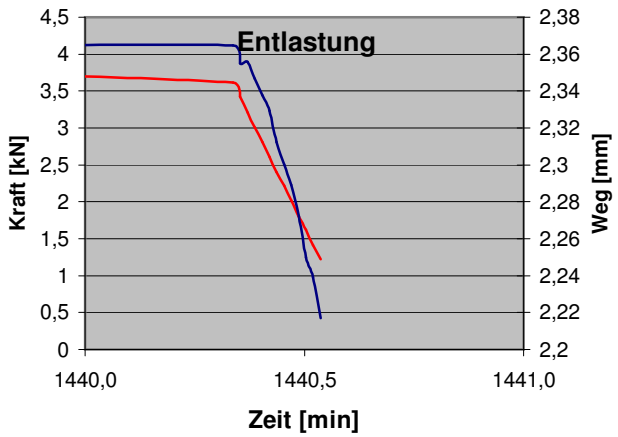
Temperatur: -10 °C

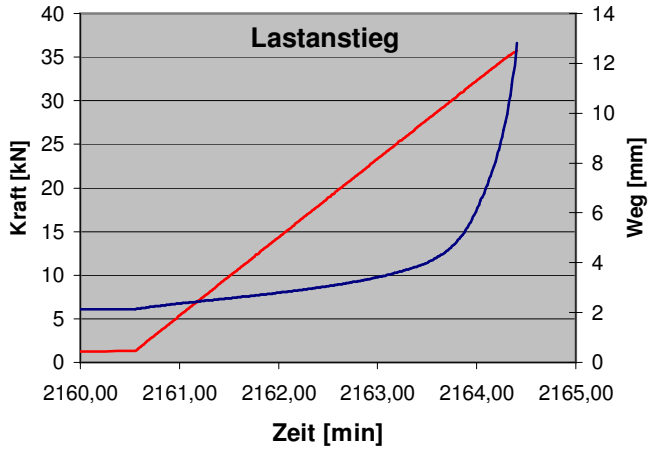
F_{max}= 35,71 kN
σ_{max} = 4,55 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,83 mm

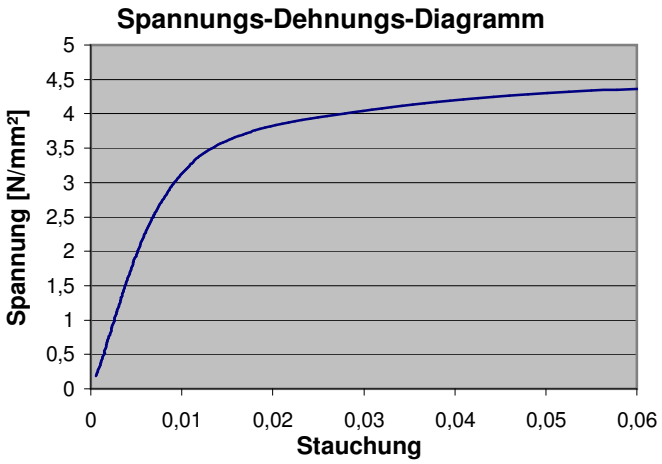
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,37 mm	davon elastisch	1,264 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,23 mm	davon elastisch	-0,152 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

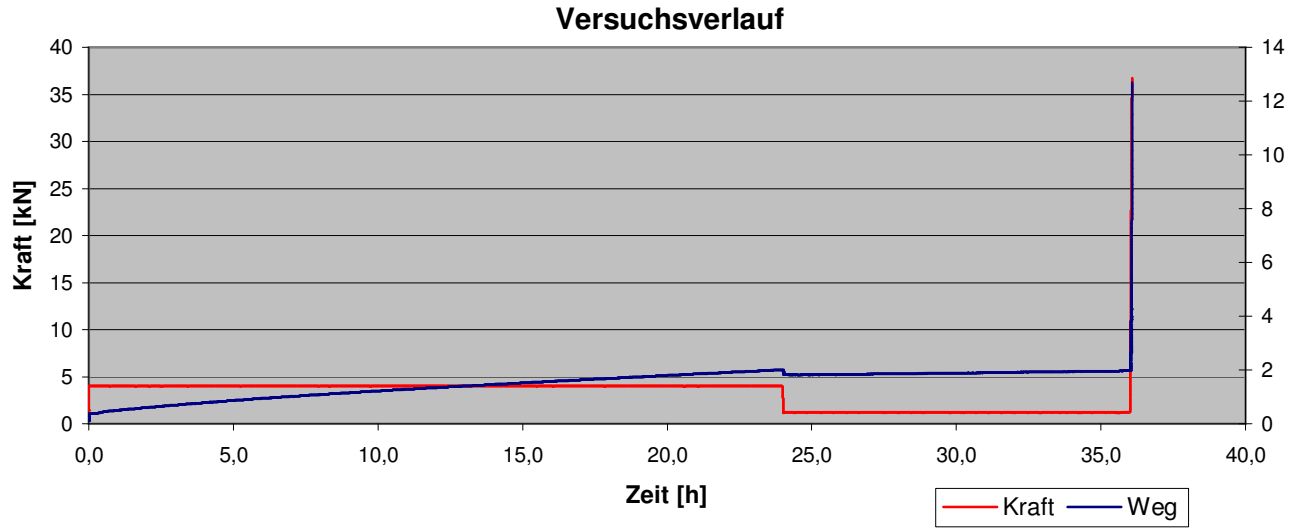
Kriechen7

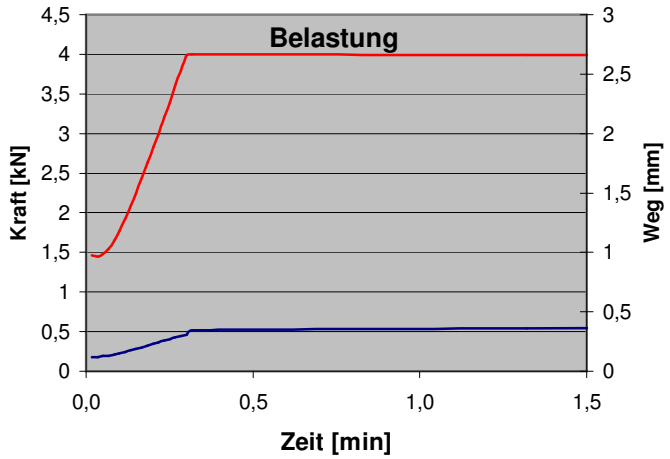
Höhe: 148 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1162,39 cm³

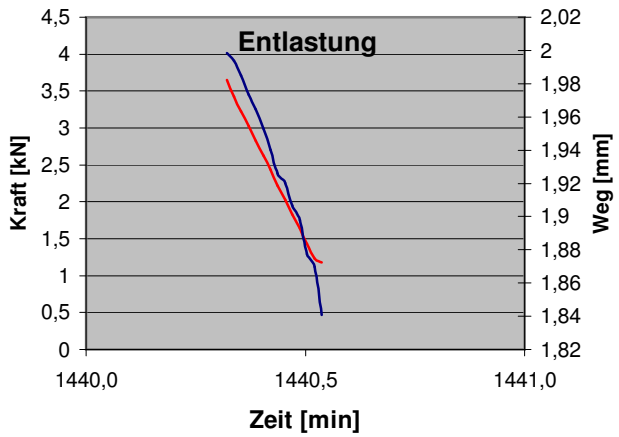
Temperatur: -5 °C

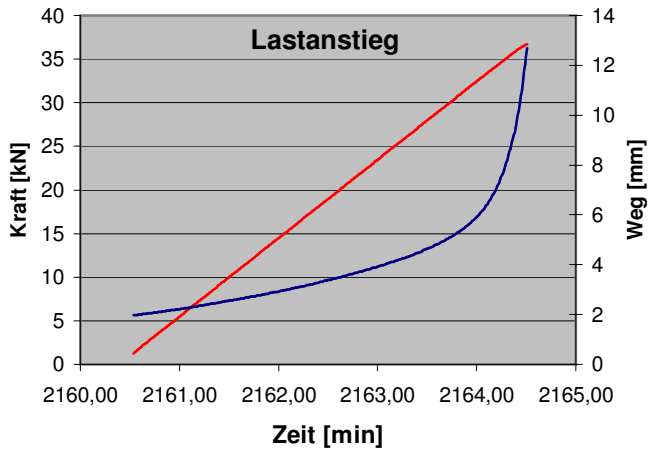
F_{max}= 36,72 kN
σ_{max} = 4,67 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,70 mm

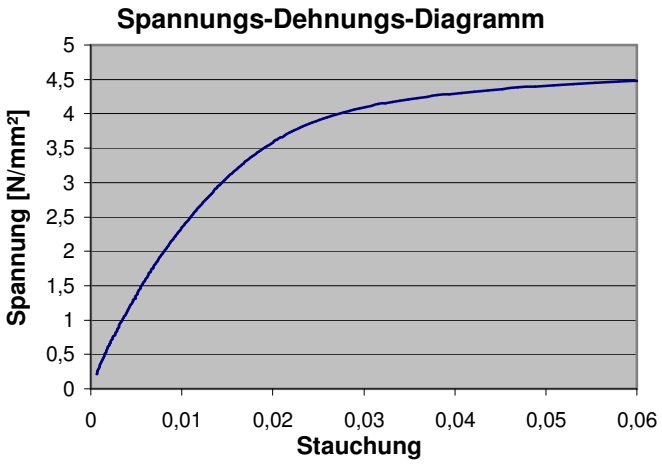
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	1,90 mm	davon elastisch	0,245 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,03 mm	davon elastisch	-0,165 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

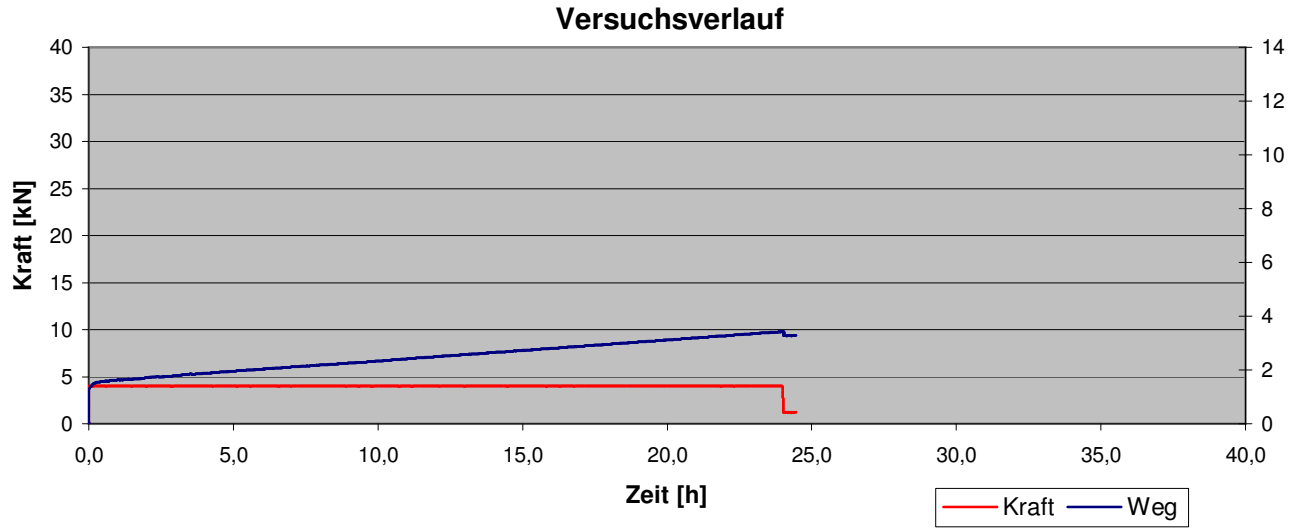
Kriechen8

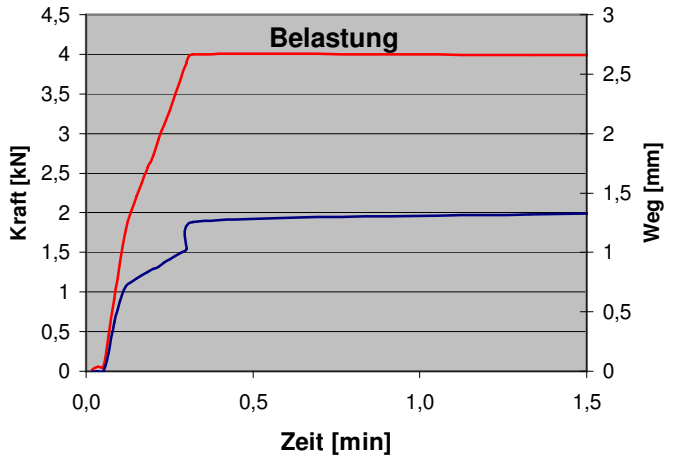
Höhe: 164 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1288,05 cm³

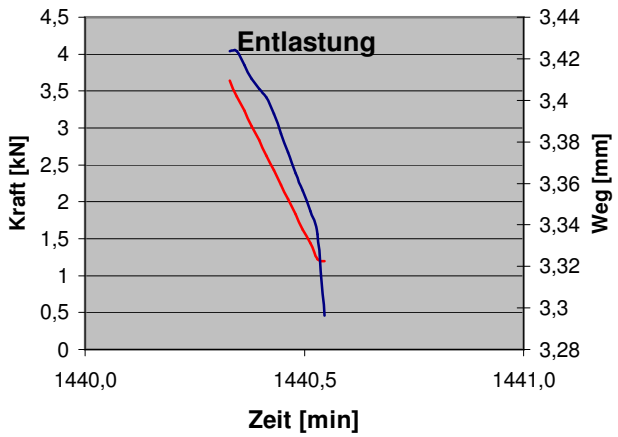
Temperatur: -5 °C

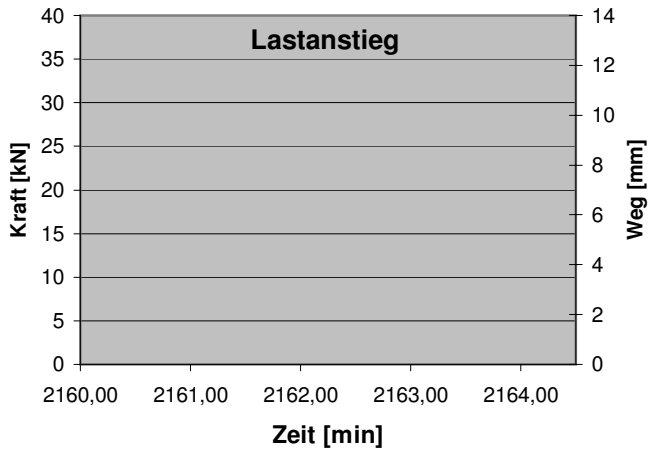
F_{max}= 0,00 kN
σ_{max} = 0,00 N/mm²
Weg bei F_{max} = 0,00 mm

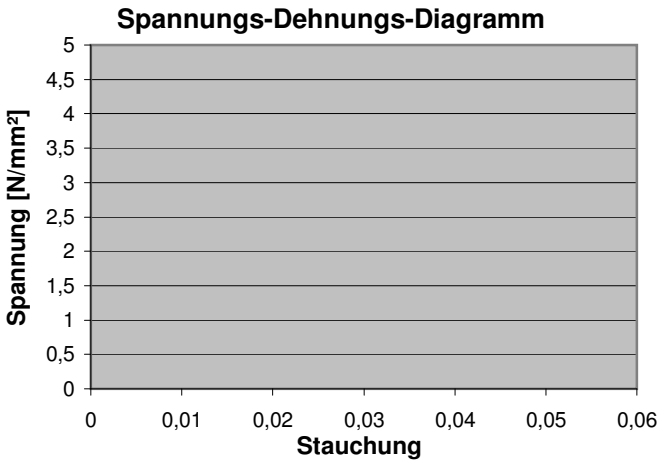
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*	*Datenaufzeichnung mangelhaft!*	
Kriechphase	4,0 kN	24 h	3,42 mm	davon elastisch	1,249 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,15 mm	davon elastisch	-0,127 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

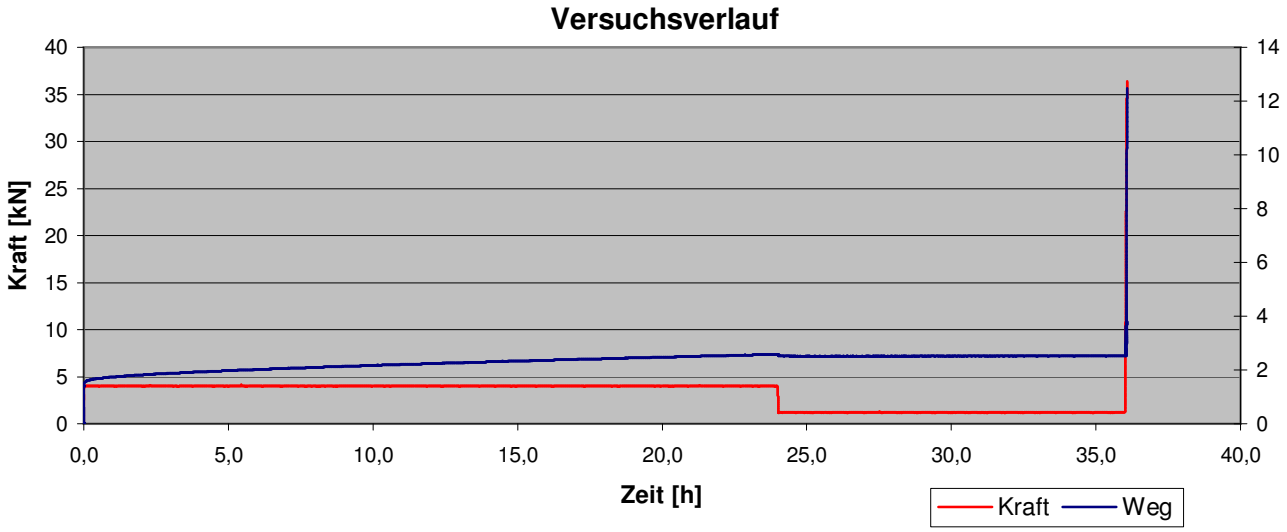
Kriechen9

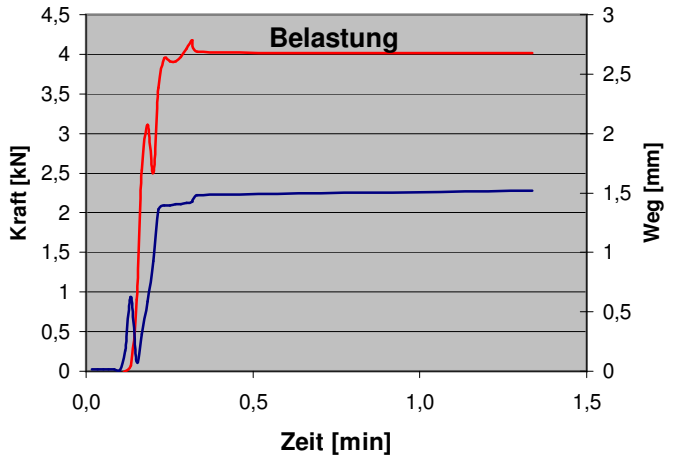
Höhe: 164 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1288,05 cm³

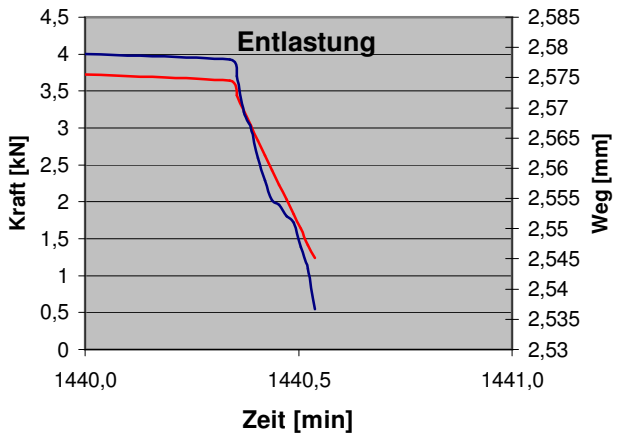
Temperatur: -5 °C

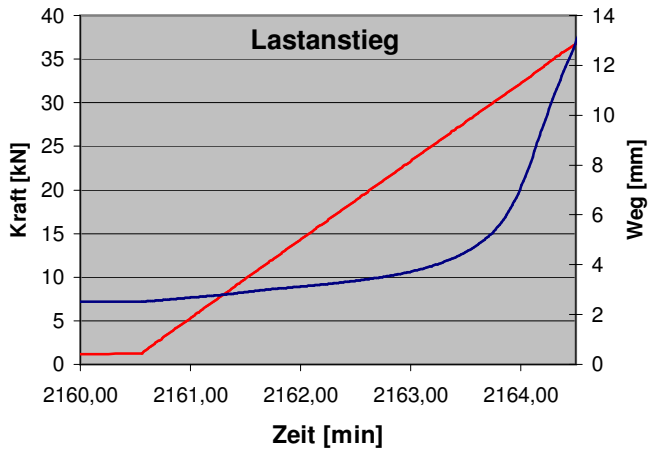
F_{max}= 36,42 kN
σ_{max} = 4,64 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,47 mm

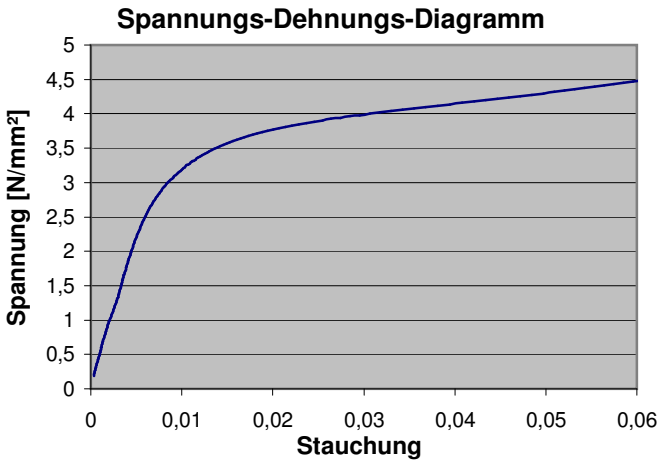
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,57 mm	davon elastisch	1,414 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,07 mm	davon elastisch	-0,046 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

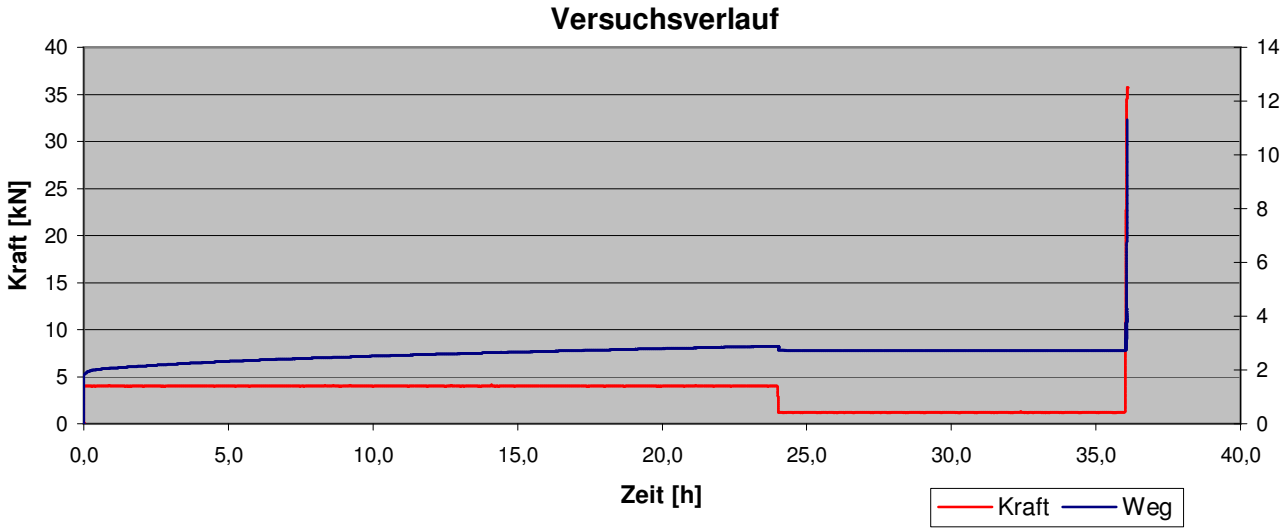
Kriechen10

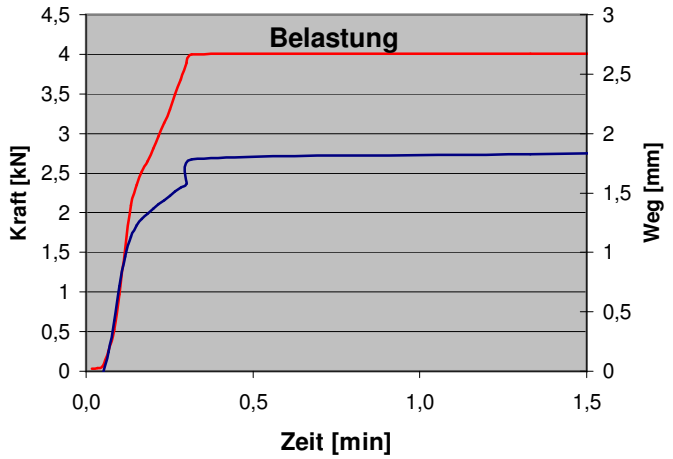
Höhe: 165 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1295,91 cm³

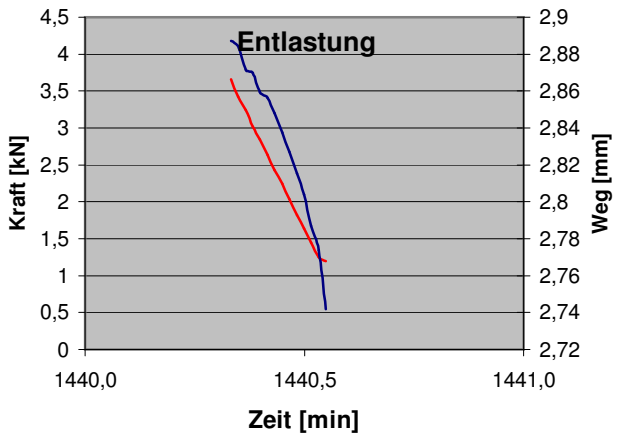
Temperatur: -5 °C

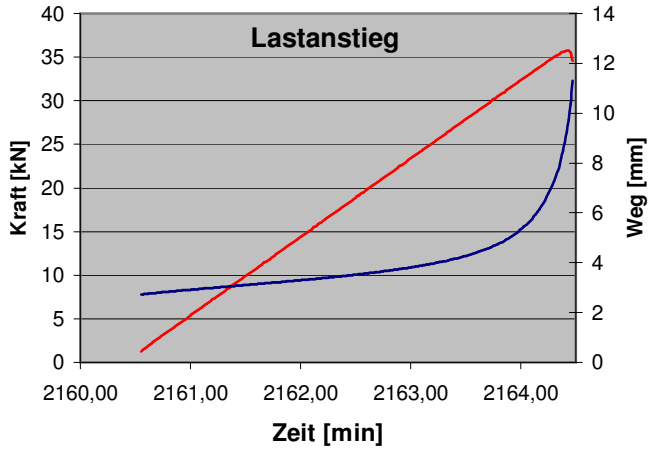
F_{max}= 34,59 kN
σ_{max} = 4,40 N/mm²
Weg bei F_{max} = 11,31 mm

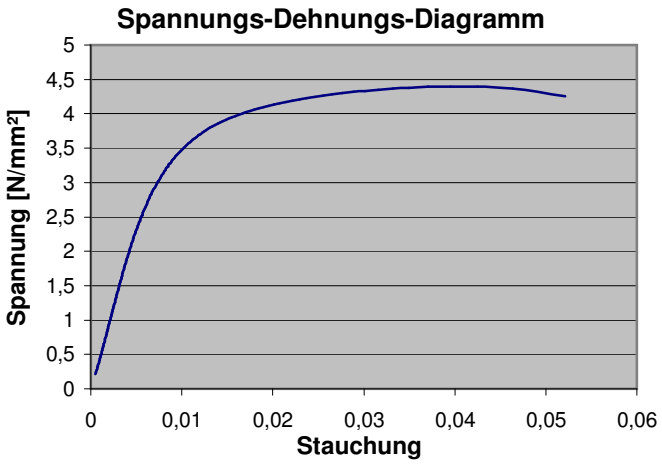
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,90 mm	davon elastisch	1,795 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,17 mm	davon elastisch	-0,146 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

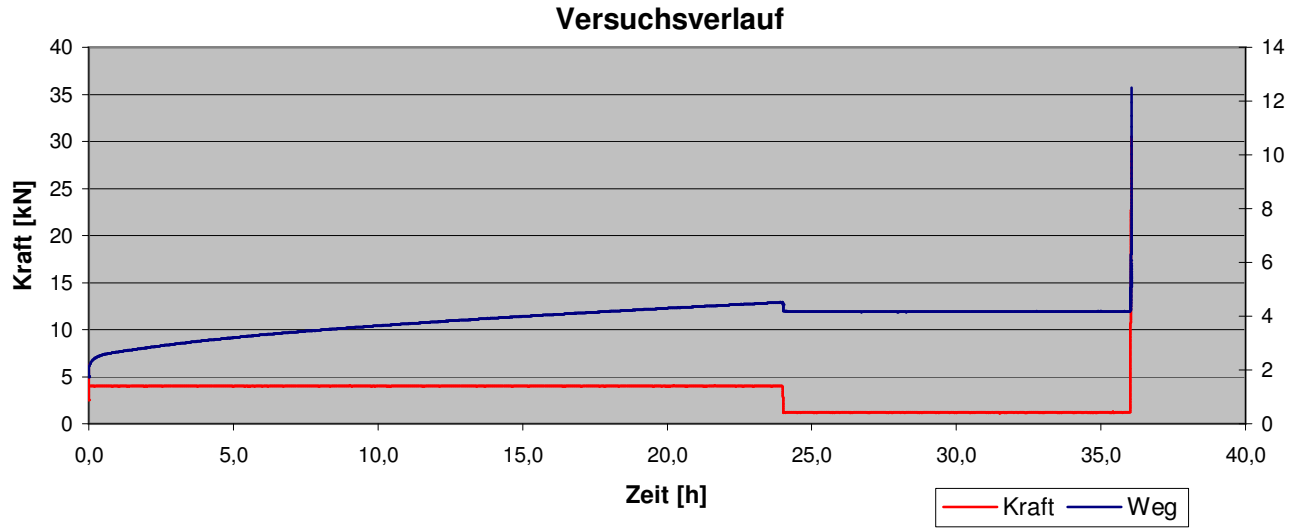
Kriechen11

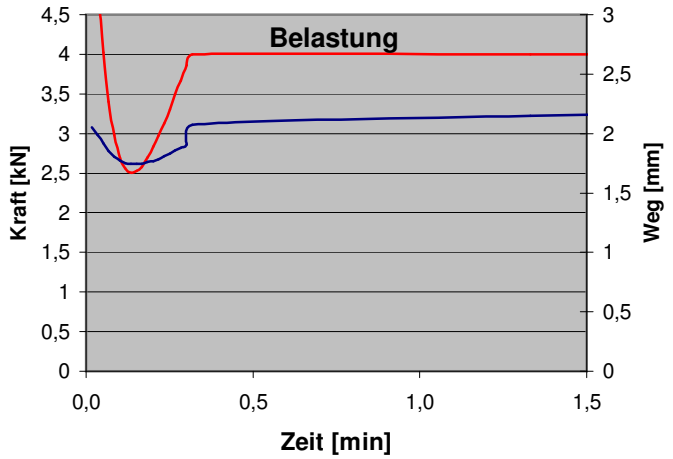
Höhe: 148 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1162,39 cm³

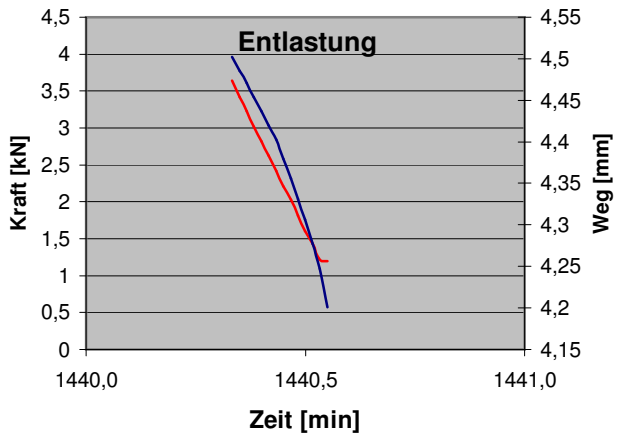
Temperatur: -5 °C

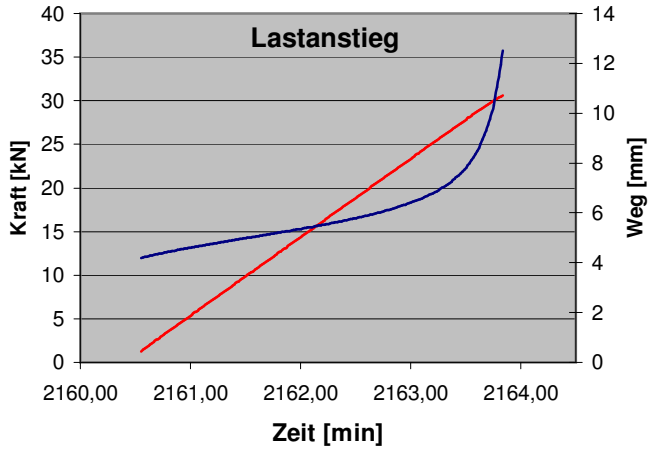
F_{max}= 30,58 kN
σ_{max} = 3,89 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,51 mm

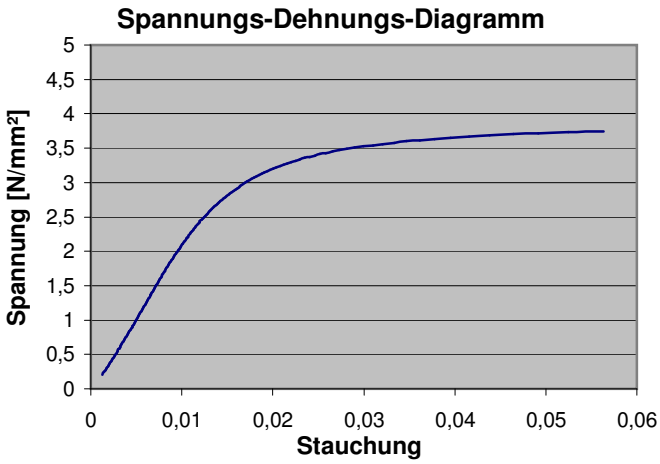
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,70 mm	davon elastisch	0,257 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,34 mm	davon elastisch	-0,314 mm









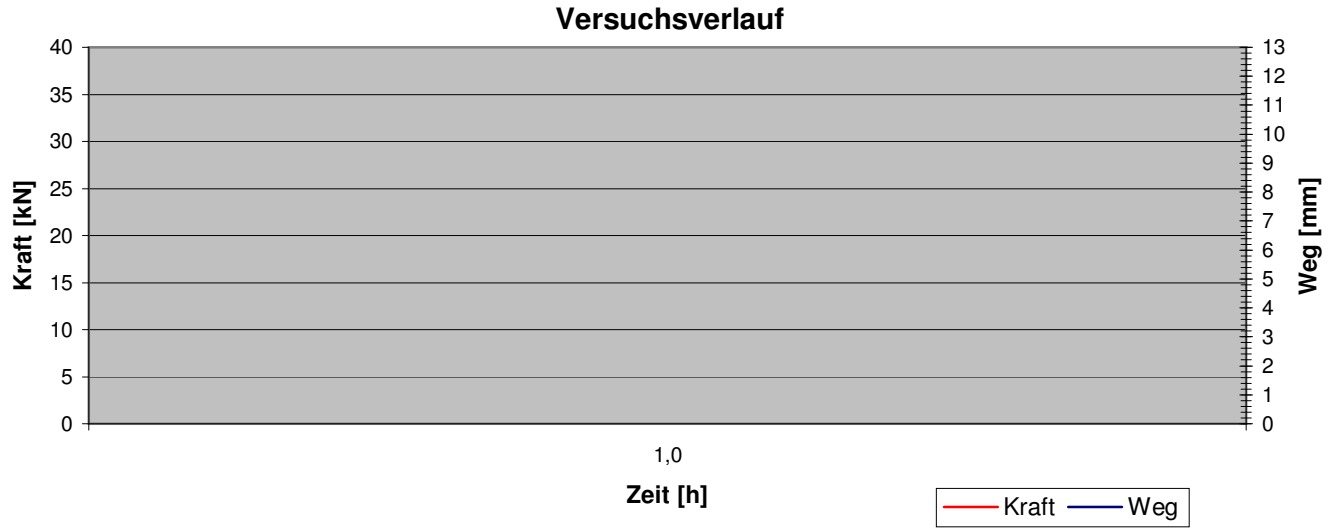


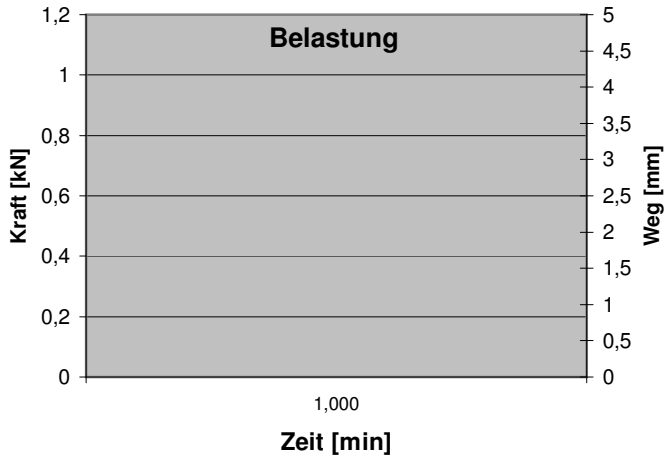
V E R S U C H S D A T E N B L A T T

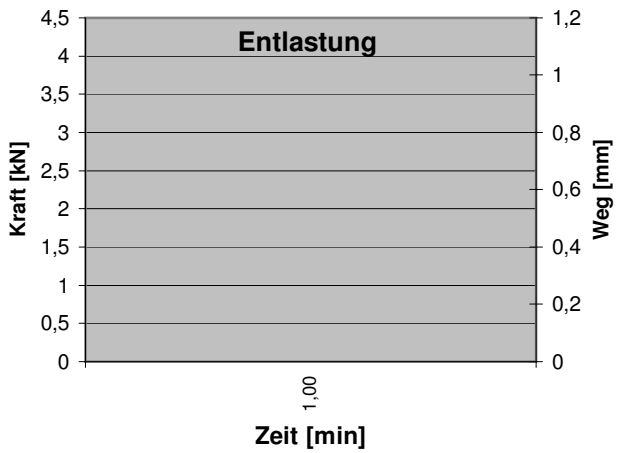
Kriechen12

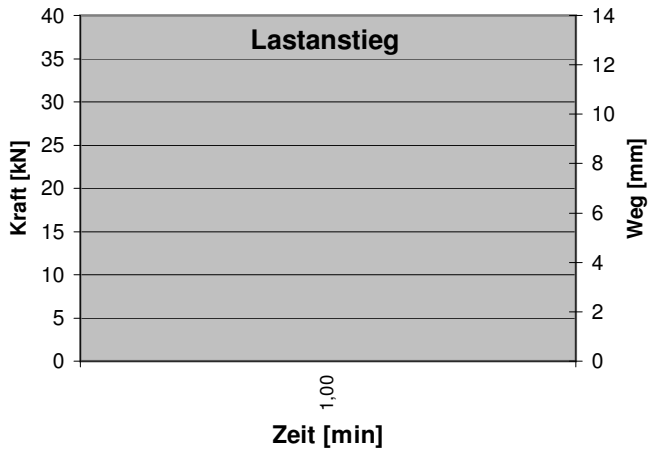
Höhe:	-	Temperatur:	-	F_{max}=	-
Durchmesser:	-			σ_{max} =	-
Fläche:	-			Weg bei F_{max} =	-
Volumen:	-				

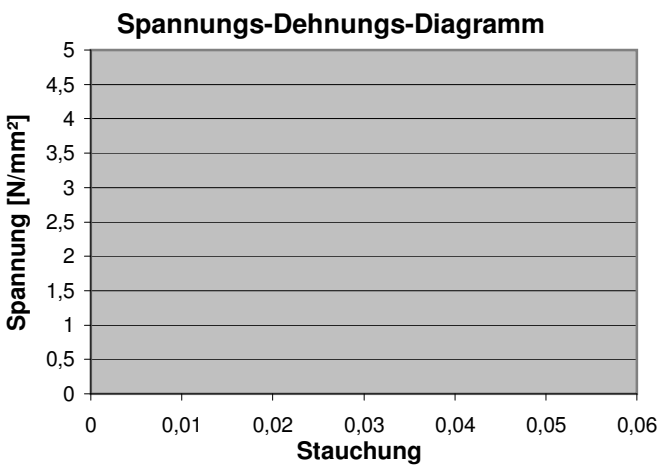
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*	*Aufzeichnung defekt!!*	
Kriechphase	4,0 kN	24 h	-	davon kriechend	-
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-	davon kriechend	-











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

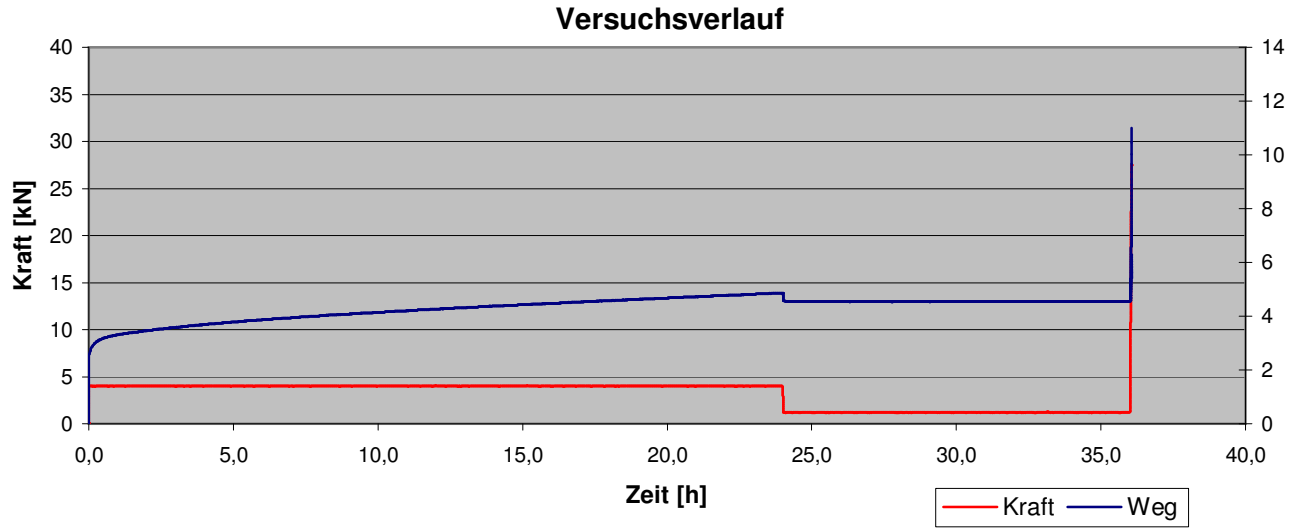
Kriechen13

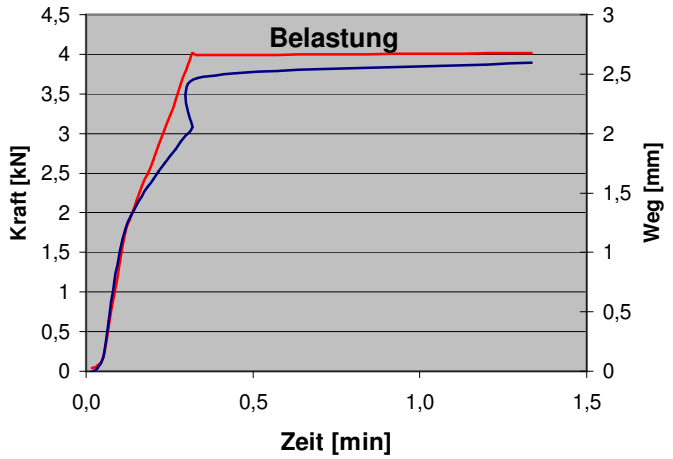
Höhe: 135 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1060,29 cm³

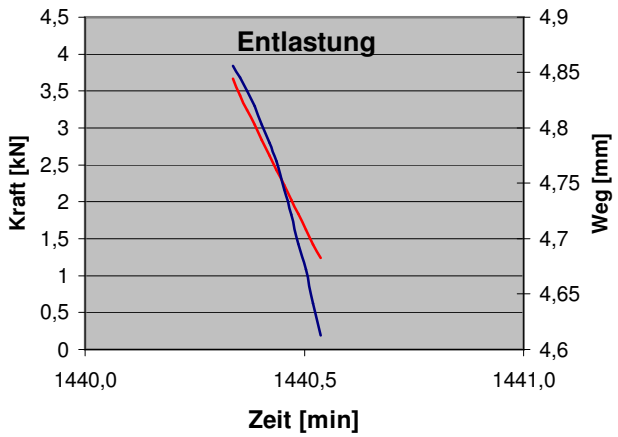
Temperatur: -5 °C

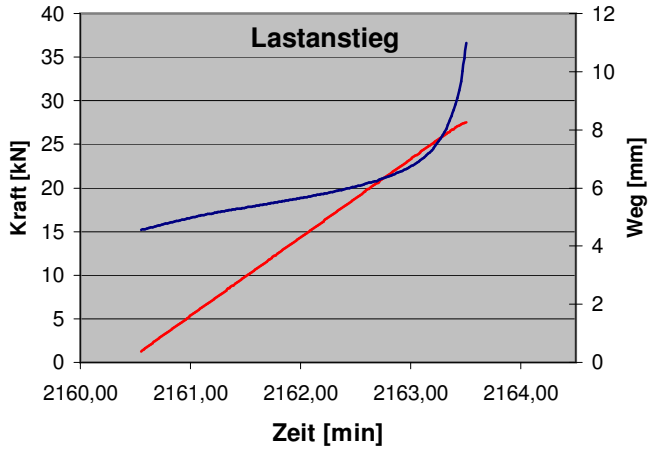
F_{max}= 27,52 kN
σ_{max} = 3,50 N/mm²
Weg bei F_{max} = 10,99 mm

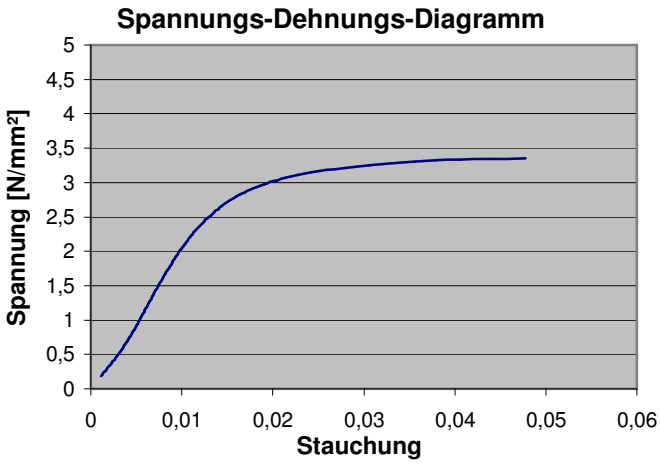
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	4,87 mm	davon elastisch	2,063 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,31 mm	davon elastisch	-0,251 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

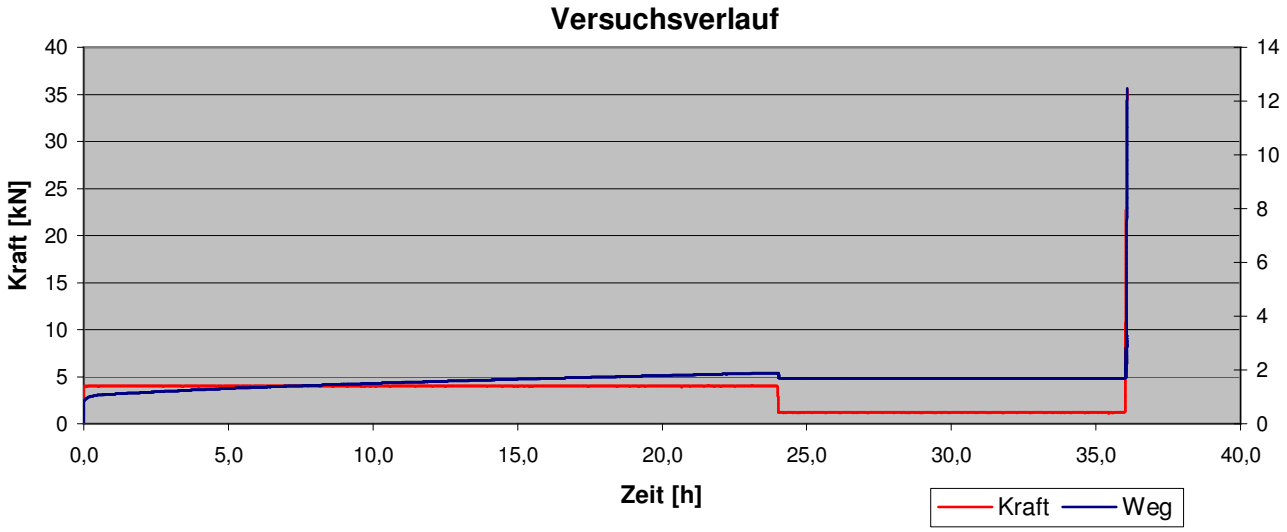
Kriechen14

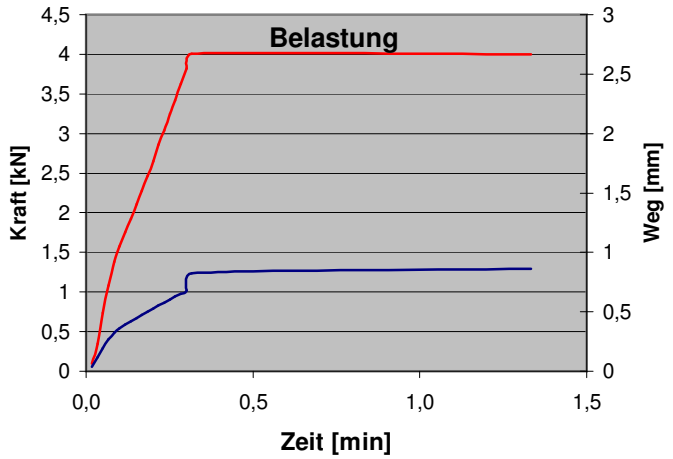
Höhe: 179 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1405,86 cm³

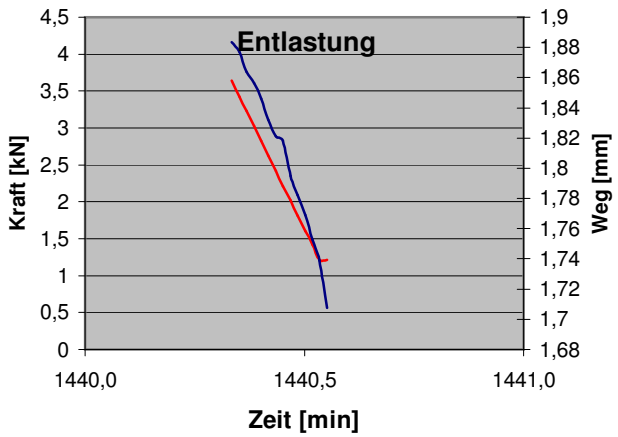
Temperatur: -5 °C

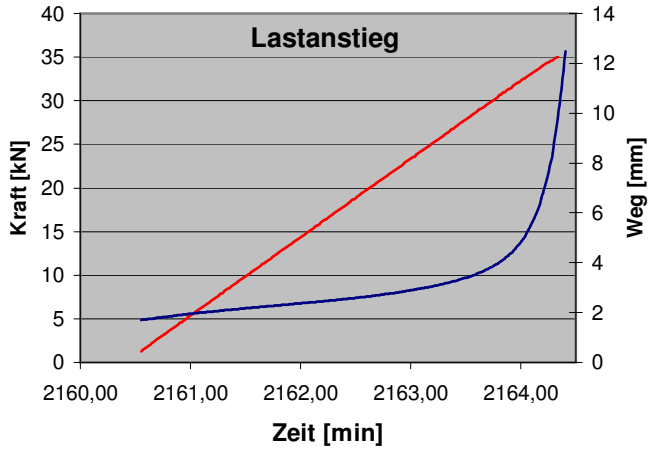
F_{max}= 35,55 kN
σ_{max} = 4,53 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,48 mm

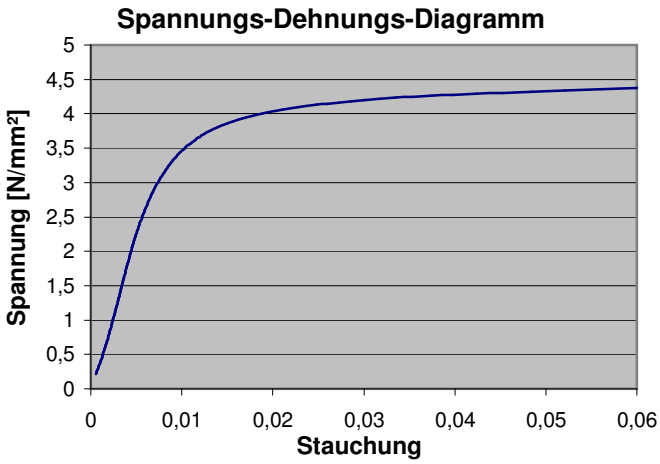
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	1,85 mm	davon elastisch	0,788 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,19 mm	davon elastisch	-0,183 mm











V E R S U C H S D A T E N B L A T T

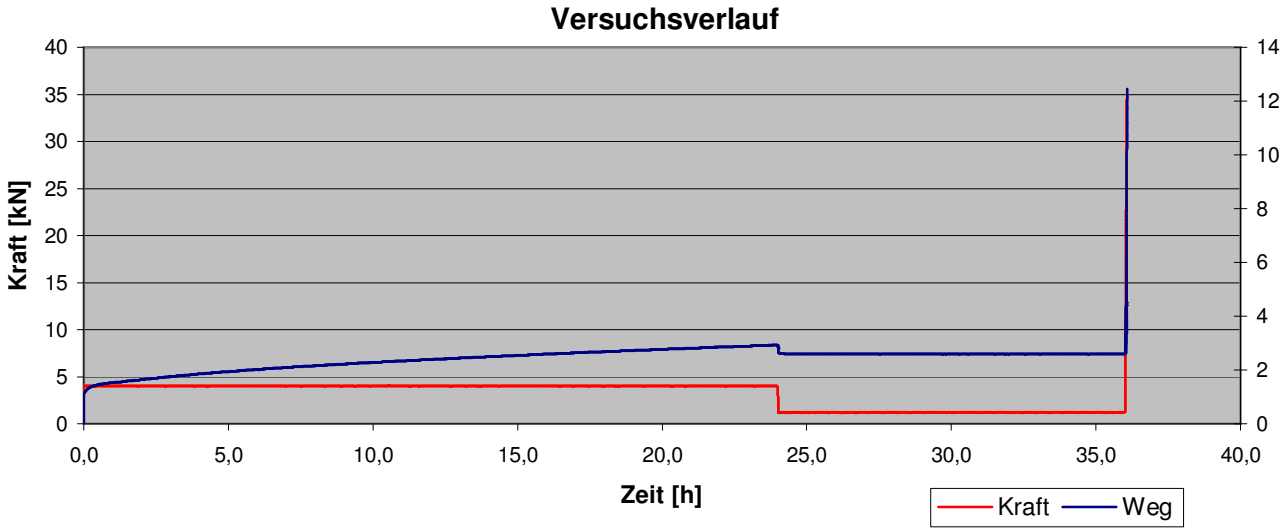
Kriechen15

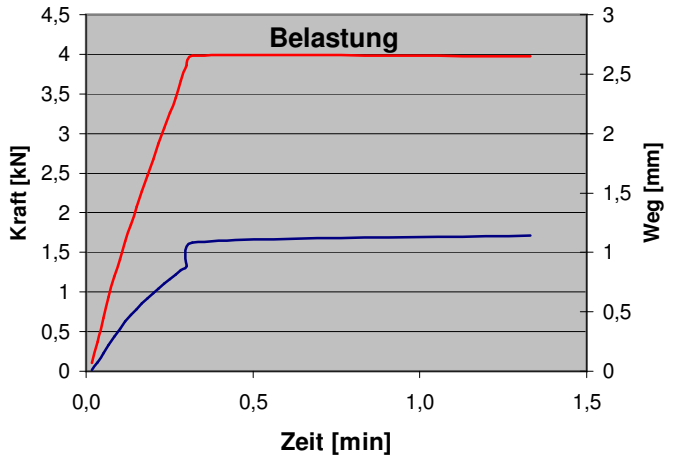
Höhe: 194 mm
Durchmesser: 100 mm
Fläche: 78,54 cm²
Volumen: 1523,67 cm³

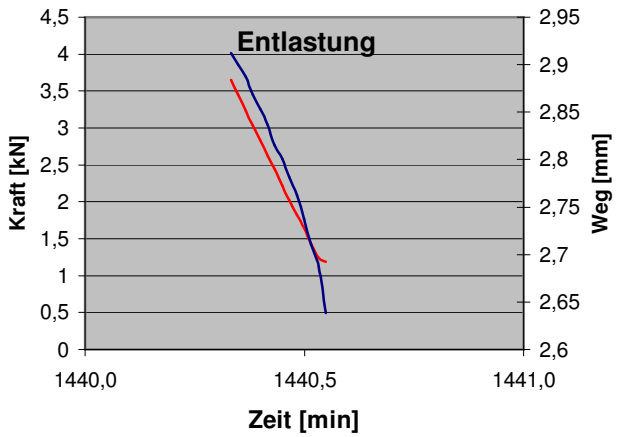
Temperatur: -5 °C

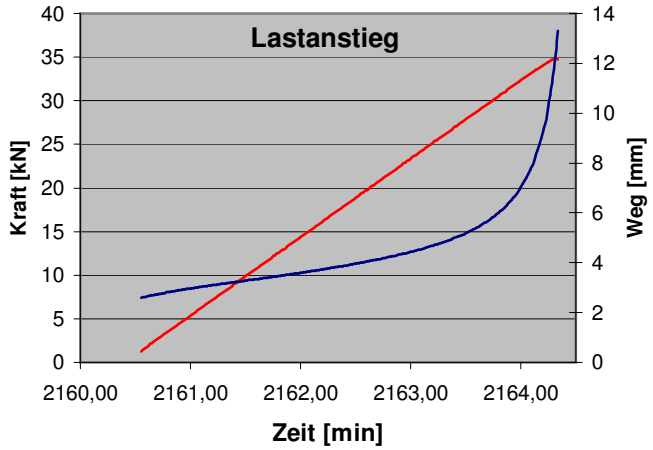
F_{max}= 34,83 kN
σ_{max} = 4,44 N/mm²
Weg bei F_{max} = 12,44 mm

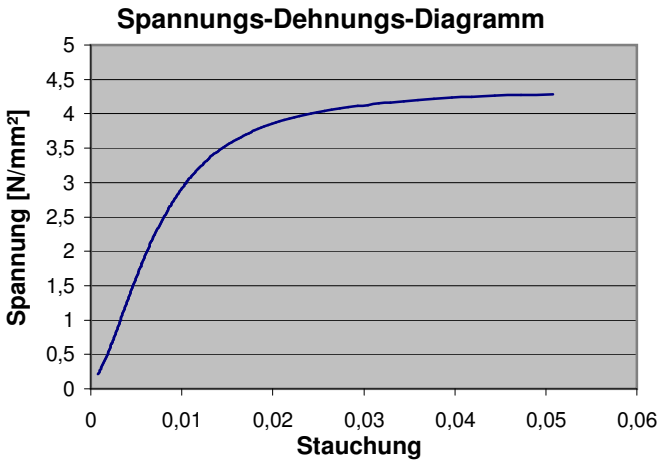
	Kraft	*Dauer*	*Änderung*		
Kriechphase	4,0 kN	24 h	2,92 mm	davon elastisch	1,079 mm
Entlastungsphase	1,2 kN	12 h	-0,33 mm	davon elastisch	-0,284 mm









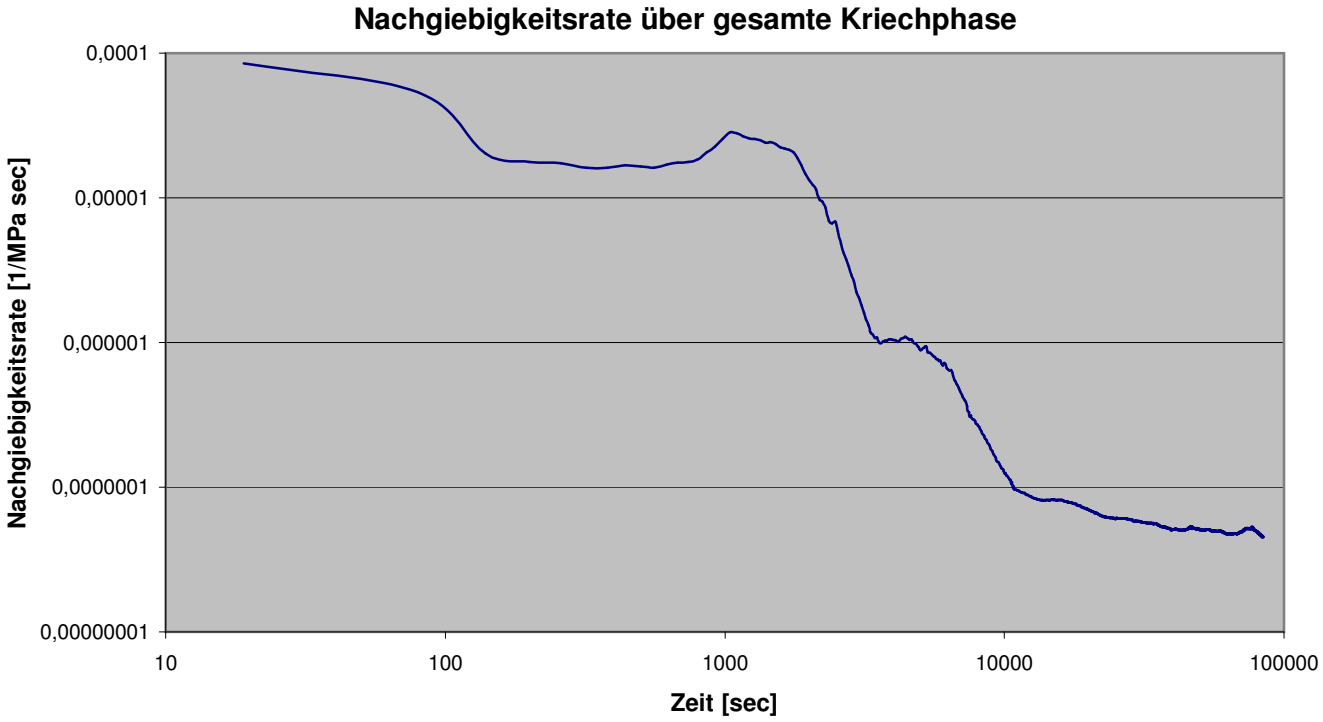


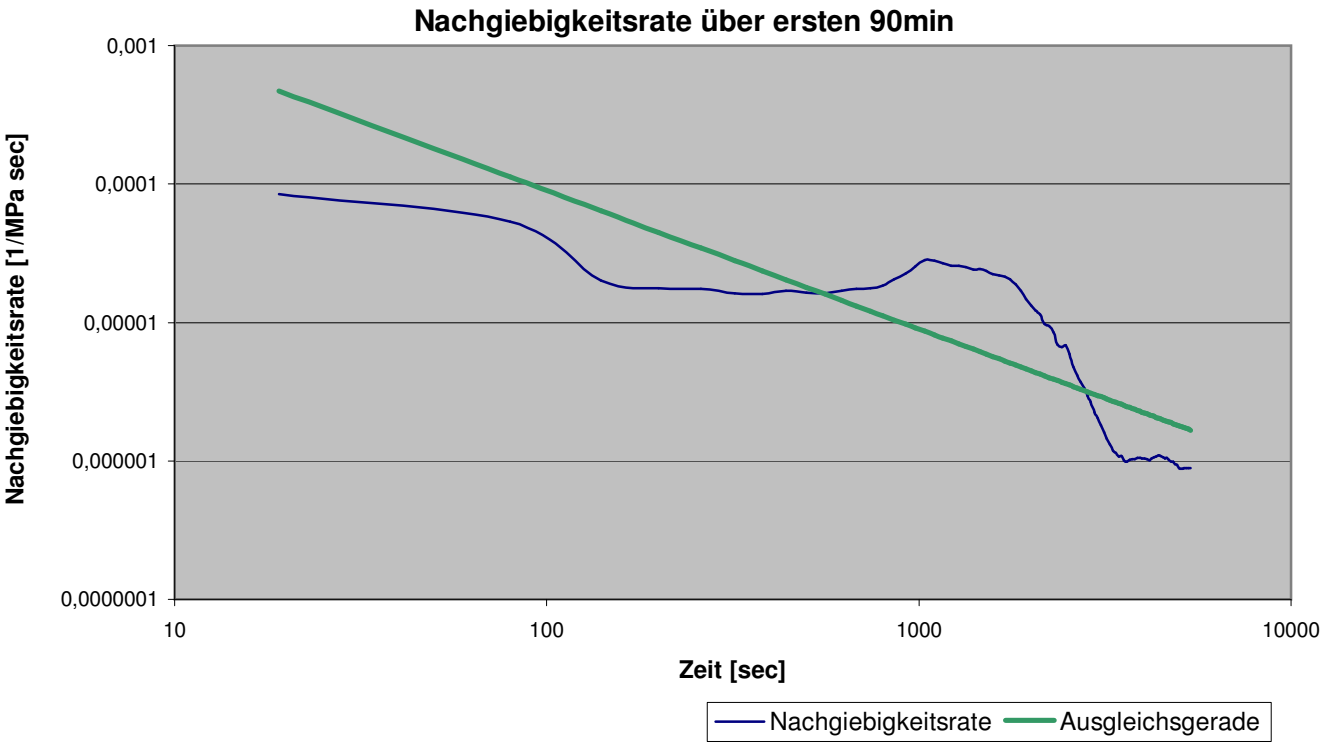
Anhang B: Ermittlung der Nachgiebigkeitsraten

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen1

Temperatur: -10 °C



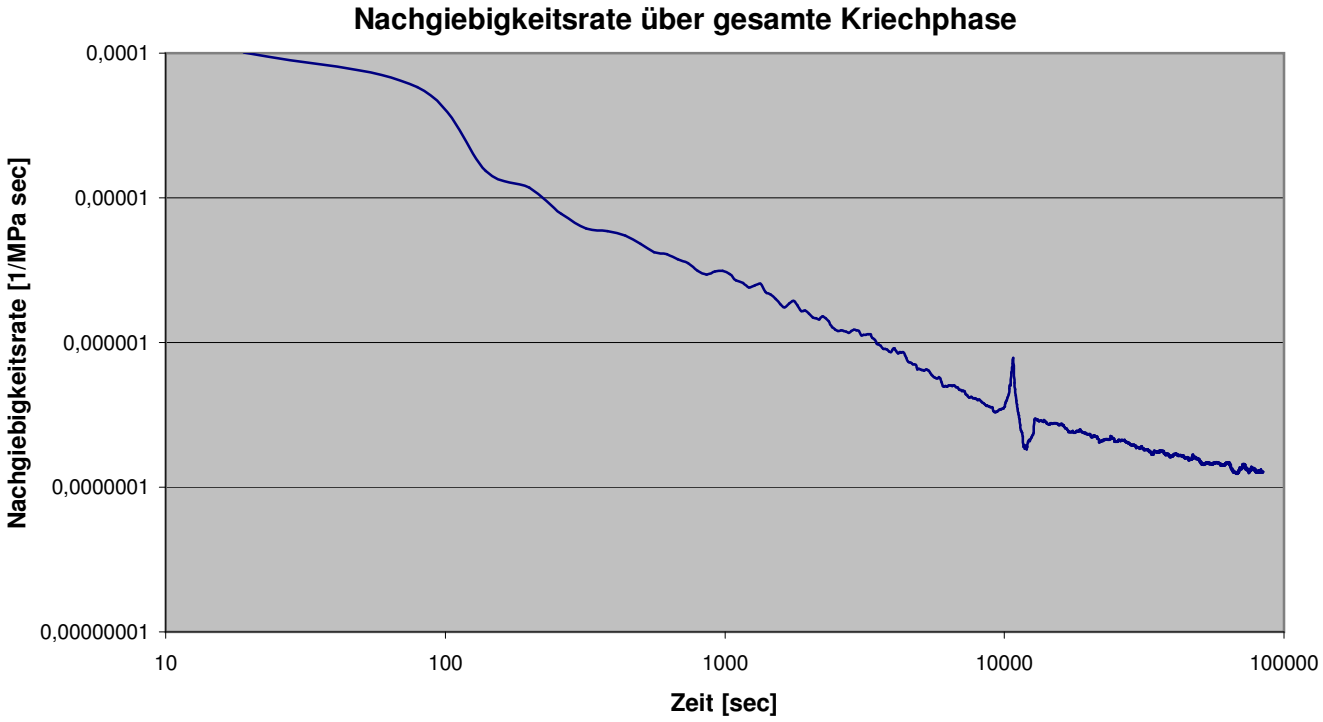


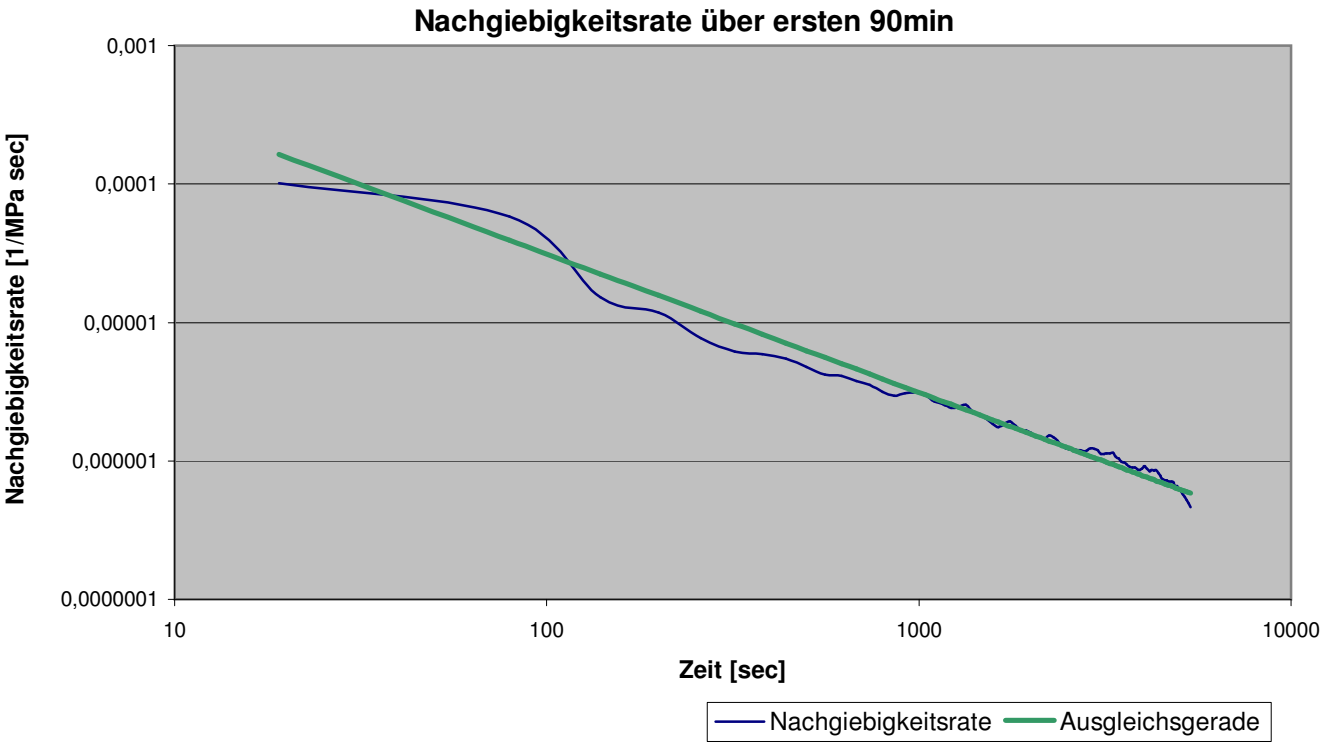
Kriechparameter:	H =	0,008958
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen2

Temperatur: -10 °C



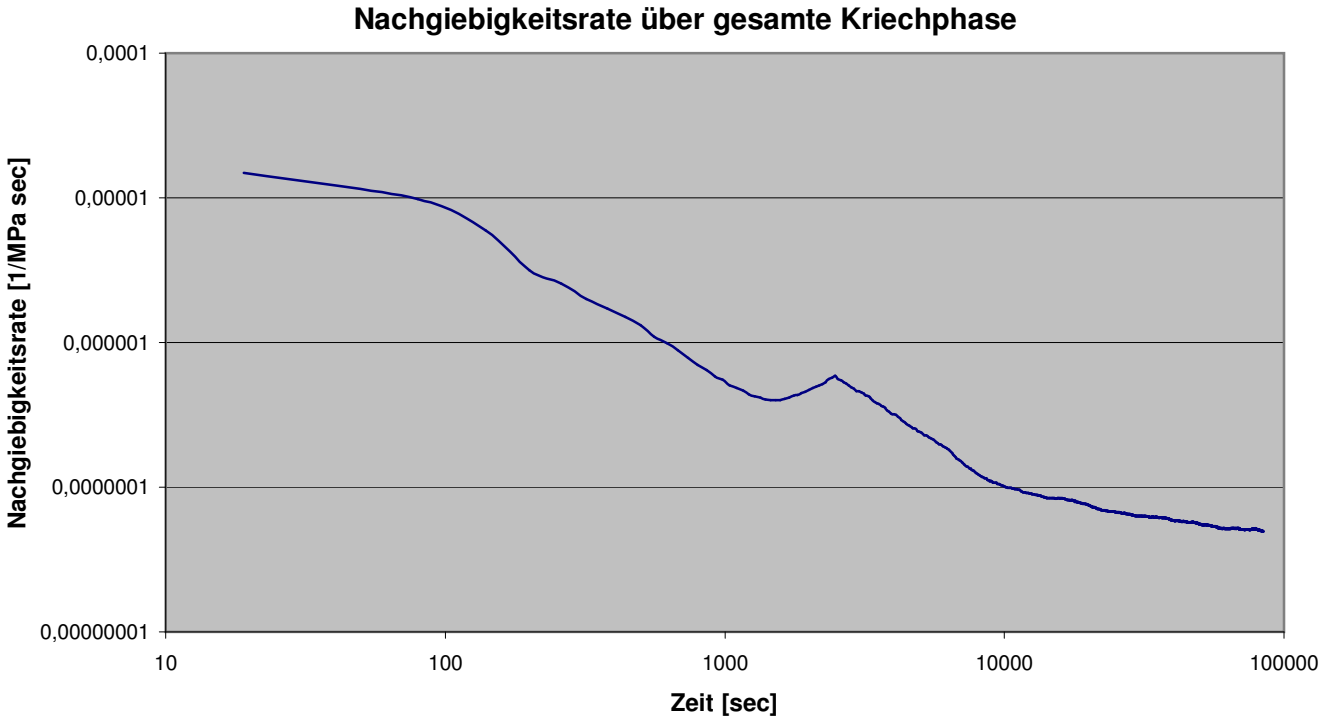


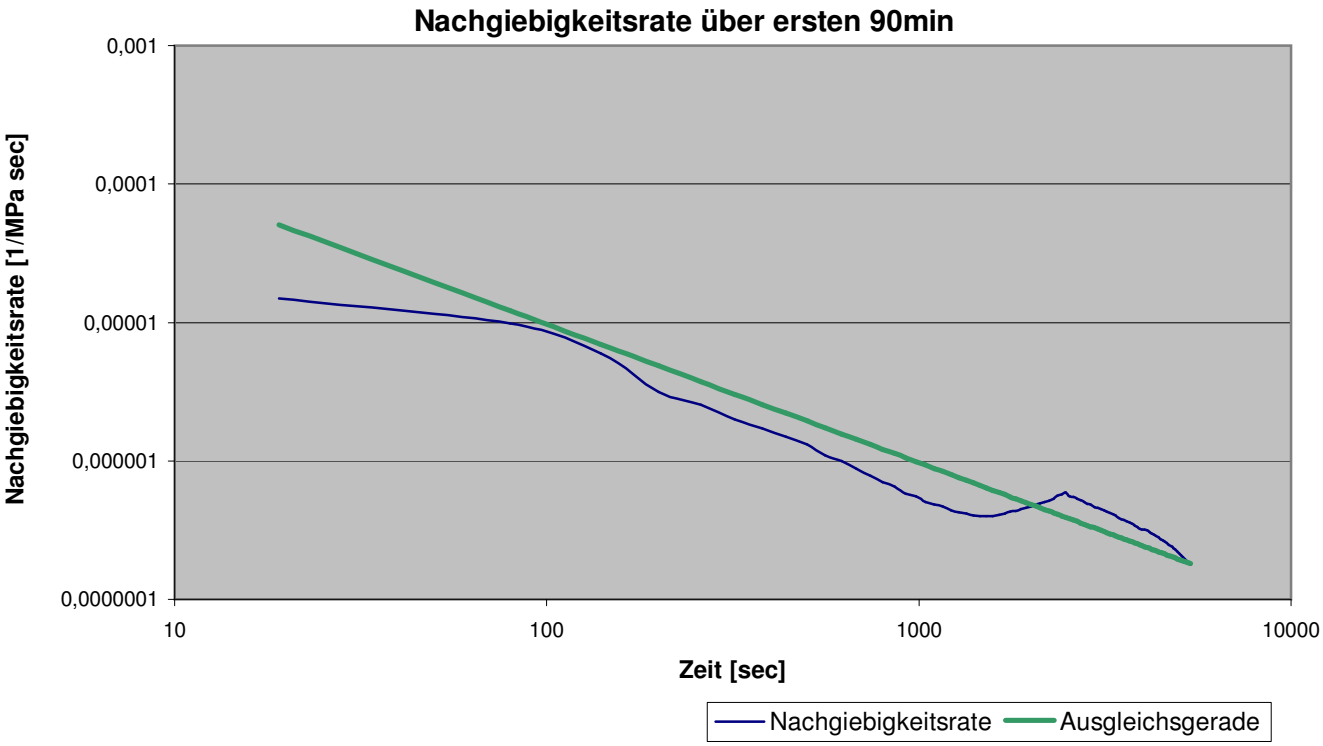
Kriechparameter:	H =	0,003123
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen3

Temperatur: -10 °C



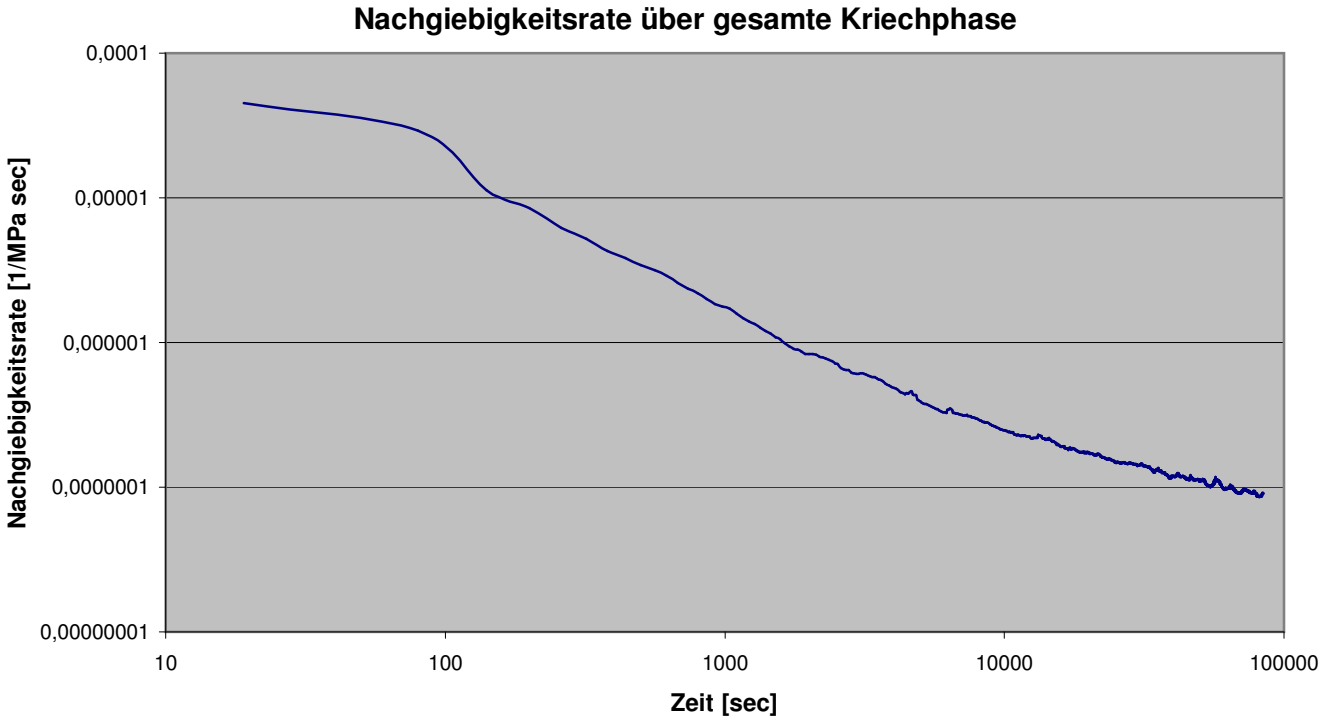


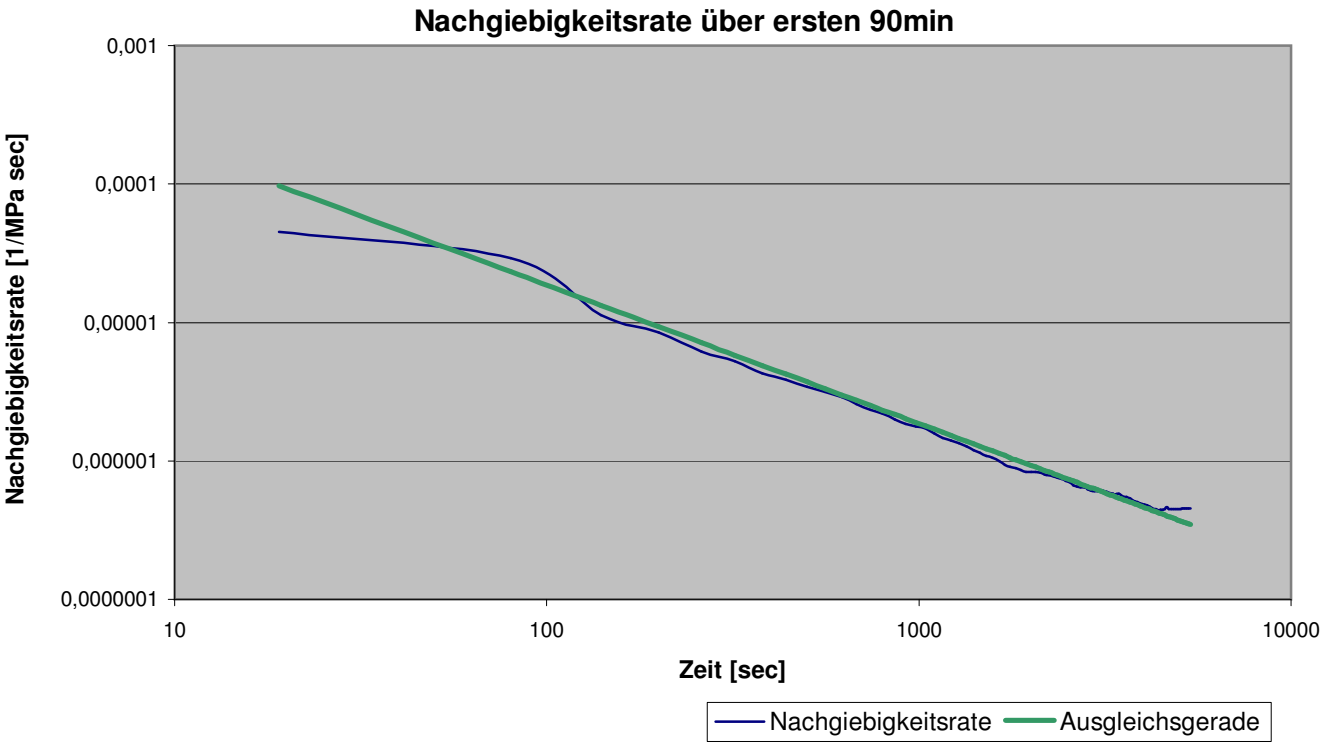
Kriechparameter:	H =	0,000970
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen4

Temperatur: -10 °C



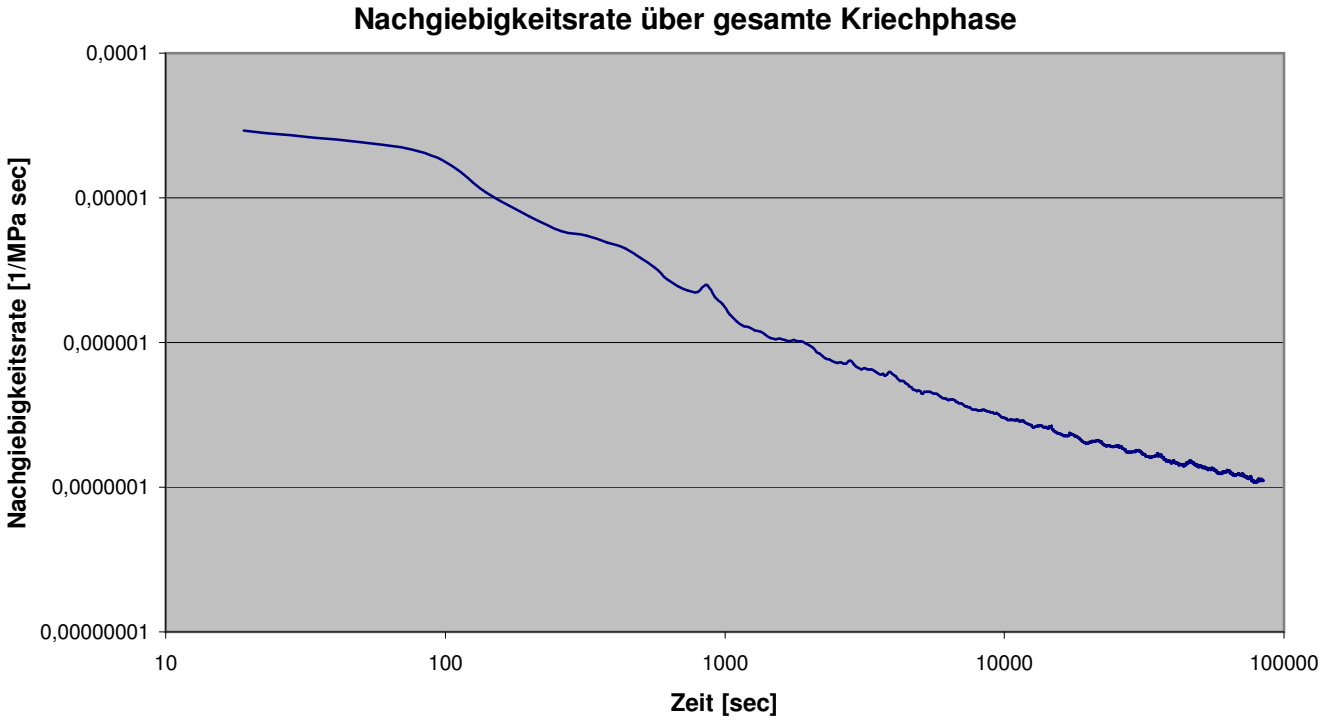


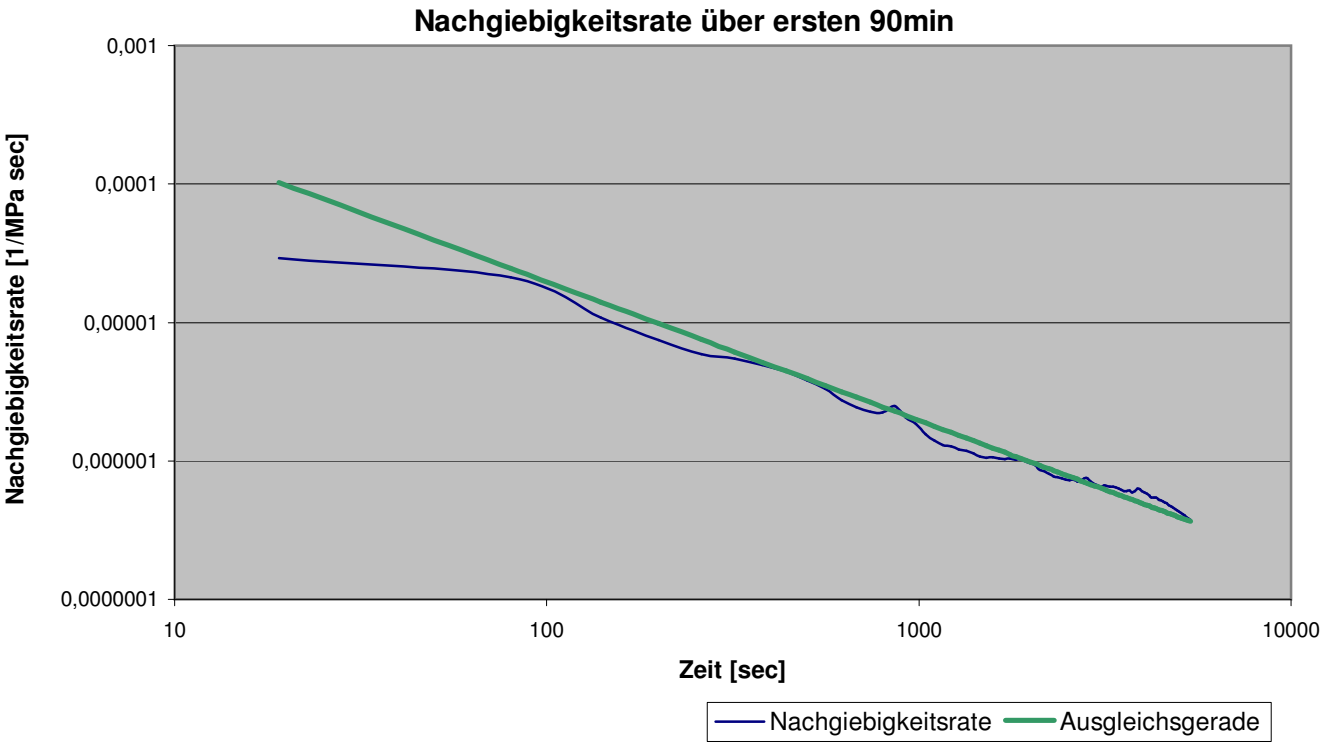
Kriechparameter:	H =	0,001859
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen5

Temperatur: -10 °C



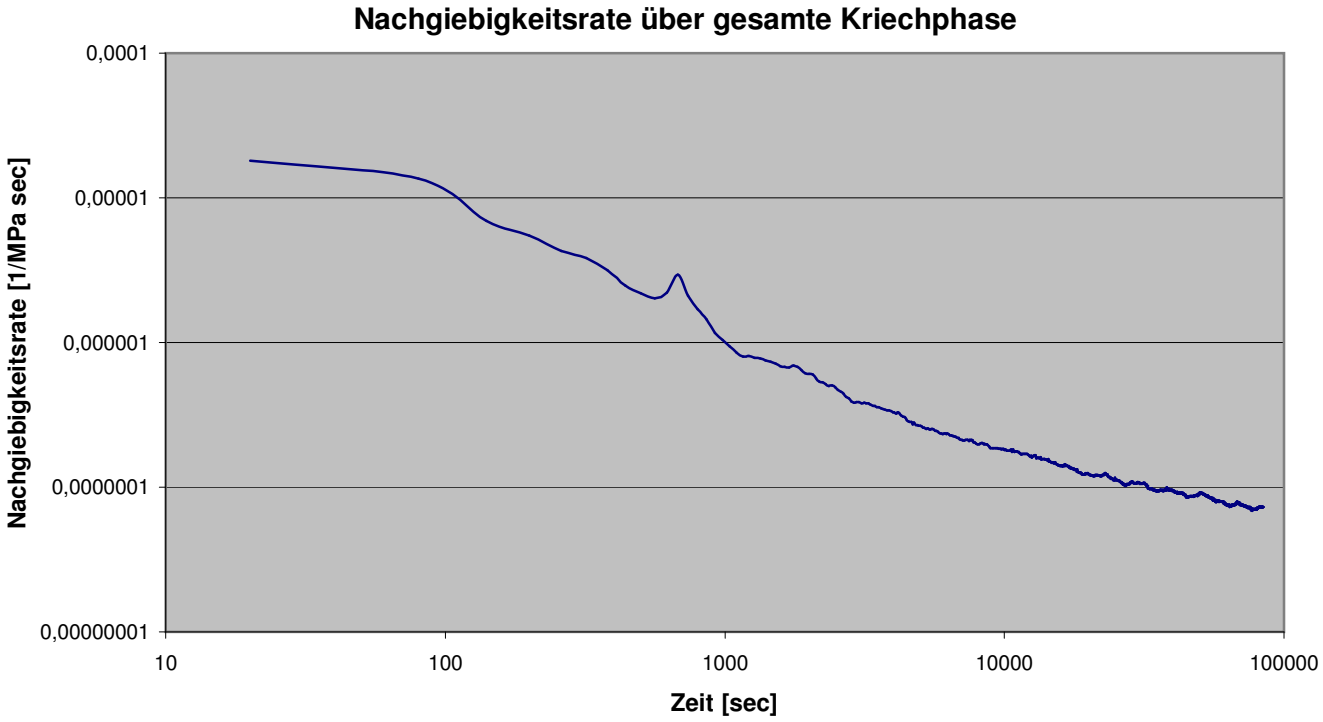


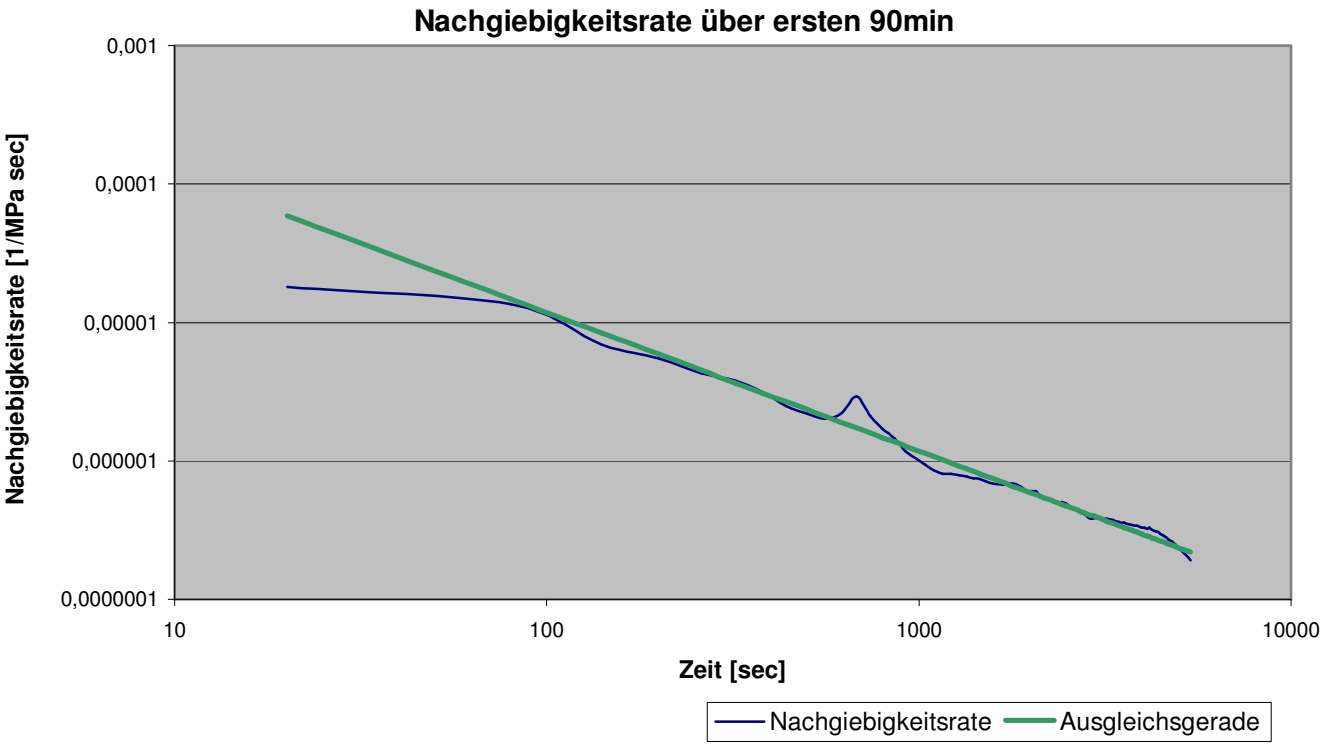
Kriechparameter:	H =	0,001959
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen6

Temperatur: -10 °C



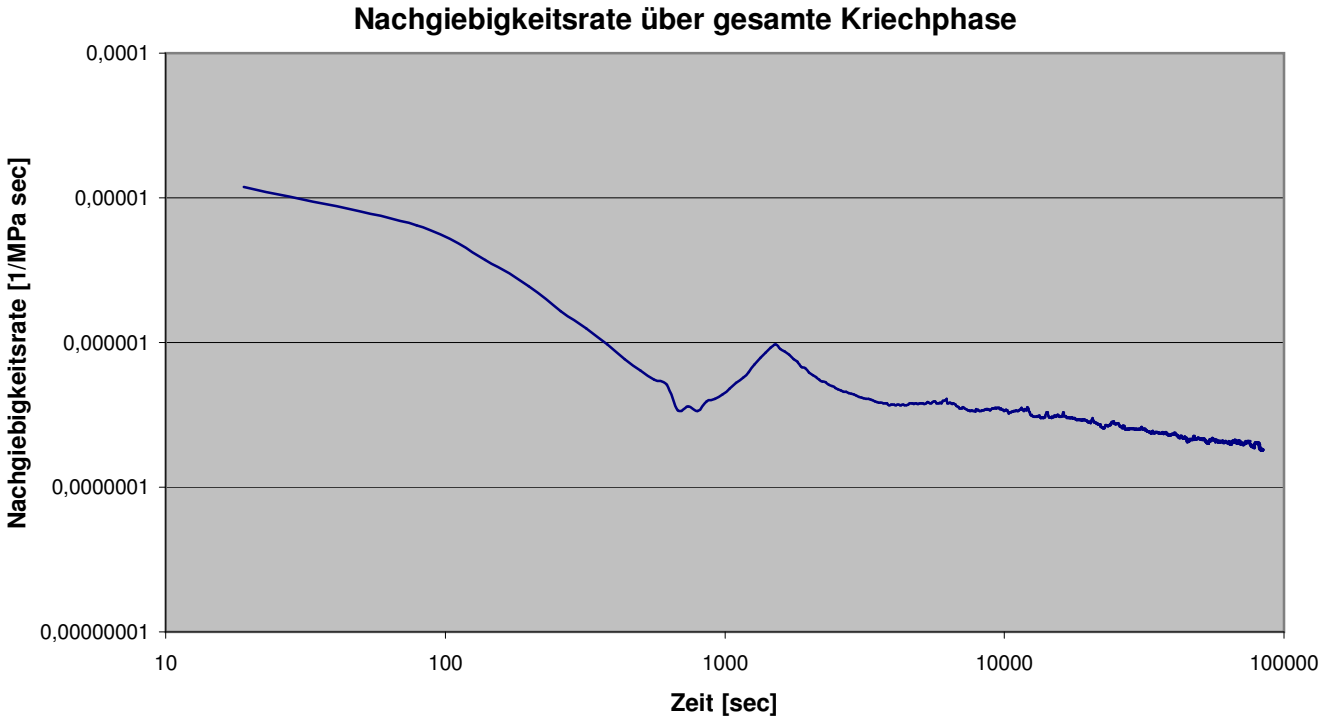


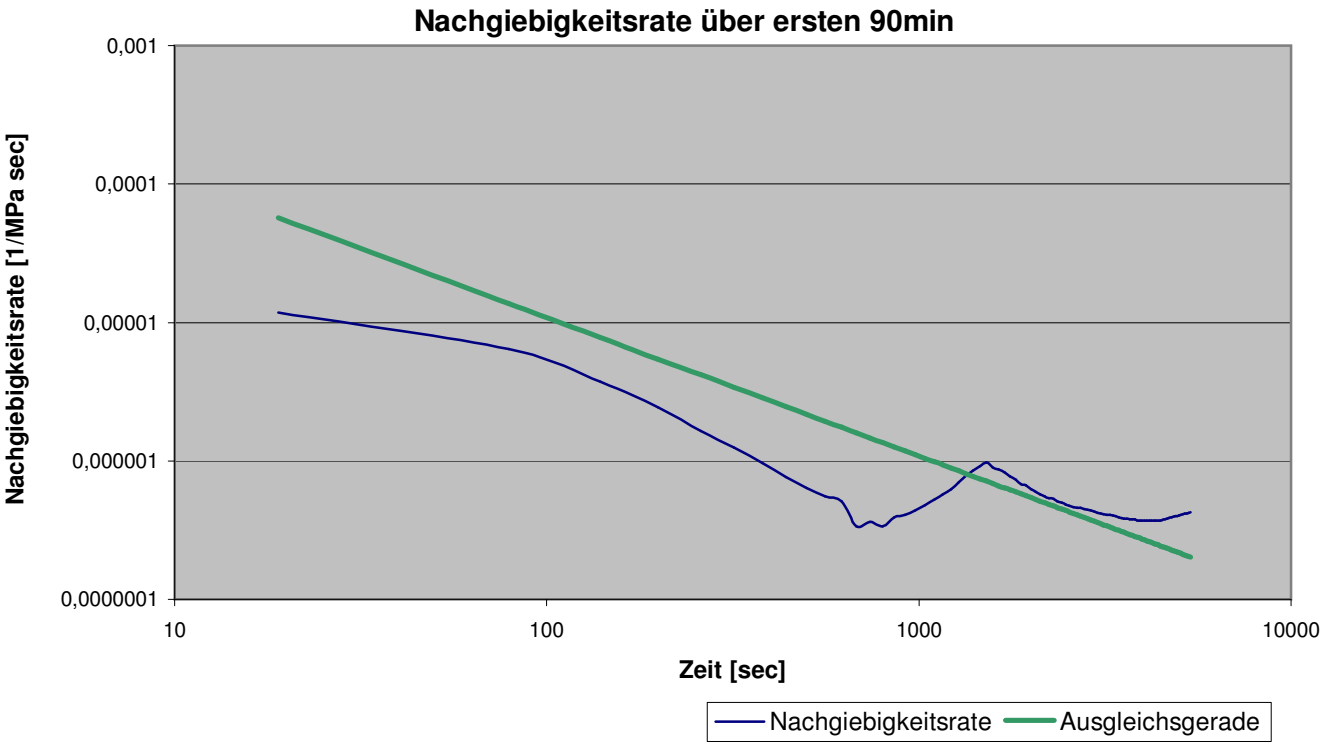
Kriechparameter:	H =	0,001176
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen7

Temperatur: -5 °C



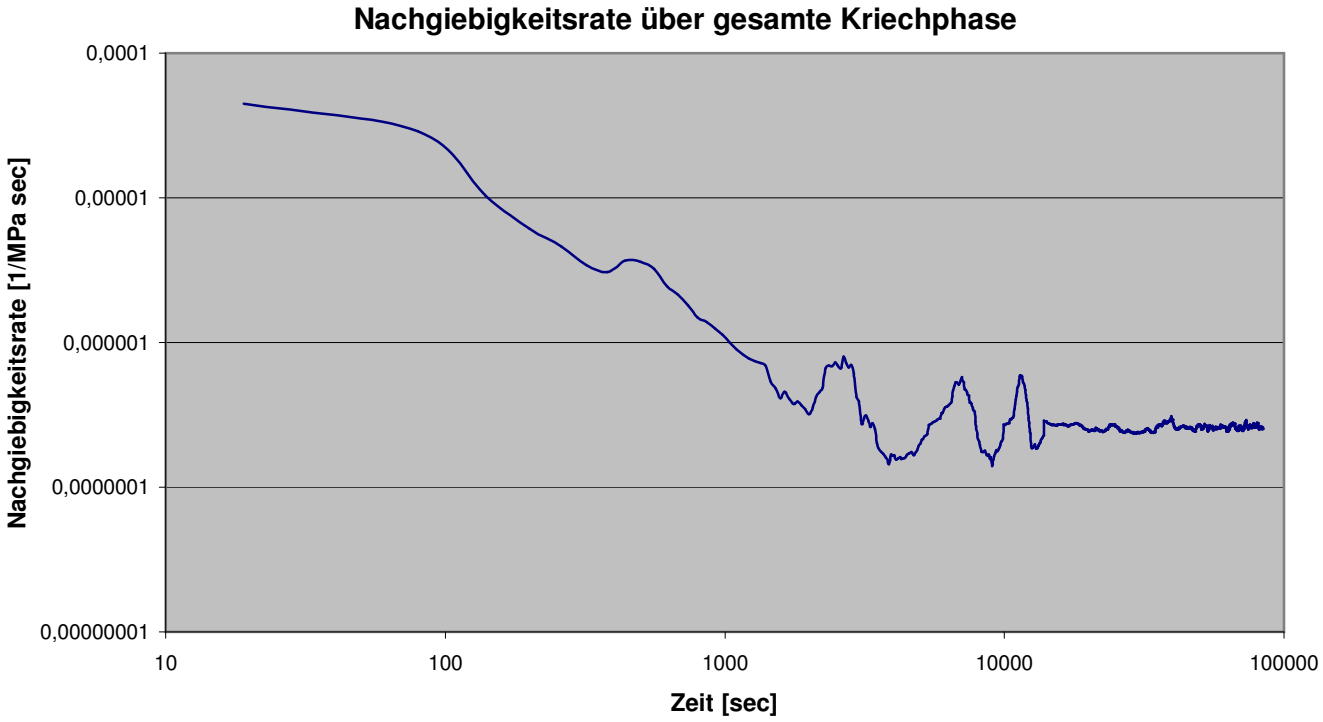


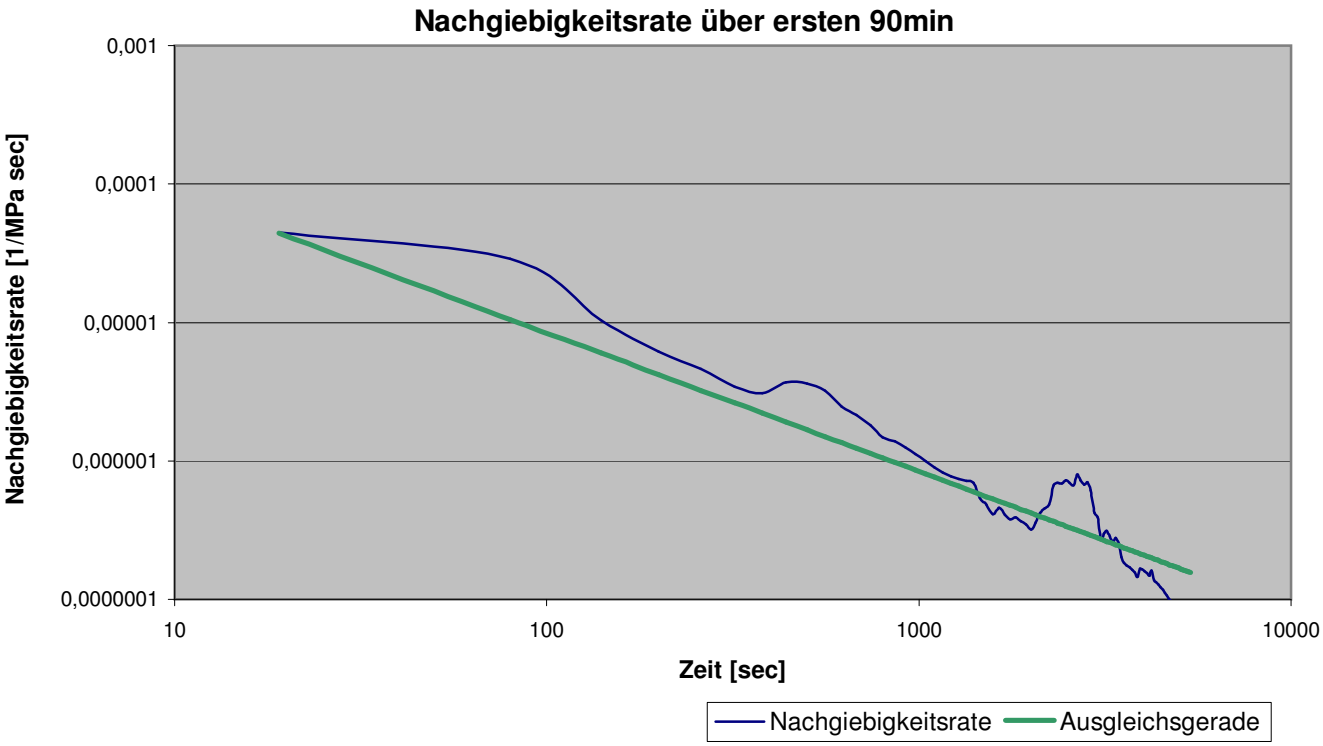
Kriechparameter: H = 0,001084
p = -1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen8

Temperatur: -5 °C



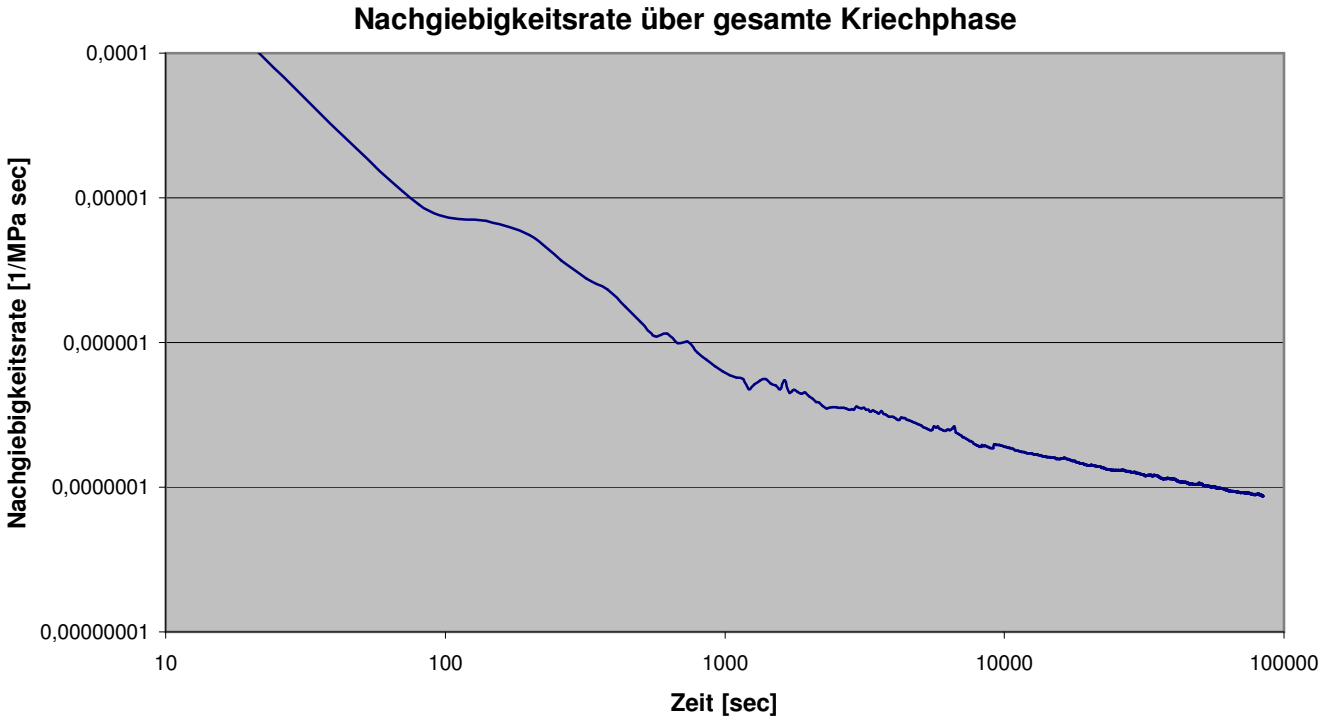


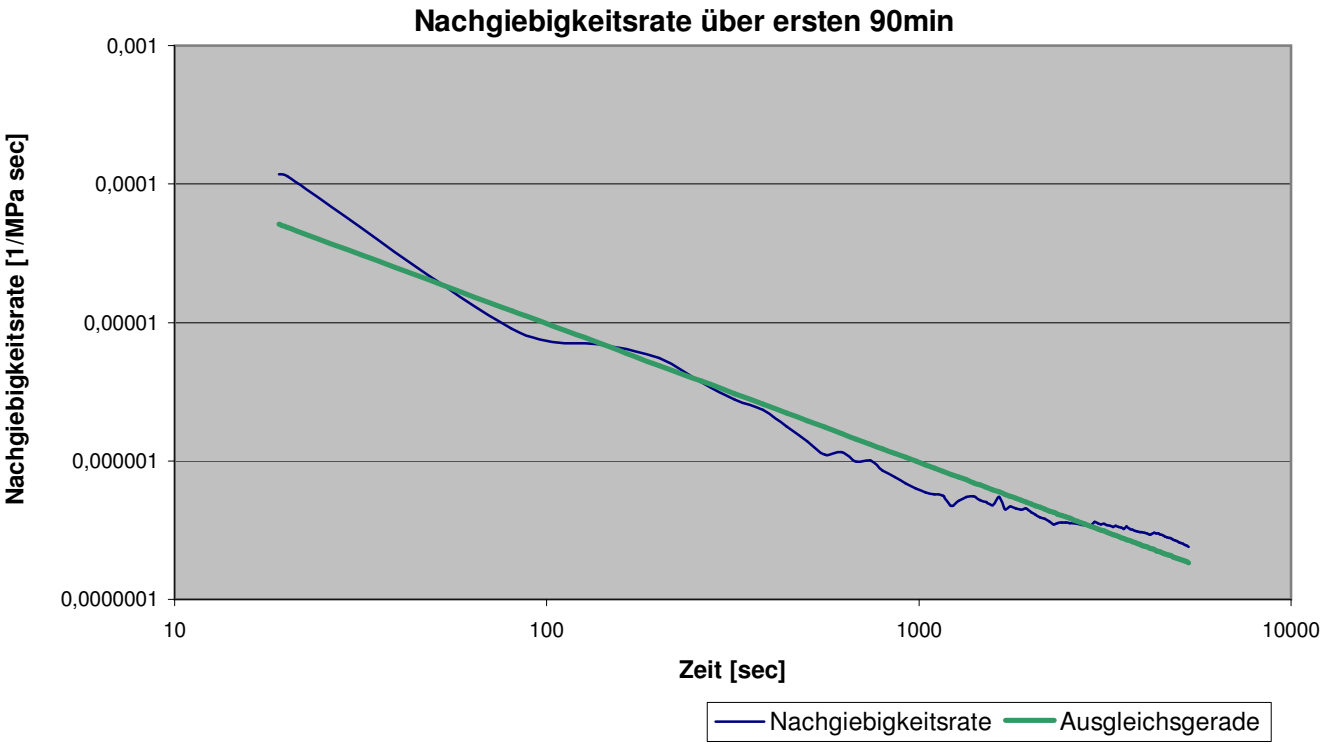
Kriechparameter:	H =	0,000839
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen9

Temperatur: -5 °C



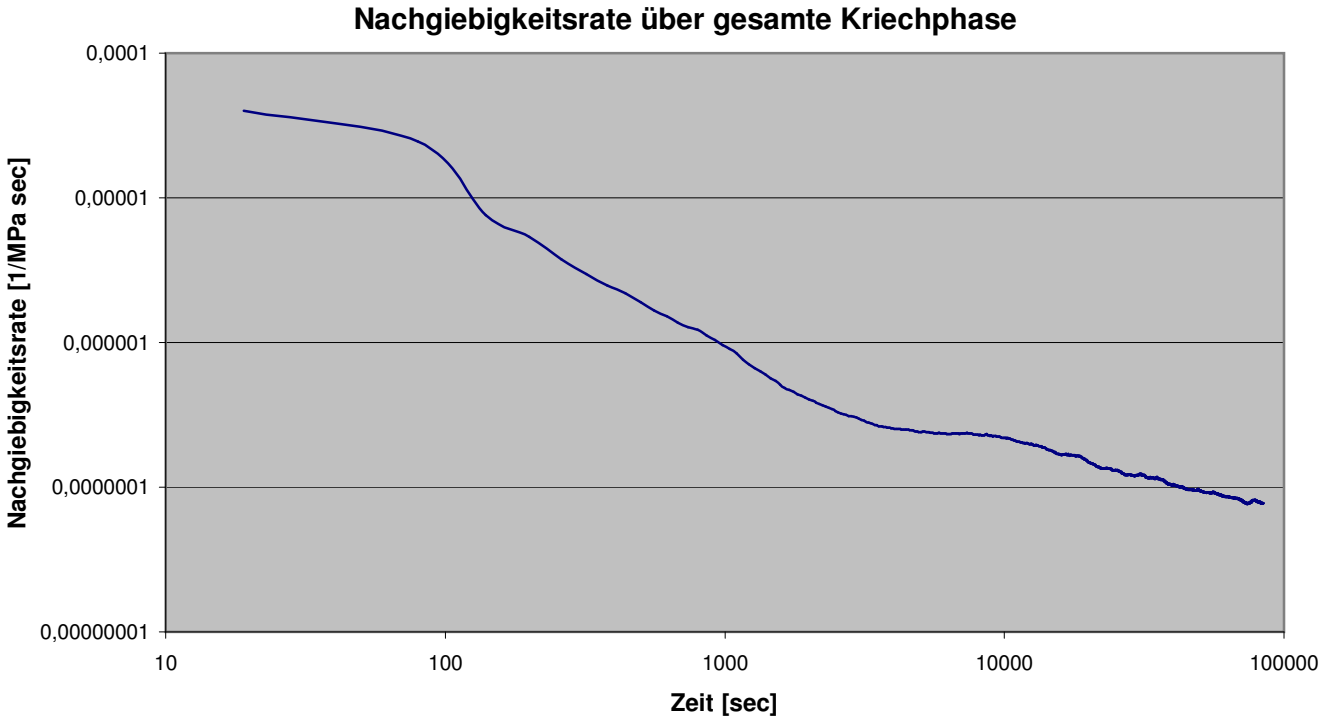


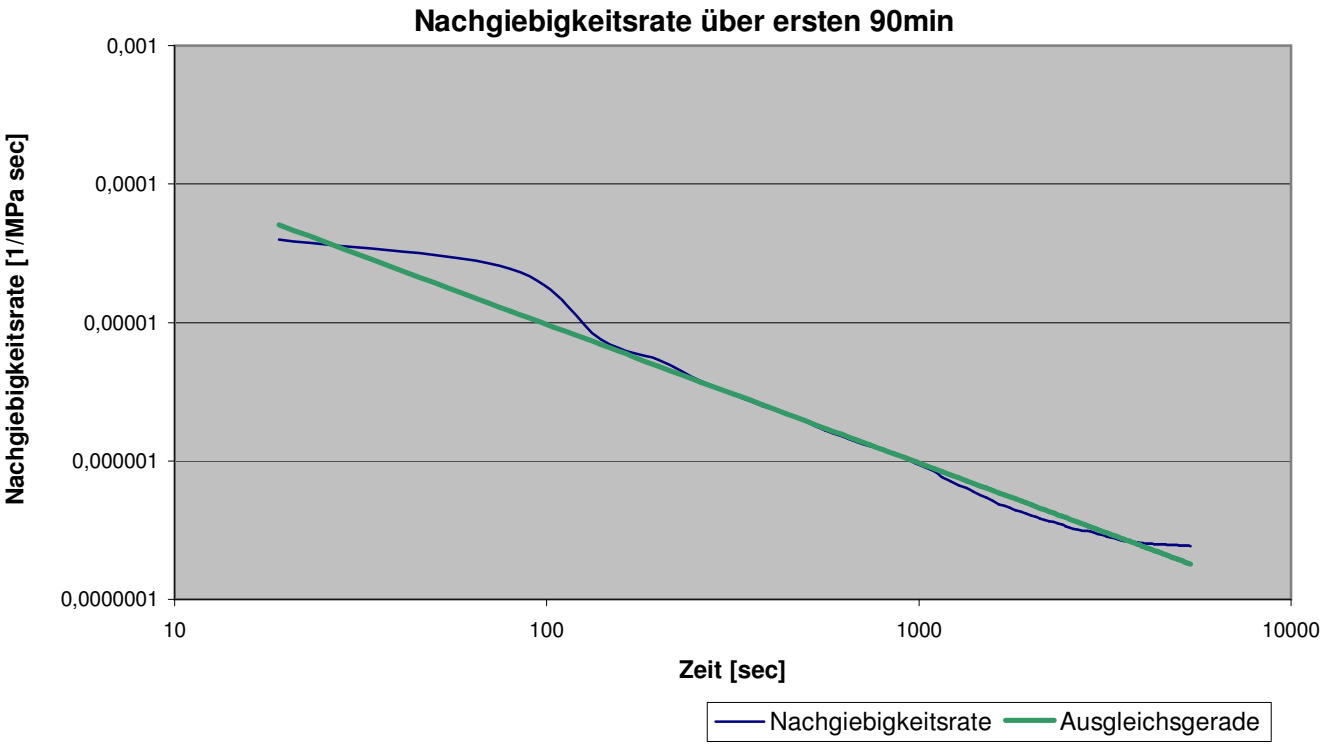
Kriechparameter:	H =	0,000977
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen10

Temperatur: -5 °C



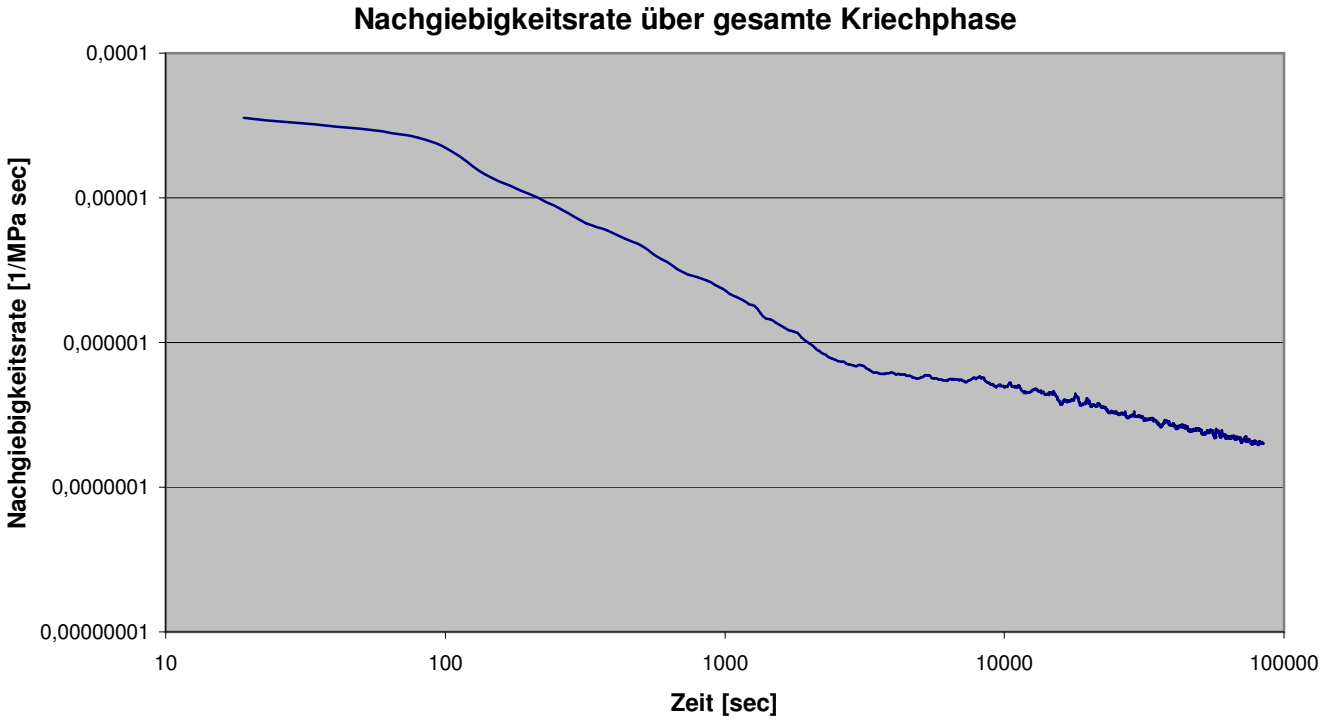


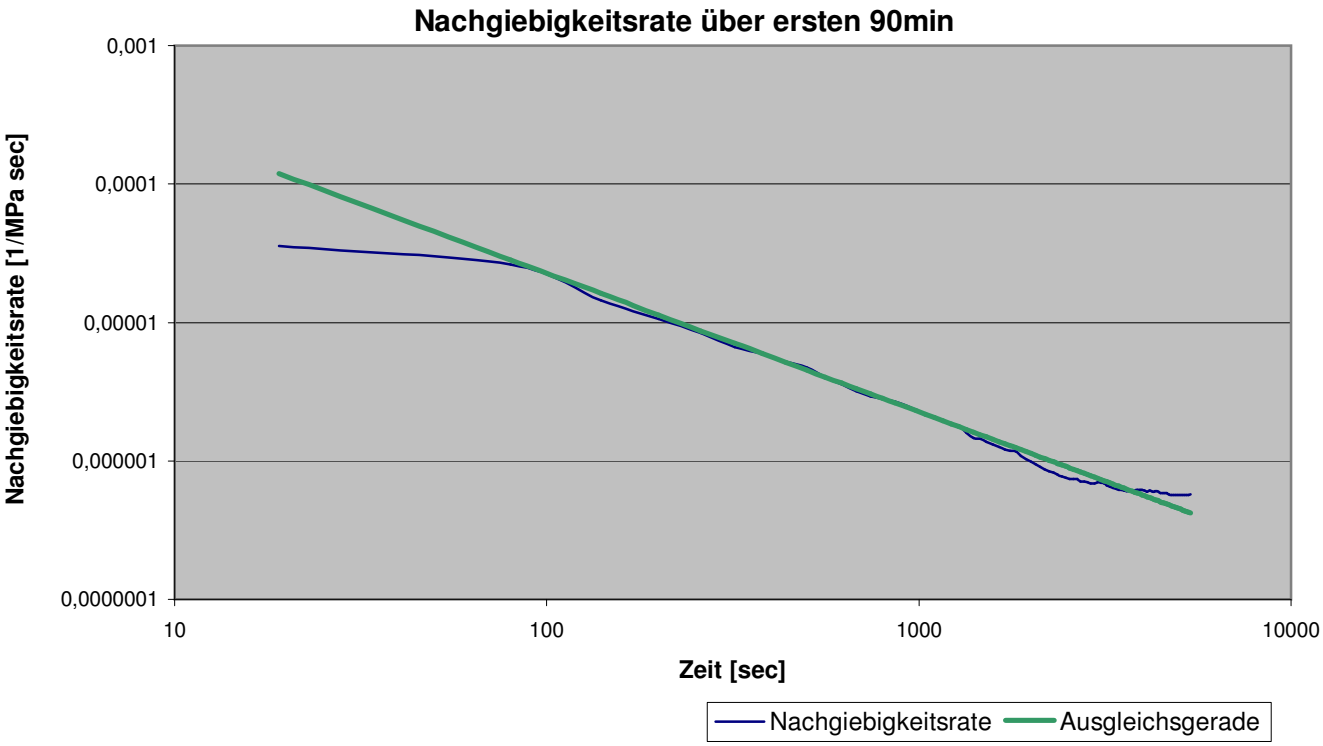
Kriechparameter:	H =	0,000965
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen11

Temperatur: -5 °C



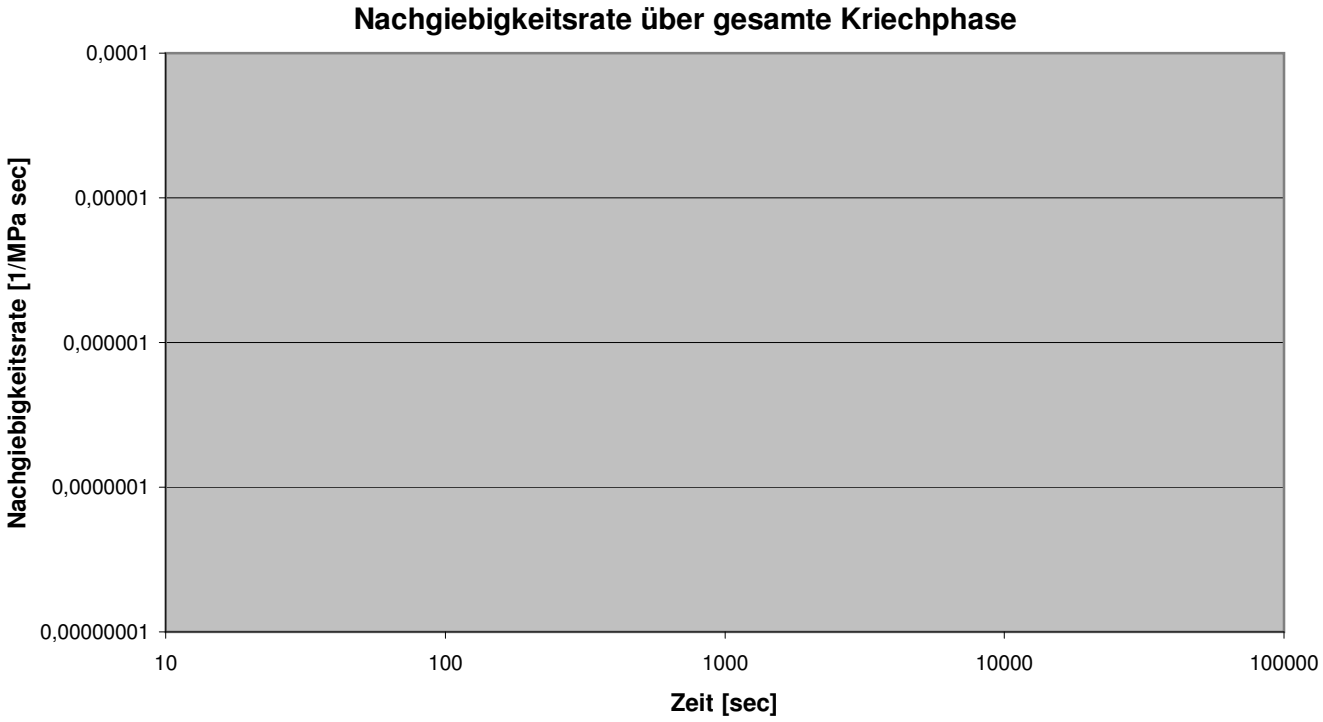


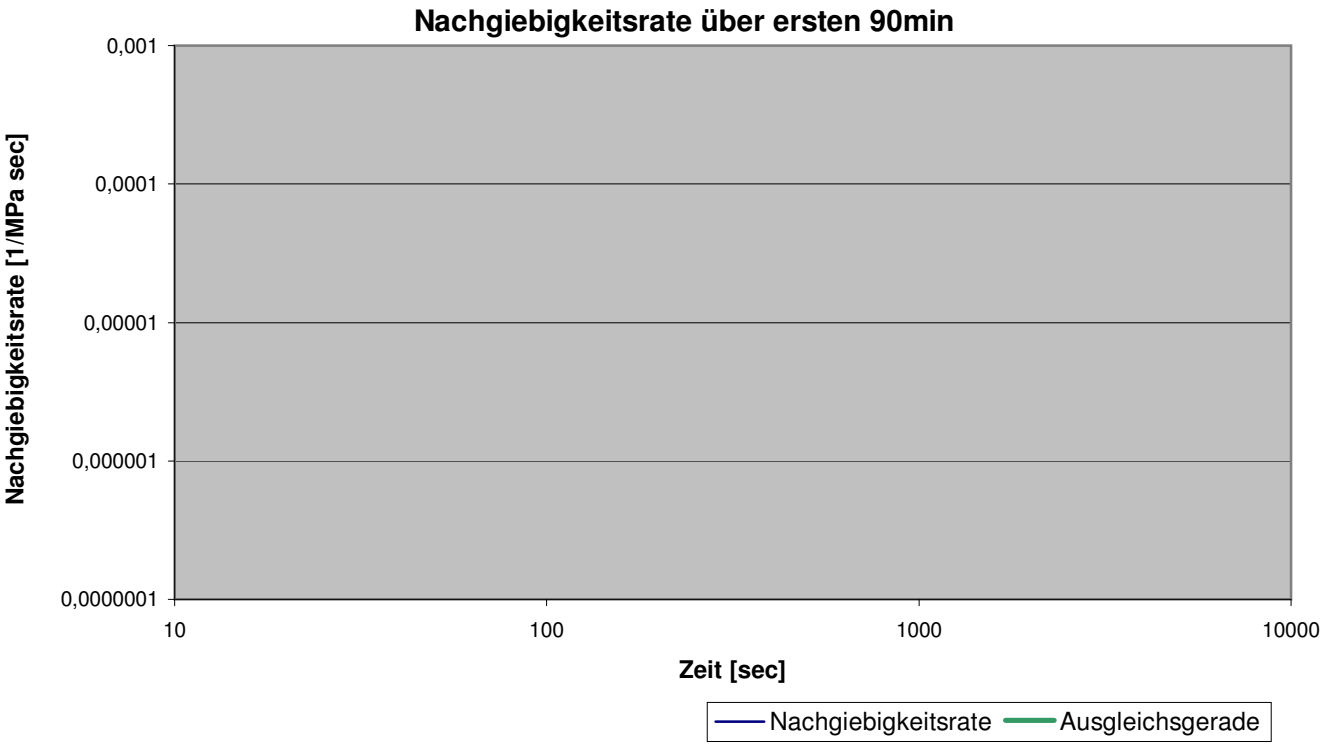
Kriechparameter:	H =	0,002261
	p =	-1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen12

Temperatur: -



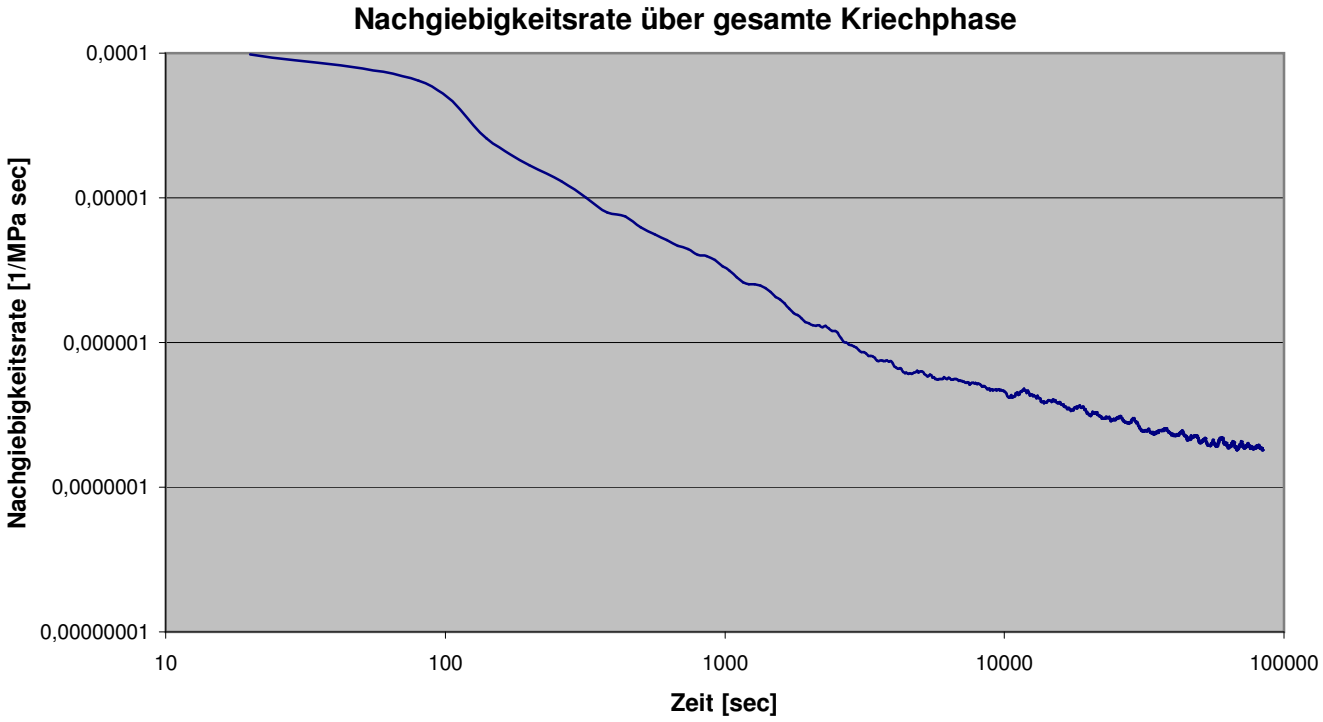


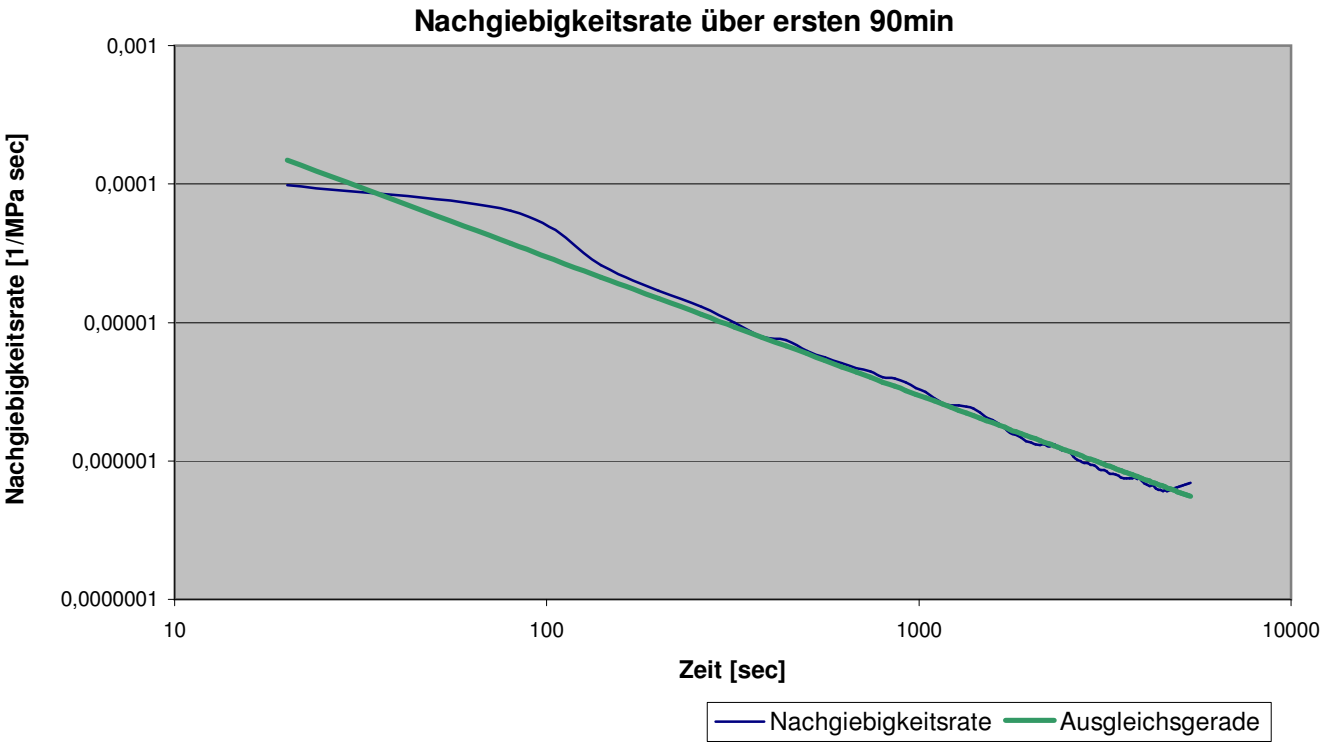
Kriechparameter: H = -
p = -

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen13

Temperatur: -5 °C



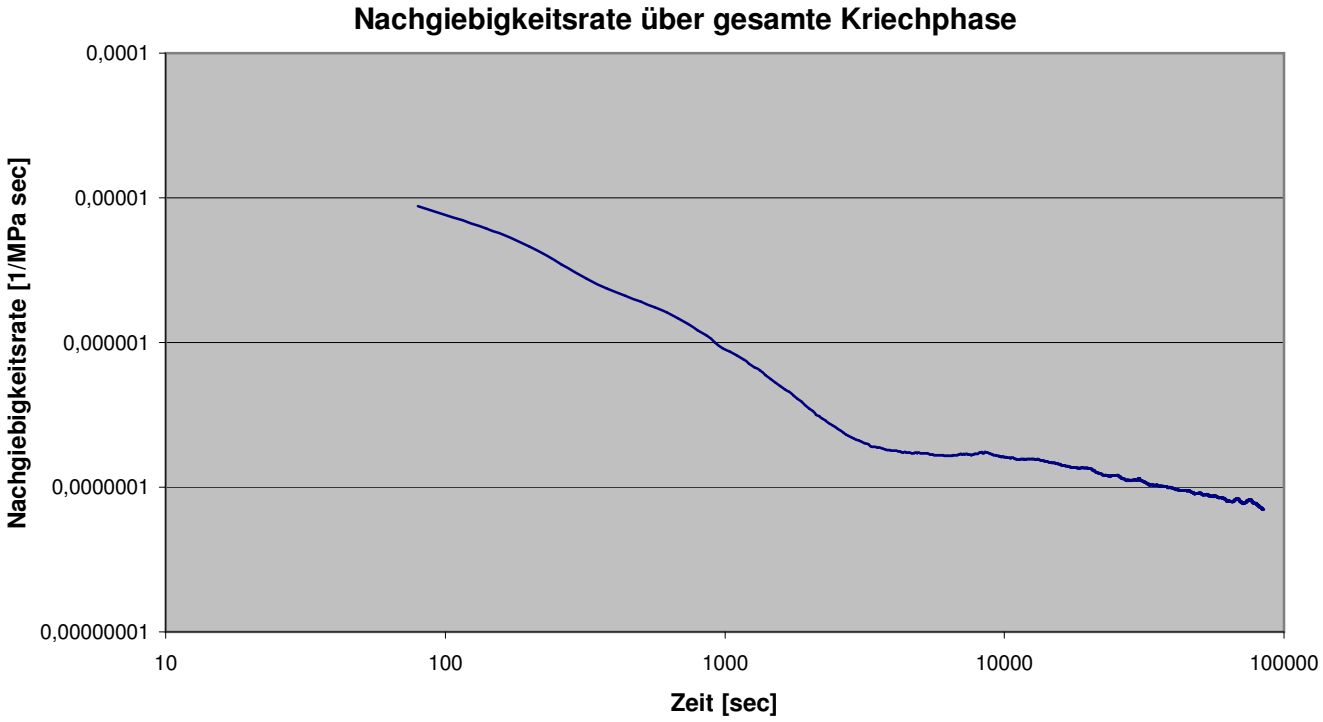


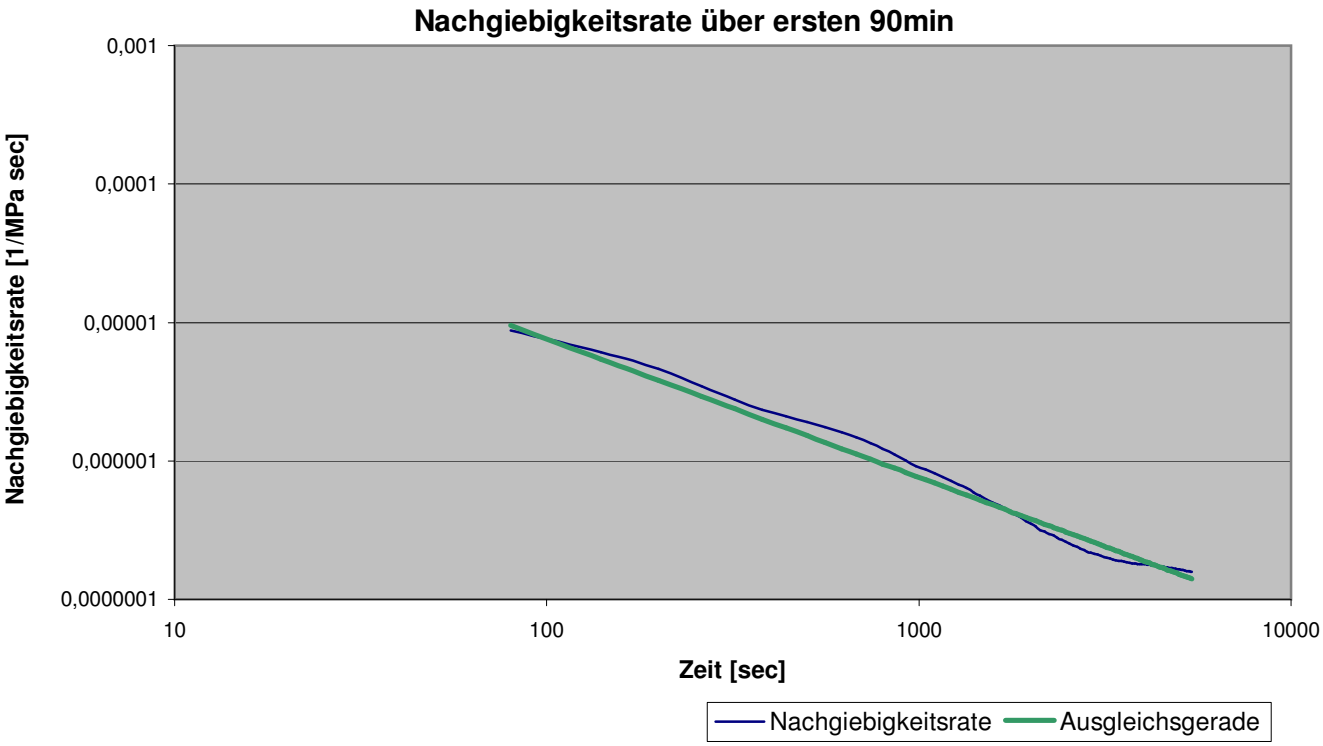
Kriechparameter: H = 0,002971
p = -1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen14

Temperatur: -5 °C



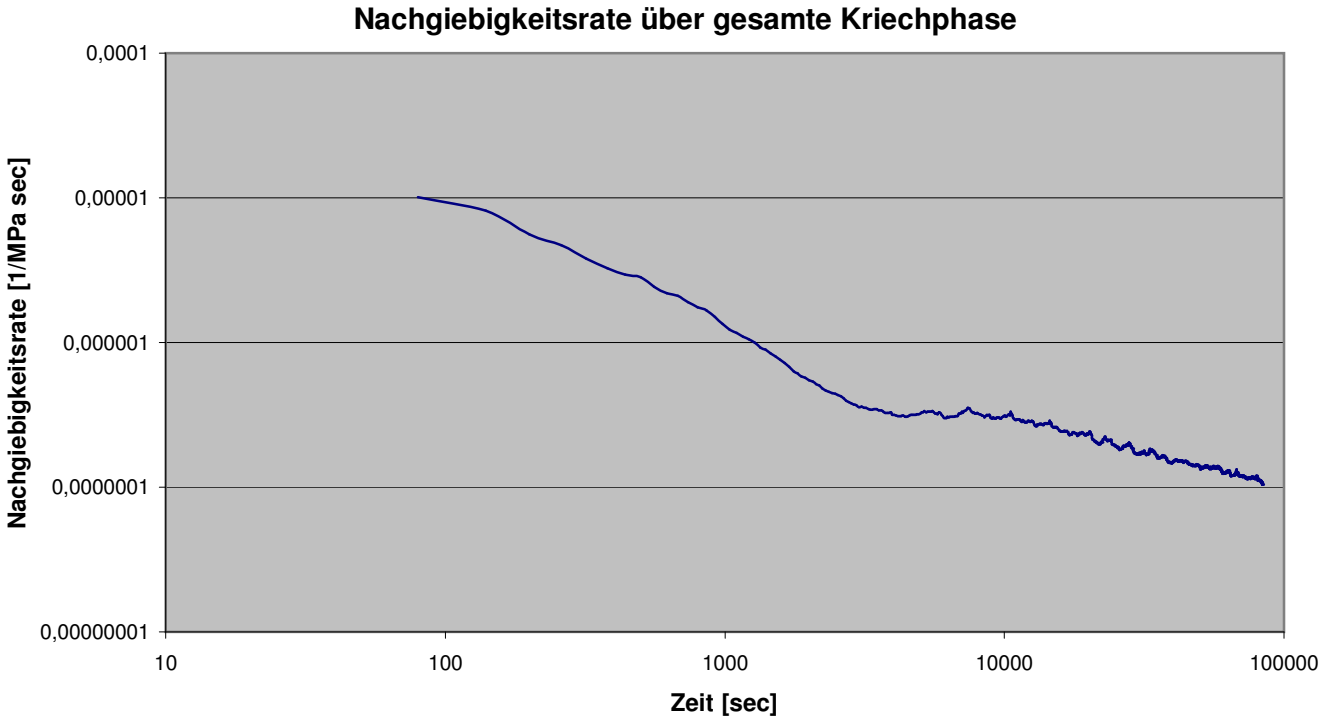


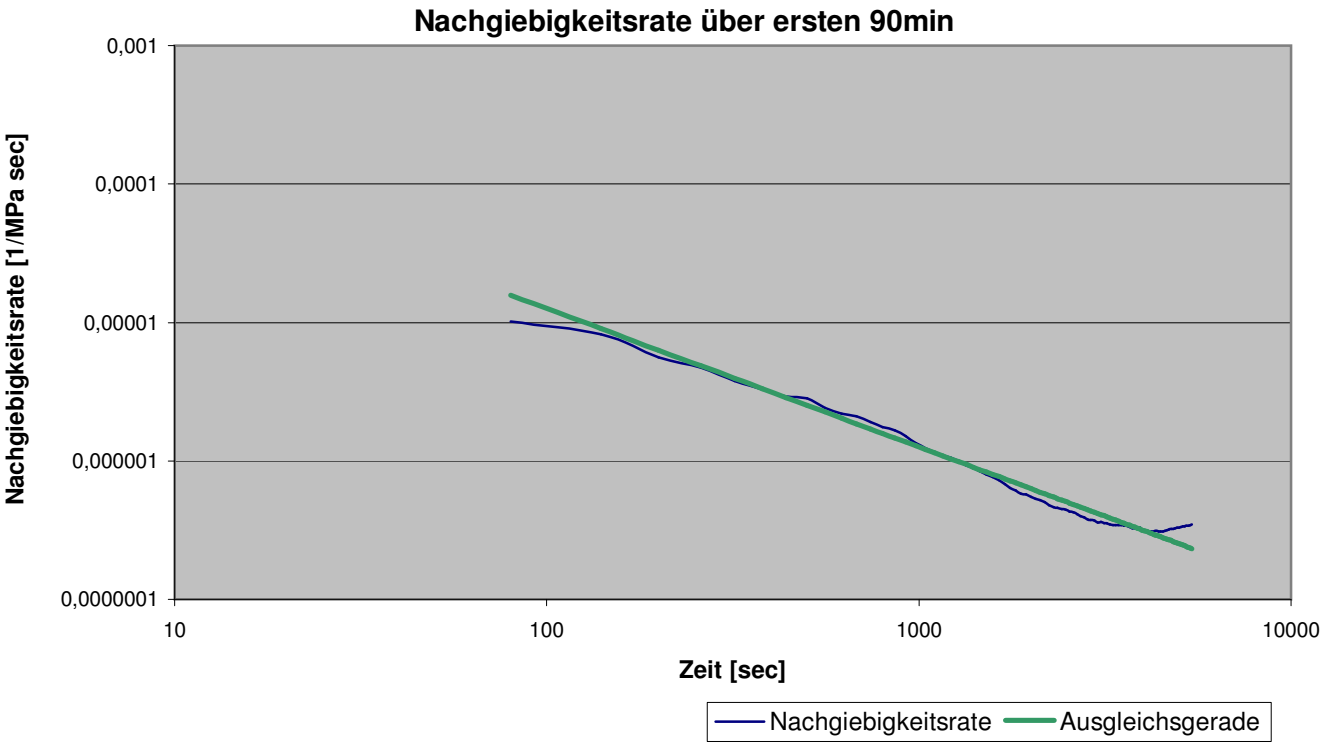
Kriechparameter: H = 0,000761
p = -1,0000

V E R S U C H S D A T E N B L A T T - Nachgiebigkeit

Kriechen15

Temperatur: -5 °C





Kriechparameter: H = 0,001261
p = -1,0000

Anhang C: Analytische Lösung für die Kriechkurve

Ausgehend von logarithmischem Kriechen mit einer Kriechnachgiebigkeit von $J(t-\tau) = J_a \ \ln\left[1+(t-\tau)/\tau_0\right]$ kann mittels des Konvolutionsintegrals $\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau)\frac{\partial\sigma}{\partial\tau}d\tau$ die Verformungsgeschichte für die den Versuchen zu Grunde gelegte Belastungsgeschichte ermittelt werden:

Belastungsphase ($t_0 \le t \le t_1$):

$$\varepsilon(t) = \dot{\sigma} J_a \left[\left(-t-t_0\right) + \left(t-t_0+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_0+\tau_0}{\tau_0}\right)\right] + \dot{\sigma} t / E$$

Lasthaltephase - Kriechen ($t_1 \le t \le t_2$):

$$\varepsilon(t) = \underbrace{\dot{\sigma} J_a \left\{ \left[-t_1 - \left(t-t_1+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_1+\tau_0}{\tau_0}\right)\right] - \left[-t_0 - \left(t-t_0+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_0+\tau_0}{\tau_0}\right)\right]\right\} + \dot{\sigma} t_1 / E}_{\Delta_1}$$

Entlastungsphase ($t_2 \le t \le t_3$):

$$\varepsilon(t) = \underbrace{\Delta_1 + \dot{\sigma} J_r \left[\left(-t-t_2\right) + \left(t-t_2+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_2+\tau_0}{\tau_0}\right)\right] - \dot{\sigma}\left(t-t_2\right)/E}_{\Delta_2}$$

Lasthaltephase – Rückkriechen ($t_3 \le t \le t_4$):

$$\varepsilon(t) = \underbrace{\Delta_2 + \dot{\sigma} J_r \left[\left(-t-t_3\right) + \left(t-t_3+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_3+\tau_0}{\tau_0}\right)\right]}_{\Delta_3}$$

Belastungsphase - Druckversuch ($t_4 \le t$)

$$\varepsilon(t) = \Delta_3 + \dot{\sigma} J_a \left[\left(-t-t_4\right) + \left(t-t_4+\tau_0\right) \ \ln\left(\frac{t-t_4+\tau_0}{\tau_0}\right)\right] + \dot{\sigma}\left(t-t_4\right)/E$$

In den hergeleiteten Formeln wurde die Be- und Entlastungsgeschwindigkeit immer konstant mit $\dot{\sigma}$ angesetzt.