

Markus Sitzwohl

Optimierung der Lining Stress Controller durch zementgebundene poröse Füllung

Masterarbeit

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Begutachter:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert
Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Dr. Nedim Radončić
Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Graz, September 2011

Danksagung

An erster Stelle danke ich Prof. Dr. Wulf Schubert. Diese Arbeit wurde inspiriert und geleitet nach seinen Ideen. Seine Fachkompetenz und praktische Erfahrung haben diese Arbeit entscheidend beeinflusst.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Nedim Radončić, der meine Arbeit mit viel Engagement begleitet hat. Durch ihn wurde die Arbeit am Institut sowohl fachlich als auch persönlich aufgewertet.

Für die Unterstützung bei den Versuchen im Labor möchte ich mich bei Dr. Manfred Blümel und Anton Kaufmann bedanken.

Weitere Dank gilt Thomas Pilgerstorfer und Corina Leber. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Daniel Vidonja und Thomas Theißl vom Geotechnischen Labor.

Der größte Dank gilt meinen Eltern Stefanie und Maximilian Sitzwohl, die mir mein Studium ermöglicht haben und mich in jeglicher Art und Weise unterstützt haben.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Studienkollegen und Freunden für die abwechslungsreichen Stunden während des Studiums danken.

Graz, September 2011

Markus Sitzwohl

Kurzfassung:

Um die bei verformungsfreudigem Gebirge auftretenden Verformungen kontrollieren zu können, wurden am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität Graz Stauchelemente entwickelt. Die als Lining Stress Controller bezeichneten Stauchelemente sind aus einem beidseitig abgeschrägten Stauchrohr und konzentrisch dazu am oberen und am unteren Ende angeordneten Führungsrohren aufgebaut.

Zur Verbesserung des Last-Verformungsverhaltens von Lining Stress Controller werden diese mit einer zementgebundenen porösen Füllung gefüllt. Durch das Füllmaterial wird die Lastaufnahme der Lining Stress Controller erhöht, die Oszillation der Arbeitslinie verringert und ein symmetrisches Beulen des Stauchrohres garantiert. Beim gefüllten Lining Stress Controller sind keine Führungsrohre erforderlich, wodurch die Herstellung vereinfacht wird. Durch die Kombination von gefüllten Lining Stress Controllern verschiedener Längen ist eine annähernd konstante Spritzbetonauslastung über den Verformungsweg erreichbar.

Abstract:

At the Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, yielding elements have been developed to control the large deformations of deeply overstressed ground. The yielding elements called Lining Stress Controllers are made of a load tube with a taper on both sides and concentrically arranged guiding tubes.

In order to enhance the load-displacement relationship, the Lining Stress Controllers are filled with a cement-based porous filling. The cement-based porous filling increases the load, decreases the oscillation of the load-displacement curve and ensures a symmetric buckling of the load tube. The production is simplified, because the filled Lining Stress Controllers do not require guiding tubes. An approximately constant utilisation of the shotcrete lining is achievable with a system of filled Lining Stress Controllers of different lengths.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziele der Masterarbeit	3
3	Stand der Technik	4
3.1	System LSC	4
3.2	hiDCon Elemente	6
3.3	System WABE	7
4	Ermittlung der optimalen Arbeitslinie	9
4.1	Rheologisches Verhalten vom Spritzbeton	9
4.2	Gebirgsverformung	12
4.3	Parameterstudie	13
5	Versuchsergebnis	17
5.1	Charakterisierung der zementgebundenen porösen Füllung	17
5.2	Einseitig abgeschrägtes Stauchrohr	19
5.3	Perforiertes Rohr	21
5.4	Lining Stress Controller	21
5.4.1	LSC A2	22
5.4.2	LSC A1	26
5.4.3	Anpassung der Füllungsrezeptur	29
5.5	Teleskopstauchrohr	30
6	Wechselwirkung mit dem Spritzbeton	33
6.1	LSC A2	33
6.2	Teleskopstauchrohr	35

7 Spaltzugbewehrung	38
7.1 Erforderliche Bewehrung	38
7.2 Spaltzugwendel	39
7.3 Berechnungsbeispiel	40
7.3.1 Erforderliche Bewehrung	40
7.3.2 Spaltzugwendel	41
8 Zusammenfassung	42
9 Literaturverzeichnis	43
Anhang	45
Materialkennwerte	46
Füllmaterial: Einachsialer Druckversuch	47
Füllmaterial: Ödometerversuch	53
Einseitig abgeschrägtes Stauchrohr	57
Perforiertes Stauchrohr	65
LSC A2	68
LSC A1	75
Teleskopstauchrohr	82

1 Einleitung

Tunnelvortriebe im Gebirge mit geringer Qualität und hohen Überlagerungen stellen eine Herausforderung für die Tunnelplanung und Ausführung dar. Konventionelle Ausbauten halten den dabei auftretenden großen Verformungen des Gebirges nicht stand. Schädigungen der Tunnelschale und kostspielige Nachbearbeitungen sind die Folge. In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Lösungen entwickelt, um diese Herausforderungen sicher und wirtschaftlich zu bewältigen.

Aus dem Bergbau kommt die Methode des Stahlbogenausbaus mit verschiebbaren Bogenstößen, welche allerdings relativ große Verformungen und eine Auflockerung des Gebirgsverbandes in Hohlraumnähe zu Folge hat, resultierend aus der geringen Stützung des Gebirges. Der Einsatz von Spritzbeton erlaubt die Mobilisierung von deutlich höheren Ausbauwiderständen. Spritzbeton weist jedoch ein beschränktes Verformungsvermögen auf. Auf Grund des progressiv wachsenden Ausbauwiderstandes, welcher bei den dem Spritzbeton zumutbaren Verformungen zum Erzeugen eines Gleichgewichts mit dem Gebirge erforderlich ist, stellt ein nachgiebiger Ausbau eine wirtschaftliche Notwendigkeit dar. Rabcewicz (1950) präsentierte einen Lösungsansatz, bei dem er die Verwendung von Quetschelementen aus Holz in der Verkleidung vorschlägt, um die Nachgiebigkeit des primären Betonausbaues zu gewährleisten.

Beim Bau des Tauerntunnels an der Autobahn A10 wurde als Lösungskonzept eine Spritzbetonschale mit offenen Schlitzen gewählt (Pöchhacker, 1974). Dieses Konzept wurde in Folge auch bei weiteren Tunneln eingesetzt. Ein folgenschwerer Verbruch beim Galgenbergtunnel zeigte jedoch auf, dass ein gewisser Widerstand in den Schlitzen den Verbruch zumindest verzögert hätte (Schubert et al., 1995) und dementsprechend auch die Sicherheit erhöht hätte. Dieses Ereignis gab Anlass, der Entwicklung des duktilen Ausbaues verstärkt Augenmerk zu schenken. Verschiedene, in die Schlitze zu integrierende Stauchelemente wurden daraufhin entwickelt.

Ein duktiler Ausbausystem soll kontrolliert Gebirgsverformungen zulassen, da der erforderliche Ausbauwiderstand mit zunehmender Verformung abnimmt. Dadurch werden die auf das Tragsystem wirkenden Kräfte reduziert und ein kontrollierter Lastaufbau in der Spritzbetonschale wird ermöglicht. Gleichzeitig soll ein Widerstand des Tunnelausbaus gegen die Gebirgsverformung vorhanden sein, um die Gesamtverformung zu reduzieren.

Die größten Verschiebungszunahmen treten immer im Bereich der Ortsbrust auf, wo das Spritzbetonalter und demzufolge die Spritzbetonfestigkeit am geringsten sind. Dies erfordert von Stauchelementen eine anfänglich geringe Steifigkeit, um den jungen Spritzbeton nicht zu beschädigen. In Folge weiterer Verformungen und der Erhärtung des Spritzbetons soll die vom Stauchelement mobilisierte Kraft über den Verformungsweg ansteigen und der verfügbaren Spritzbetonkapazität folgen, um eine ausgeglichene Auslastung der Spritzbetonschale zu erreichen.

Diesen Anforderungen entsprechend hat Moritz (1999) am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität Graz die Lining Stress Controller (LSC) entwickelt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit sollen im Auftrag der Firma DYWIDAG-Systems International GmbH die Lining Stress Controller durch eine zementgebundene poröse Füllung verbessert werden.

2 Ziele der Masterarbeit

Das primäre Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung des Einflusses einer zementgebundenen porösen Füllung auf die Arbeitslinie von Lining Stress Controllern. Dabei wurden folgende Fragestellungen behandelt:

- Identifikation von einer geeigneten Füllmischung, sowohl hinsichtlich der Verarbeitbarkeit als auch in Bezug auf deren mechanischen Eigenschaften
- Untersuchung des Einflusses einer zementgebundenen porösen Füllung auf das mechanische Verhalten der Stauchelemente
- Entwicklung von verbesserten Stauchelementen anhand der gewonnenen Erkenntnisse

Durch die zementgebundene poröse Füllung soll die Oszillation verringert und die Stauchkapazität vergrößert werden. Desweiteren soll die poröse Füllung ein symmetrisches Beulen des Stauchrohres auch ohne Führungsrohre ermöglichen, wodurch die Herstellung der Lining Stress Controller vereinfacht wird.

Um die bautechnische Eignung der Stauchelemente zu überprüfen, muss ihr Last-Verformungsverhalten mit einem idealen „Soll“-Verhalten verglichen werden. Dieses wurde anhand einer Parameterstudie abgeleitet, bei der sowohl die Spritzbetonstärke als auch die Verschiebungscharakteristik des Gebirges systematisch variiert wurde. Dabei wurde besondere Aufmerksamkeit auf die genaue Erfassung vom rheologischen Verhalten des Spritzbetons gelegt.

3 Stand der Technik

Spritzbeton und Anker sind die grundlegenden Stützmittel im konventionellen Tunnelbau. Bei verformungsfreudigem Gebirge werden in Kombination dazu Stauchelemente eingesetzt, um die Nachgiebigkeit des Ausbaus zu erhöhen und die Kompatibilität mit den auftretenden Verformungen zu gewährleisten. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Stauchelemente gegeben, welche derzeit Stand der Technik sind.

3.1 System LSC

Die LSCs (Lining Stress Controller) wurden von Moritz (1999) am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität Graz entwickelt. Vertrieben werden die LSCs von der Firma DYWIDAG-Systems International GmbH, welche ihre Systeme unter dem Markennamen „ALWAG-Systems“ vertreibt.

Die LSC sind aus einem Stauchrohr und konzentrisch dazu am oberen und am unteren Ende angeordneten Führungsrohren aufgebaut. Die Führungsrohre sollen das Beulverhalten beeinflussen und die Oszillationen in der Arbeitslinie minimieren. Eine geringe Anfangssteifigkeit wird durch das Abschrägen des Stauchrohres an beiden Enden ermöglicht und verhindert eine Beschädigung des jungen Spritzbetons. Der Widerstand des Stauchelements wird durch den Durchmesser und die Dicke des Stauchrohres bestimmt. Der Stauchweg kann durch die Länge des Stauchrohres und der Führungsrohre gewählt werden.



Abbildung 1: Eingebaute LSC (Foto: R. Vergeiner)

Moritz (1999) hat in seiner Dissertation acht verschiedene Typen vom LSC vorgeschlagen. Die Abmessungen dieser Elemente sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Abmessungen LSC (Moritz, 1999)

Typ LSC	Äußerer Durchmesser [mm]			Dicke [mm]			Höhe [mm]			Imperfektion	
	Stauchrohr	Führungsrohr außen	Führungsrohr innen	Stauchrohr	Führungsrohr außen	Führungsrohr innen	Stauchrohr	Führungsrohr unten	Führungsrohr oben	Dicke [mm]	Höhe [mm]
A1	88,9	108,0	80,0	2,9	2,9	2,9	350 - 400	150 – 200	50 - 150	0,3	50
A2	114,3	152,4	101,6	6,3	4,5	6,3					
A3	139,7	168,3	127,0	6,3	5,6	4,0					
B1	244,5	273,0	219,1	6,3	6,3	6,3	350 - 400	150 – 200	50 - 150	0,3	60
B2	355,6	406,4	323,9	8,0	8,8	7,1					
B3a	244,5	323,9	219,1	11,0	11,0	11,0					
B3b	244,5	273,0	193,7	11,0	6,3	8,8					
B4	355,6	406,4	323,9	12,5	11,0	11,0					

Um das Oszillieren der einzelnen LSC auszugleichen und den Aufbau des Widerstandes über den Stauchweg in einem Abschlag zu steuern, können LSC mit unterschiedlichen Abmessungen zu einem System kombiniert werden. In Abbildung 2 ist die Arbeitslinie eines LSC Elementes dargestellt, welches aus vier Stauchrohren besteht, von denen die mittleren Rohre um rund 30 mm kürzer sind. Unter Oszillation steigt die Kraft über einen Stauchweg von 85 mm bis auf ungefähr 2.400 kN an. Danach oszilliert die Kraft auf einem Niveau zwischen 2.000 kN und 2.500 kN.

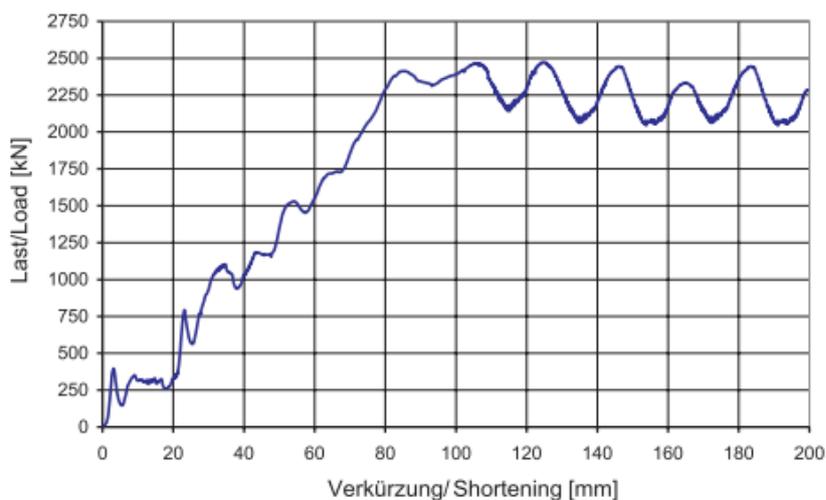


Abbildung 2: Arbeitslinie eines LSC Elementes mit vier Stauchrohren, wobei die mittleren Rohre jeweils um rund 30 mm kürzer sind (Schubert, 2008)

3.2 hiDCon Elemente

Die hiDCon-Elemente (highly deformable concrete) wurden von der Firma Solexperts AG entwickelt und werden auch von Solexperts AG vertrieben. Das Material der hiDCon-Elemente wird als hochfeste Betonmatrix mit porösen Zuschlägen beschrieben (Solexperts, 2010).



Abbildung 3: Eingebaute hiDCon-Elemente (Kovári, 2009)

In Abbildung 4 sind Arbeitslinien von hiDCon-Elementen dargestellt. Nach Überschreiten des elastischen Bereiches und dem Erreichen einer Maximalspannung von ungefähr 9 MPa bleibt die Spannung über einen großen Verformungsbereich (bis zu 40 % Dehnung) konstant bei ungefähr 7,5 MPa. Nach Erreichen der Verformungskapazität steigt die Kraft des Elementes stark an.

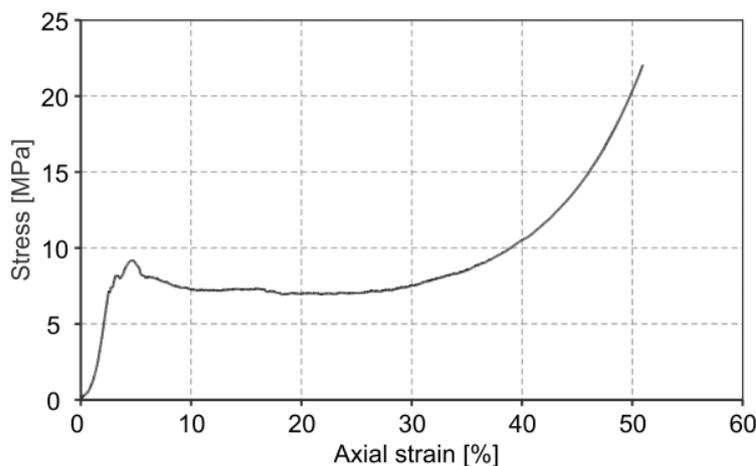


Abbildung 4: Arbeitslinie hiDCon (Radončić, 2011)

Der anfängliche Widerstand der hiDCon-Elemente ist im Vergleich zur Festigkeit des jungen Spritzbetons relativ hoch. Um die Initialsteifigkeit der Elemente zu verringern, wurden beim Lötschberg-Basistunnel die Elemente an der Ober- und Unterseite mit einer je 40 mm dicken Styrofoamplatte versehen (Solexperts, 2005). Dadurch wurde der Beschädigung des jungen Spritzbetons vorgebeugt. Allerdings ist bis zur kompletten Kompression der Styrofoam-Platten praktisch kein Widerstand gegen die Gebirgsverformung vorhanden.

Durch die Variation von Form und Größe der Elemente sowie durch Anpassung von Rezepturen und Bewehrungsführung können die hiDCon-Elemente an die gewünschte Tragwirkung und benötigte Verformung angepasst werden (Quelle: hiDCon).

3.3 System WABE

Das Stauchelement WABE wird von der Firma Bochumer Eisenhütte Heintzmann GmbH & Co. KG vertrieben. Das WABE Element besteht aus flachliegenden Rohrstücken, die in mehreren Rohrlagen zwischen lastverteilenden Platten angeordnet sind. Die Arbeitslinie wird über die Rohrabmessungen, Stahlqualität und die Wahl der jeweiligen Rohre in den verschiedenen Elementlagen bestimmt.



Abbildung 5: Stauchelement WABE mit Einschubrohren (Quelle: Bochumer Eisenhütte)

In Abbildung 6 ist die Arbeitslinie eines WABE Elementes dargestellt, welches aus drei Rohrlagen zu je fünf Rohren besteht. Nach einer raschen Lastaufnahme von 500 kN bei geringer Verformung steigt die Last kontinuierlich bis ungefähr 900 kN bei 200 mm Verformung an. Durch das Einschieben von weiteren Rohrstücken in die vorhandenen Rohre kann die Lastaufnahme auch nach dem Einbau der Elemente erhöht werden.

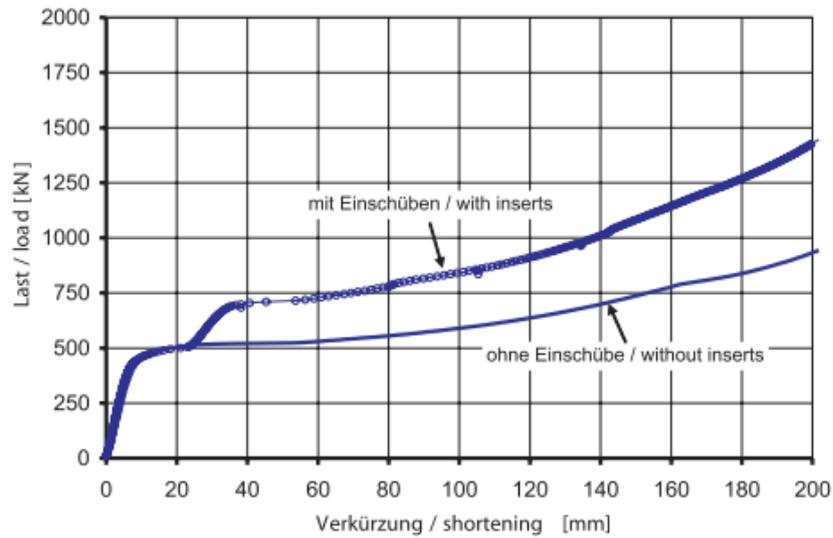


Abbildung 6: Arbeitslinie WABE mit und ohne Einschubrohren (Radončić et al., 2009)

4 Ermittlung der optimalen Arbeitslinie

Die maximale Kraft, welche die Spritzbetonschale aufnehmen kann, wird über das zeitabhängige Verhalten des Spritzbetons und das Setzungsverhalten des Gebirges ermittelt. Jene Arbeitslinie, die sich daraus ergibt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als optimale Arbeitslinie bezeichnet. Zur Ermittlung dieser Arbeitslinie müssen folgende Einflüsse und Wechselwirkungen berücksichtigt werden:

- Zeit- und lastabhängiges rheologisches Verhalten von Spritzbeton
- Zeit- und ortsbruststandabhängige Verschiebungscharakteristik des Gebirges
- Geometrie der Spritzbetonschale (Anzahl der Staucher, Spritzbetonstärke)

4.1 Rheologisches Verhalten vom Spritzbeton

Die altersabhängige Betondruckfestigkeit wird nach Eurocode 2 ermittelt:

$$\beta_{(t)} = \beta_{28} * e^{\left(s * \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right)\right)} \quad \text{Formel 1}$$

mit:

t ... Zeit in Tagen

$\beta_{(t)}$... Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t

β_{28} ... Mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen

s ... vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert

Die altersabhängige Betondruckfestigkeit wird als jene Spannung angenommen, die durch den Spritzbeton zum Zeitpunkt t aufgenommen werden kann. Alle Berechnungen der optimalen Arbeitslinie beruhen auf der Annahme einer konstanten Spritzbetonauslastung. Um einen Sicherheitsbereich zu erhalten, wird die Betondruckfestigkeit mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_C abgemindert.

$$\sigma_{(t)} = \frac{\beta_{(t)}}{\gamma_C} \quad \text{Formel 2}$$

Die zulässige Kraft pro Schlitz kann über die Spritzbetonfläche (Spritzbetondicke d_{SpB} , Schlitzbreite b_{Schl}) berechnet werden:

$$F_{tot(t)} = \sigma_{(t)} * (d_{SpB} * b_{Schl}) \quad \text{Formel 3}$$

Die Schlitzbreite errechnet sich aus der Abschlagslänge l_{Ab} und der Bogenbreite b_B :

$$b_{Schl} = l_{Ab} - b_B \quad \text{Formel 4}$$

Das komplexe rheologische Verhalten des Spritzbetons wird mittels Fließratenmethode (Schubert, 1988) berechnet. Die errechnete Verformung setzt sich dabei zusammen aus einer sofort auftretenden, umkehrbaren Verformung (elastische Verformung), einer umkehrbaren Kriechverformung (verzögert elastische Verformung), einer bleibenden Kriechverformung (Fließdehnung) und einer Schwindverformung. Betrachtet werden zwei aufeinanderfolgende Zeitintervalle bei bekannter Belastung ($\sigma_{(t)}$):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E_{(t)}} + \sigma_2 * \Delta C + \Delta\varepsilon_d + \Delta\varepsilon_{sh} \quad \text{Formel 5}$$

mit:

t_1 ... Beginn Zeitintervall

t_2 ... Ende Zeitintervall

$\varepsilon_{(t)}$... Dehnung zum Zeitpunkt t

$\sigma_{(t)}$... Spannung zum Zeitpunkt t

$E_{(t)}$... Zeitabhängiger E – Modul

t_d ... Zeit in Tagen

Der zeitabhängige E-Modul wird wie folgt berechnet:

$$E_{(t)} = E_{28} * \sqrt{\frac{t_d}{P_1 + P_2 * t_d}} \quad \text{Formel 6}$$

mit:

E_{28} ... Mittlerer E – Modul des Spritzbetons nach 28 Tagen

P_1 ... kalibrierter Parameter 1

P_2 ... kalibrierter Parameter 2

Die elastische Verformung ergibt sich somit zu:

$$\Delta\varepsilon_s = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E_{(t)}} \quad \text{Formel 7}$$

Die verzögert elastische Verformung ist wie folgt definiert:

$$\Delta\varepsilon_d = (\sigma_2 * C_{d,\infty} - \varepsilon_{d,1}) * \left\{ 1 - e^{\left(\frac{-\Delta C}{Q}\right)} \right\} \quad \text{Formel 8}$$

mit:

$C_{d,\infty}$... Grenzwert der umkehrbaren Kriechverformung

Q ... Konstante für die umkehrbare Kriechverformung

$\varepsilon_{d,1}$... elastische Verformung zum Zeitpunkt t_1

Die bleibende Kriechverformung wird mittels folgender drei Gleichungen berechnet:

$$\Delta\varepsilon_{cr} = \sigma_2 * \Delta C \quad \text{Formel 9}$$

$$\Delta C = C_{(2)} - C_{(1)} \quad \text{Formel 10}$$

$$C_{(t)} = A * t_d^{1/3} \quad \text{Formel 11}$$

mit:

$C_{(t)}$... Beiwert für die Kriechverformung zum Zeitpunkt t

A ... Konstante für die Kriechverformung

Die Schwindverformung wird als lastunabhängig angenommen.

$$\Delta \varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,2} - \varepsilon_{sh,1} \quad \text{Formel 12}$$

$$\varepsilon_{sh(t)} = \varepsilon_{sh,\infty} * \frac{t}{B + t} \quad \text{Formel 13}$$

Radončić (2011) hat die Parameter für die Fließratenmethode anhand von Messdaten vom Erkundungstunnel Mitterpichling (Koralmtunnel) kalibriert:

Tabelle 2: Spritzbeton-Parameter kalibriert mit Messdaten vom Erkundungstunnel Mitterpichling (Radončić, 2011)

Konstante für die Kriechverformung	A	0,00010
Grenzwert der umkehrbaren Kriechverformung	$C_{d,\infty}$	0,00009
Konstante für die umkehrbare Kriechverformung	Q	0,0001
Endschwindverformung	$\varepsilon_{sh,\infty}$	0,00125
Konstante für die Schwindverformung	B	600

Die Druckfestigkeit und der E-Modul des Spritzbetons nach 28 Tagen sowie die Parameter für die Berechnung des altersabhängigen E-Moduls des Spritzbetons wurden wie folgt festgelegt:

Tabelle 3: Kennwerte Spritzbeton

β_{28}	40	[MPa]
E_{28}	20.000	[MPa]
P_1	1,8	[-]
P_2	0,93	[-]

Die Spritzbetondehnung zum Zeitpunkt t ergibt sich der unter Annahme einer konstanten Spritzbetonauslastung somit zu:

$$\varepsilon_{SpB(t2)} = \varepsilon_{SpB(t1)} + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E_{(t)}} + \sigma_2 * \Delta C + \Delta \varepsilon_d + \Delta \varepsilon_{sh} \quad \text{Formel 14}$$

4.2 Gebirgsverformung

Die radiale Verschiebungsentwicklung des Gebirges unter Vernachlässigung der zeitabhängigen Gebirgsverformung lässt sich mit der Formel nach Sulem et al. (1987) berechnen:

$$u_r(x) = u_{End} * \left[1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right] \quad \text{Formel 15}$$

mit:

- $u_r(x)$... radiale Verschiebung
- u_{End} ... Endverschiebung
- X ... Verschiebungscharakteristik
- x ... Abstand zur Ortsbrust

Die Umrechnung der Radialverschiebung in die Tangentialverkürzung ist trivial:

$$u_t(x) = 2 * \pi * u_r(x) \quad \text{Formel 16}$$

Aus der Tangentialverkürzung kann unter Berücksichtigung der Spritzbetondehnung die Verkürzung je Schlitz berechnet werden:

$$\Delta l_{Schl} = \frac{u_t(x) - (2 * r * \pi - n_{Schl} * h_{Schl}) * \varepsilon_{SpB(t)}}{n_{Schl}} \quad \text{Formel 17}$$

mit:

- $u_t(x)$... Tangentialverschiebung
- r ... Tunnelradius
- Δl_{Schl} ... Verkürzung je Schlitz
- n_{Schl} ... Anzahl Schlitze
- h_{Schl} ... Höhe der Schlitze
- ε_{SpB} ... Dehnung Spritzbeton (siehe Kapitel 4.1)

Die Beziehung zwischen Ortsbrustabstand x und Zeit t_a ergibt sich aus der Vortriebsgeschwindigkeit a :

$$x = a * t_a \quad \text{Formel 18}$$

Die Differenz zwischen Spritzbetonalter t_{SpB} und Vortriebszeit t_a ist die Zeit t^* , welche zwischen Spritzen des Betons und dem nächsten Abschlag liegt:

$$t_{SpB} = t_a + t^* \quad \text{Formel 19}$$

Die Endverschiebung u_{End} und die Verschiebungscharakteristik X können mittels Kennlinienverfahren abgeschätzt werden oder sie ergeben sich direkt aus dem beobachteten Systemverhalten.

4.3 Parameterstudie

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die Auswirkungen der Variation von Parametern auf die optimale Arbeitslinie gegeben. Die Konstanten für die Parameterstudie wurden dabei wie folgt festgelegt:

Tabelle 4: Konstanten für Parameterstudie

Tunnelradius	5	[m]
Vortriebsgeschwindigkeit	4	[m/d]
Abschlagslänge	1	[m]
Spritzbetondicke	30	[cm]
Soll-Auslastung	1,0	[-]
Anzahl Schlitze	5	[-]
Höhe pro Schlitz	40	[cm]
Verschiebungscharakteristik X	20	[-]
Endverschiebung (radial)	0,2	[m]

Je höher die **Vortriebsgeschwindigkeit** ist, desto schneller nehmen der Abstand zur Ortsbrust und dementsprechend auch die Gebirgsverformung zu. Deswegen müssen die Stauchelemente bei hohen Vortriebsgeschwindigkeiten anfänglich viel nachgiebiger ausgelegt werden, als bei geringen Vortriebsgeschwindigkeiten (Abbildung 7). Mit zunehmender **Spritzbetondicke** nimmt die aufnehmbare Kraft linear zu (Abbildung 8). Die **Verschiebungscharakteristik X** beschreibt die Form der Zeit-Verschiebungs-Kurve (Abbildung 11). Je steiler die Zeit-Verschiebungs-Kurve ist, desto nachgiebiger müssen die Stauchelemente ausgelegt werden (Abbildung 10). Der erforderliche Stauchweg ist von der **Endverschiebung** und der **Anzahl der Schlitze** abhängig. Somit muss die Anzahl der Schlitze immer auf die erwartete Endverschiebung, und die Verformungskapazität der Elemente abgestimmt sein (Abbildung 9).

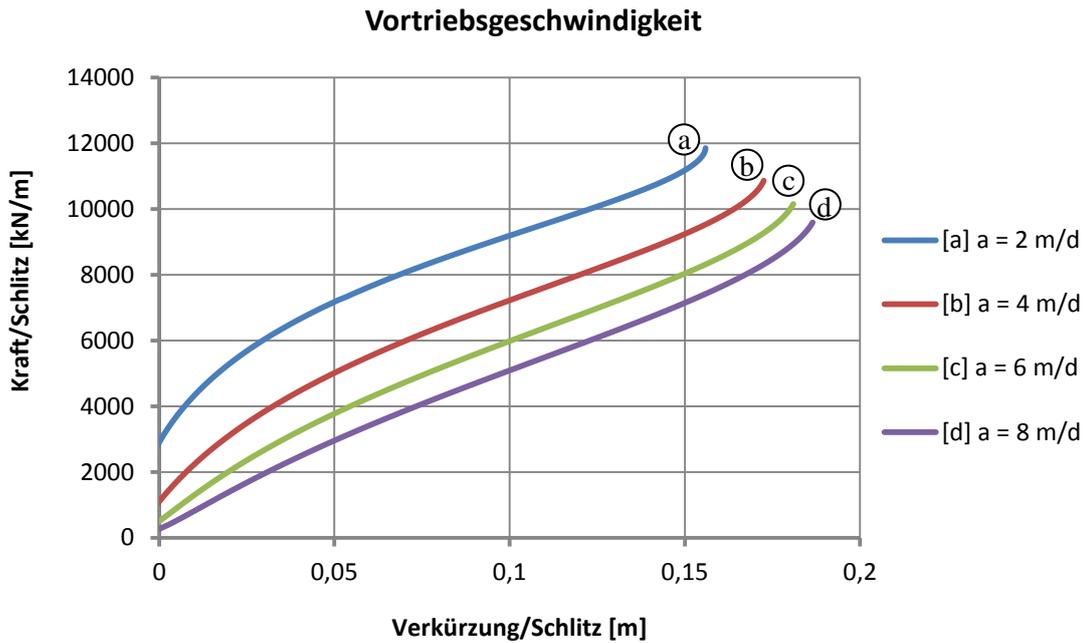


Abbildung 7: Parameterstudie – Vortriebsgeschwindigkeit

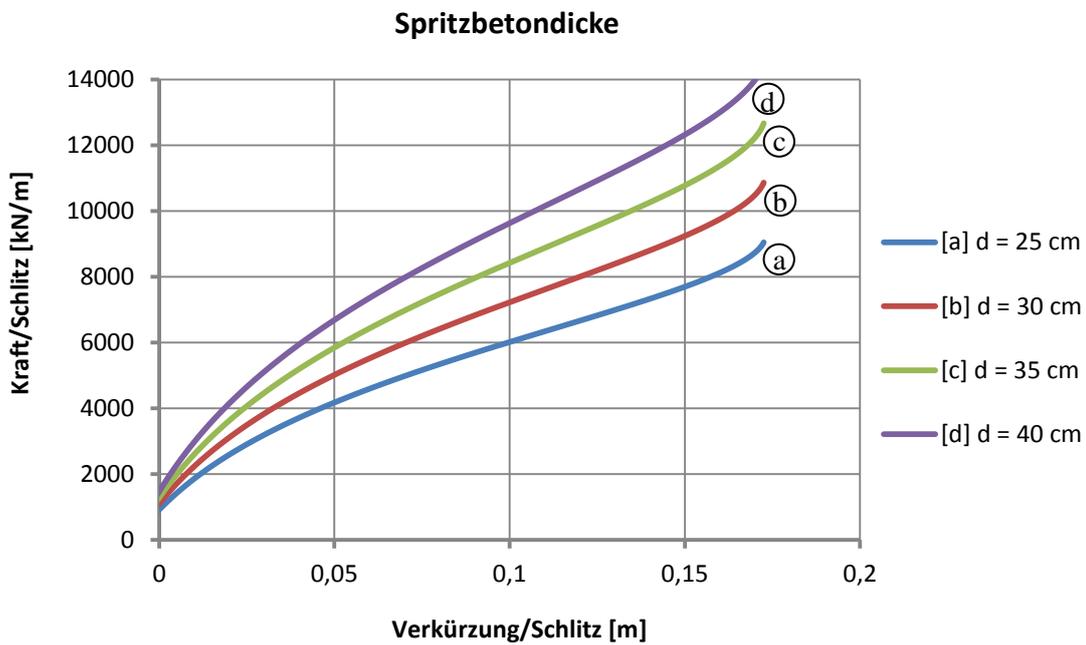


Abbildung 8: Parameterstudie – Einfluss der Spritzbetondicke auf die maximale Kraft im Verformungsschlitz

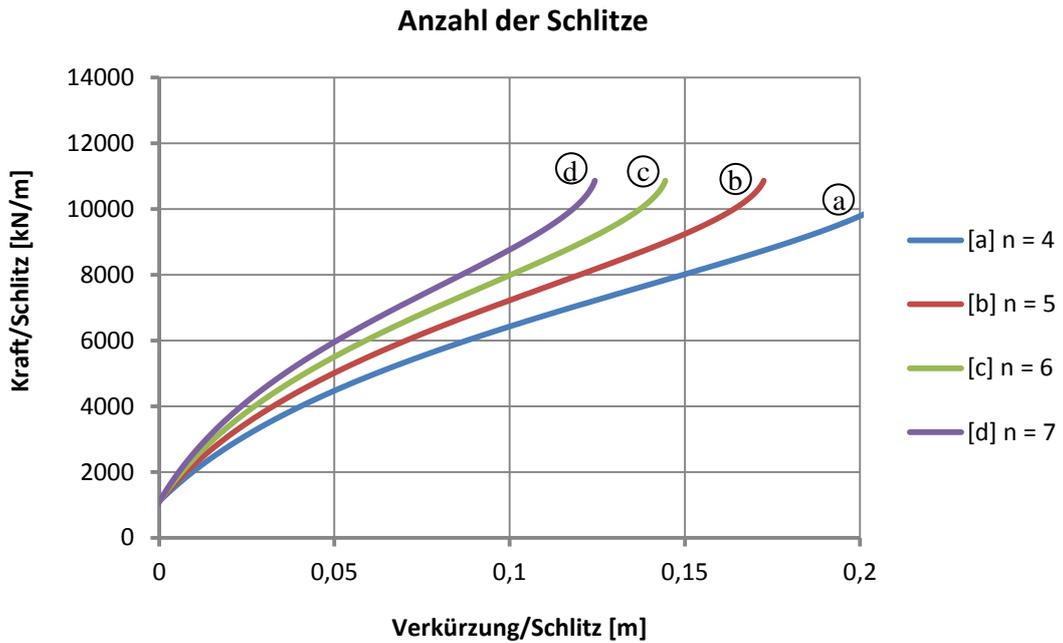


Abbildung 9: Parameterstudie – Einfluss der Anzahl der Schlitze auf die maximale Kraft im Verformungsschlitz

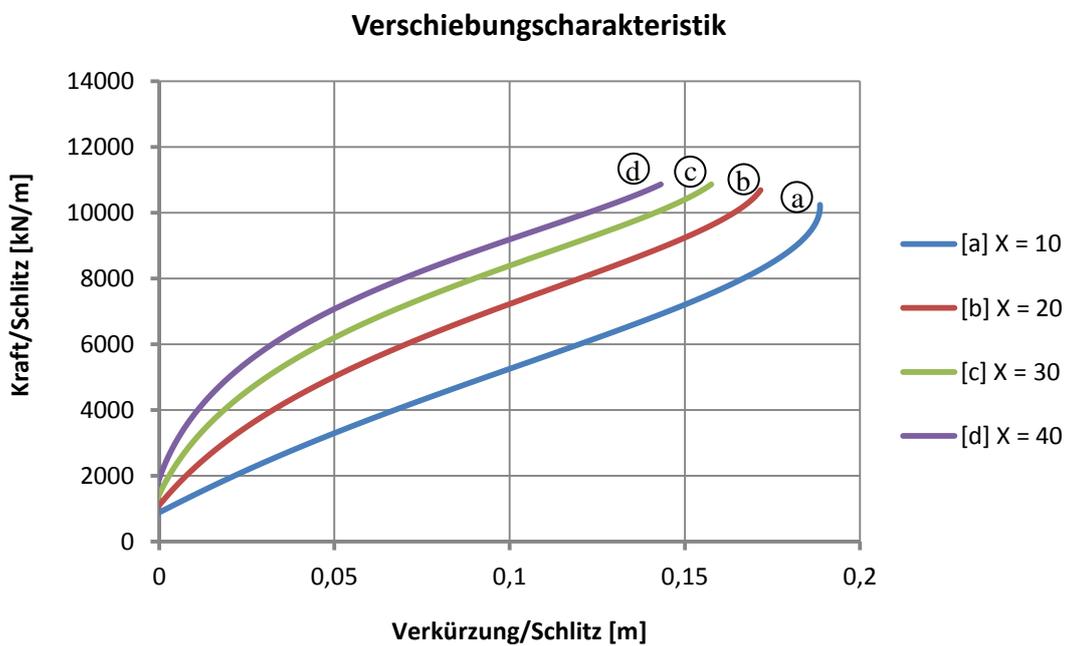


Abbildung 10: Parameterstudie – Einfluss der Verschiebungscharakteristik auf die maximale Kraft im Verformungsschlitz

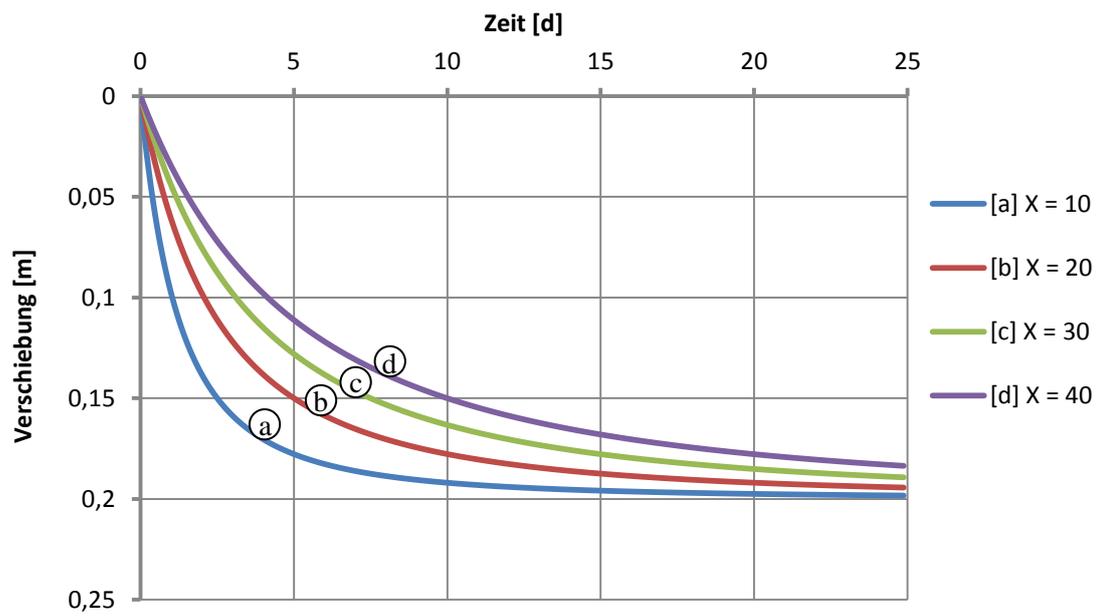


Abbildung 11: Zeit-Verschiebungs-Kurven

5 Versuchsergebnis

5.1 Charakterisierung der zementgebundenen porösen Füllung

Die zementgebundene poröse Füllung soll zusätzlich zum Stauchrohr Last aufnehmen, bis sie so stark komprimiert ist, dass die Kraft steil ansteigt und keine weiteren Verformungen mehr möglich sind. Um einen langen Stauchweg der LSC zu ermöglichen, ist eine hohe Porosität des Füllmaterials erforderlich. Als poröser Zuschlag wird Blähton der Firma Liapor (Produktbezeichnung: Liapor) verwendet. Für eine gute Handhabbarkeit der Füllung sollte diese jedoch nicht zu porös sein. Die Steifigkeit der zementgebundenen porösen Füllung sollte nicht zu gering sein, um ein nach innen Beulen des Stauchrohres zu verhindern und ein symmetrischen Beulen zu fördern.

Für die Herstellung der zementgebundenen porösen Füllung werden folgende Materialien verwendet:

- Portlandzement 42,5 N
- Blähton der Firma Liapor
 - Liapor 1-4 mm
 - Liapor 4-8 mm
- Sand < 2mm

Der Porenanteil der Gemisches ergibt sich aus den geschlossenen Poren des Blähtons, aus den nicht vollständig mit Zement ausgefüllten offenen Poren des Blähtons und aus den Luftporen, die durch die chemische Bindung und dem Verdampfen von Wasser entstehen. Der Porenanteil von Liapor wurde im Labor ermittelt. Aufgrund der hohen Wasseraufnahme des Blähtons ist ein hoher Wasserzementwert erforderlich. Bei den späteren Versuchen wurde der Wasserzementwert mit folgender Formel abgeschätzt:

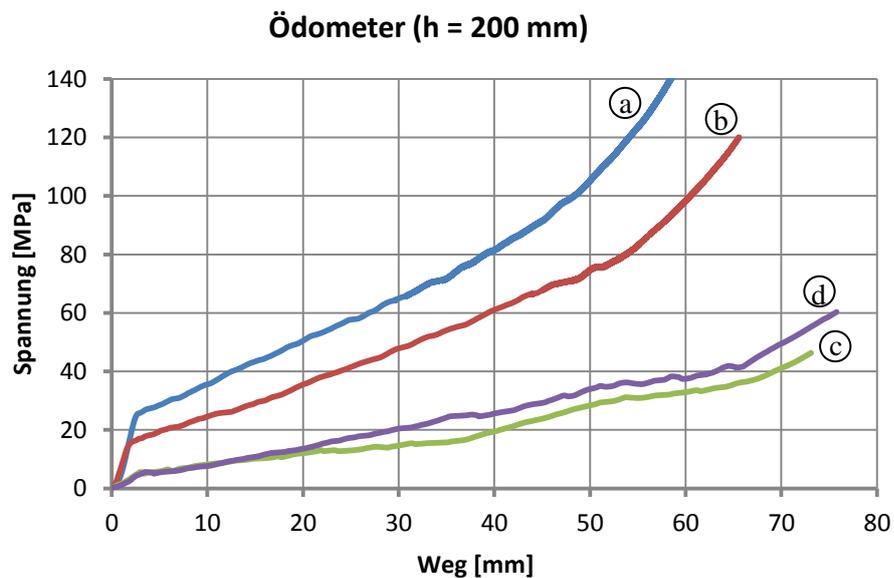
$$W/Z - Wert = 0,4 + 0,15 * \frac{n_{Liapor}}{n_{Zement}} \quad \text{Formel 20}$$

mit:

n_{Liapor} ... Volumenanteil Liapor
 n_{Zement} ... Volumenanteil Zement

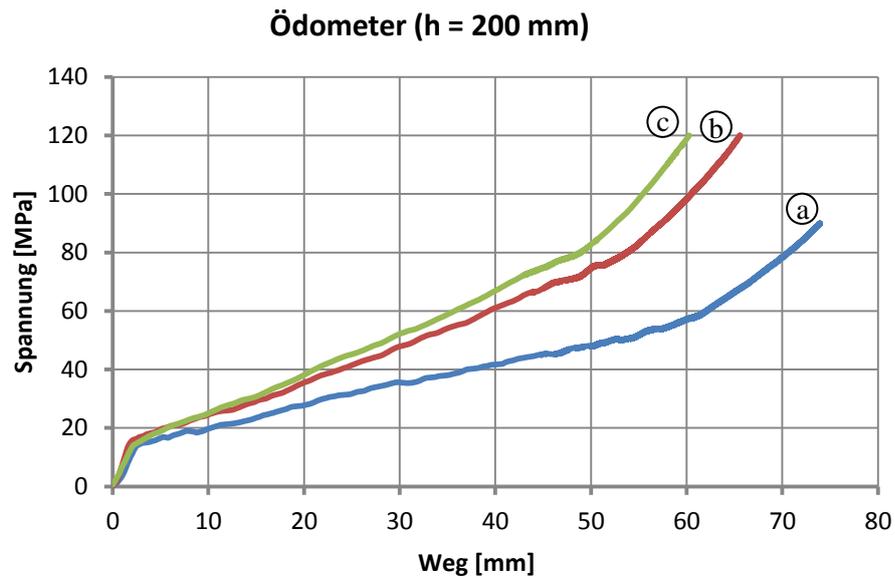
Um das Materialverhalten der zementgebundenen porösen Füllung zu testen, wurden einachsiale Druckversuche und Ödometerversuche durchgeführt. Die einaxialen Druckversuche sind die einfachste Möglichkeit zur Untersuchung des Materialverhaltens, um einen ersten Eindruck über das Last-Verformungsverhalten der gewählten Füllmischungen zu gewinnen. Das Materialverhalten der zementgebundenen, porösen Füllung in einem LSC kann allerdings nicht mit dem Materialverhalten beim einachsialen Druckversuch oder Ödometerversuch direkt verglichen werden. Eine Seitendehnung des Füllmaterials in einem LSC ist eingeschränkt möglich, womit sich der mobilisierte Verformungswiderstand zwischen den beiden Extrema (verhinderte Seitendehnung bzw. einaxialer Spannungszustand) einpendelt.

Der Einfluss des jeweiligen Mischungsverhältnisses auf das Materialverhalten der zementgebundenen porösen Füllung wurde in einem Ödometerversuch ermittelt. Dabei ist erkennbar, dass mit zunehmendem Liapor-Anteil die Spannung abnimmt und der maximale Verformungsweg zunimmt (Abbildung 12). Analog dazu beeinflusst der Sandanteil den Kraftanstieg nach dem Bruch des Füllmaterials maßgeblich: ohne Sand ist der Kraftanstieg flach, bei zunehmendem Sandanteil steigt die Kraft steiler an (Abbildung 13).



Füllmischung: Volumenanteil				
	Zement	Liapor 1-4 mm	Liapor 4-8 mm	Sand < 2 mm
— [a]	1	1,5	-	0,5
— [b]	1	2,5	-	0,5
— [c]	1	3,5	-	0,5
— [d]	1	2,5	1	0,5

Abbildung 12: Ödometerversuch

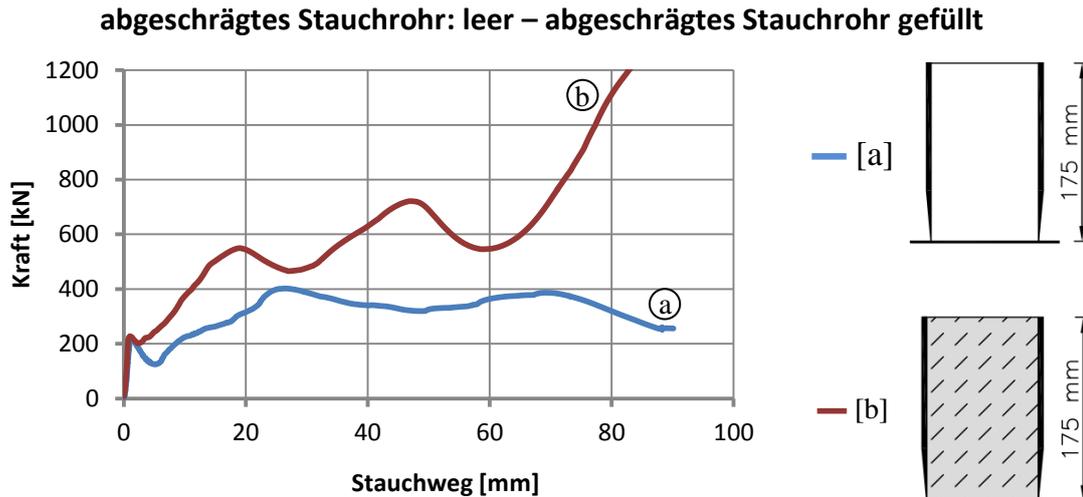


Füllmischung: Volumenanteil			
	Zement	Liapor 1-4 mm	Sand < 2 mm
— [a]	1	2,5	0
— [b]	1	2,5	0,5
— [c]	1	2,5	1,0

Abbildung 13: Ödometerversuch

5.2 Einseitig abgeschrägtes Stauchrohr

Um Material zu sparen, wurden zunächst Versuche mit halbierten Hauptrohren eines LSC A2 Elementes durchgeführt, die somit nur auf einer Seite die konische Schwächung hatten. Bei den Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Lastaufnahme durch die zementgebundene poröse Füllung erheblich erhöhen lässt (Abbildung 14).



Durch die einseitige Abschrägung beulen beide Stauchrohre bereits bei ungefähr 220 kN. Nach einem weiteren Anstieg der Kraft oszilliert das gefüllte Stauchrohr zwischen 470 kN und 720 kN auf einem höheren Lastniveau als das leere Stauchrohr. Während es beim gefüllten Stauchrohr ab einem Stauchweg von 60 mm zu einem steilen Anstieg der Kraft kommt, fällt die Kraft beim leeren Stauchrohr auf 260 kN zurück.

Das gefüllte Stauchrohr beult annähernd symmetrisch nach außen, nachdem ein Beulen nach innen durch das Füllmaterial verhindert wird. Ebenfalls wird Füllmaterial in die Beulen hineingepresst (Abbildung 15). Dies verhindert ein vollständiges „Schließen“ der Beule und reduziert die Oszillationen in der Arbeitslinie.



Abbildung 15: Nach Versuch durchgeschnittener LSC A2

5.3 Perforiertes Rohr

Als Alternative zu den konisch geschwächten Stauchrohren wurden auch Stauchrohre mit Löchern als Imperfektion getestet. Die Stauchrohre haben 17 Löcher mit einem Durchmesser von 12,5 mm. Daraus ergibt sich eine Verringerung der Querschnittsfläche im betroffenen Bereich auf ungefähr 40 % des ursprünglichen Querschnittes.

Nach einem steilen Lastanstieg auf 400 kN bis zur ersten Beule fällt die Last wieder auf unter 200 kN ab. Dieser starke Lastabfall und die hohe Anfangssteifigkeit stellen große Nachteile gegenüber den abgeschrägten Stauchrohren dar. Außerdem ist es bei der Herstellung aufwändiger die Stahlrohre zu lochen als an den Enden abzuschrägen. Ein weiterer Nachteil ist, dass ohne innere Führungsrohre das Füllmaterial aus den Löchern bröckeln würde. Aus diesen Gründen sind gelochte Stauchrohre keine Alternative zu den abgeschrägten Stauchrohren.

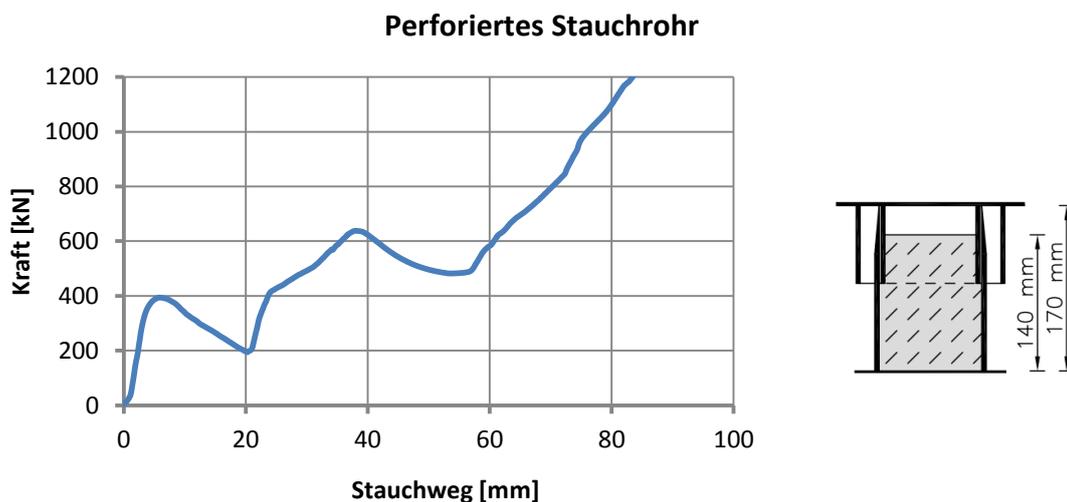


Abbildung 16: Arbeitslinie eines perforierten Stauchrohres

5.4 Lining Stress Controller

Um den Einfluss der zementgebundenen porösen Füllung auf das Beulverhalten von Lining Stress Controllern zu untersuchen wurden Versuche an Typen LSC A2* und LSC A1* durchgeführt.

* Anmerkung: Die Abmessungen weichen von den von Moritz (1999) definierten Abmessungen für den LSC A2 und den LSC A1 leicht ab (siehe Tabelle 1). Abgesehen davon ist die Stahlqualität (S355) mittlerweile besser als jene, welche bei den Untersuchungen von Moritz (1999) verwendet wurde.

5.4.1 LSC A2

Durch Vergleich eines leeren LSC mit einem gefüllten LSC konnte gezeigt werden, dass sich die Arbeitslinie des LSC durch die zementgebundene poröse Füllung deutlich verbessern lässt (Abbildung 17). Durch die Abschrägungen am oberen und unteren Ende beulen die LSCs die ersten beiden Male bei ungefähr 200 kN. Danach steigt die Kraft bei beiden LSC auf über 600 kN an. Ab einem Verformungsweg von 92 mm fällt die Kraft beim leeren LSC wieder auf unter 200 kN ab. Der Grund hierfür ist das unkontrollierte Beulen des leeren LSC. Einerseits war der Durchmesser des verwendeten äußeren Führungsrohres zu groß, um eine positive Beeinflussung der Arbeitslinie zu bewirken, andererseits neigte das auf über 200 mm ungestützte Stauchrohr zu asymmetrischen Beulen. Im Vergleich dazu verhindert das Füllmaterial beim gefüllten LSC, dass dieser unkontrolliert nach innen beult (Abbildung 18). In Folge weiterer Verformung oszilliert die Kraft zwischen 580 kN und 820 kN. Ab einem Verformungsweg von ungefähr 165 mm kommt es zu einem steilen Kraftanstieg.

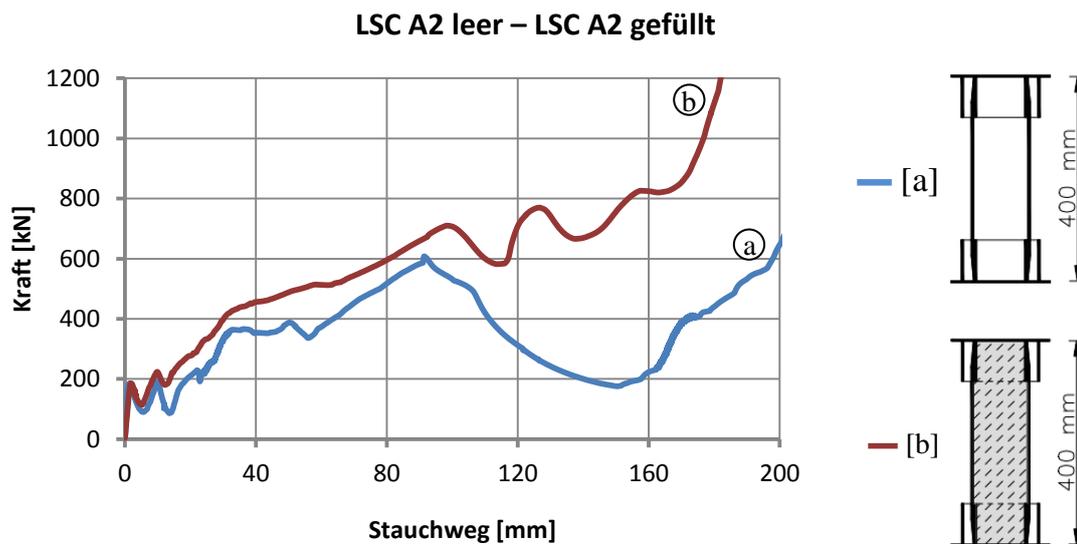


Abbildung 17: LSC A2 leer – LSC A2 gefüllt

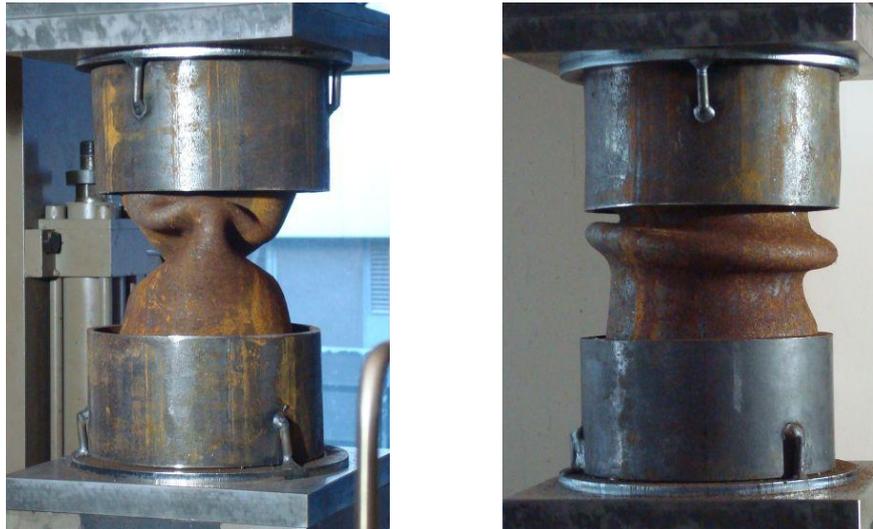


Abbildung 18: LSC A2 leer – LSC A2 gefüllt

Die inneren Führungsrohre sind beim gefüllten LSC überflüssig, nachdem die zementgebundene poröse Füllung ein nach innen Beulen des Stauchrohres verhindert. Auch die äußeren Führungsrohre scheinen unnötig, weil da Füllmaterial in die Beulen des Stauchrohres gepresst wird und dieses demzufolge annähernd symmetrisch nach außen beult. Um diese Vermutungen zu bestätigen, wurden Versuche mit einem gefüllten LSC-Stauchrohr (ohne Führungsrohre) durchgeführt. Im Vergleich zu einem leeren LSC mit Führungsrohren (Abbildung 19) ist erkennbar, dass auch hier das gesamte Last-Verformungsverhalten deutlich günstiger wird. Der gefüllte LSC beult wie erwartet annähernd symmetrisch im Gegensatz zum unkontrollierten Beulverhalten eines „leeren“ LSC (Abbildung 20).

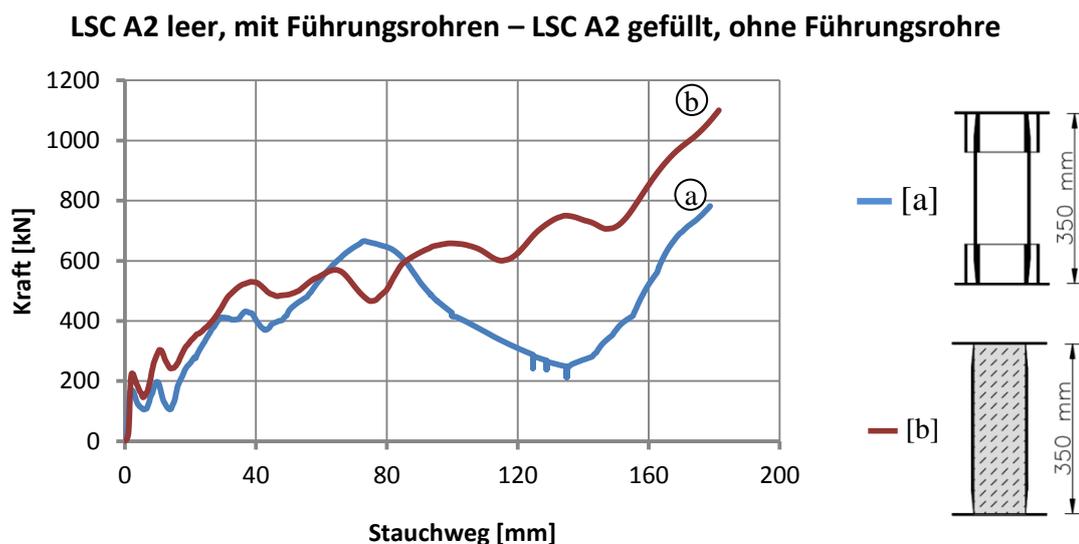


Abbildung 19: LSC A2 leer, mit Führungsrohren – LSC A2 gefüllt, ohne Führungsrohre



Abbildung 20: LSC A2 leer, mit Führungsrohren – LSC A2 gefüllt, ohne Führungsrohre

Ab einer Stauchung von ungefähr 42 % des gefüllten LSC ist die zementgebundene poröse Füllung so stark komprimiert, dass keine weiteren kompressiblen Poren zur Verfügung stehen. Um den gesamten Stauchweg zu verlängern, wurden Versuche durchgeführt, bei denen der Lining Stress Controller nicht vollständig gefüllt wurde.

In Abbildung 21 wird ein vollständig gefüllter mit einem teilgefüllten LSC verglichen. Die Füllhöhe (400 mm) des teilgefüllten LSC setzt sich dabei aus 60 mm Styropor und 340 mm Füllmaterial zusammen. Beim Vergleich ist erkennbar, dass sich der verfügbare Stauchweg (bis zum steilen Kraftanstieg) trotz der um 60 mm geringeren Füllhöhe um lediglich 10 mm verlängert. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass beim vollständig gefüllten Stauchrohr bereits bei geringer Stauchung Füllmaterial in die Beulen gepresst wird. Dadurch wird das geringere Füllvolumen des teilgefüllten LSC größtenteils ausgeglichen. Diese These wird auch durch die nahezu nicht vorhandene Lastoszillationen im Bereich zwischen 30 mm und 120 mm Stauchweg beim vollständig gefüllten Rohr untermauert.

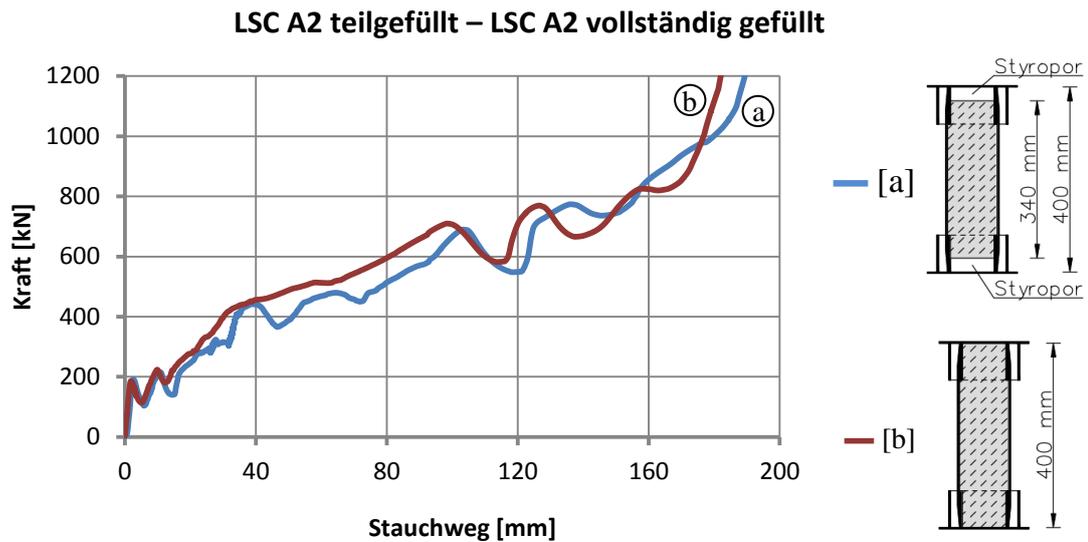


Abbildung 21: LSC A2 teilgefüllt – LSC A2 vollständig gefüllt

Wenn auf die bei diesen Versuchen verwendeten inneren Führungsrohre verzichtet wird, hat eine vollständige Füllung eine bessere Wirkung auf das Beulverhalten des Stauchrohres als eine Teilfüllung, da ein Innendruck des Füllmaterials konstant über die gesamte Rohrlänge vorliegt und einem unkontrollierten Beulen entgegenwirkt. Desweiteren ist die Herstellung eines vollständig gefüllten LSCs leichter als die Herstellung eines teilgefüllten LSCs. Aus diesen Gründen und aufgrund der lediglich geringen Verlängerung des Stauchweges ist eine vollständige Füllung der Teilfüllung auf jeden Fall vorzuziehen.

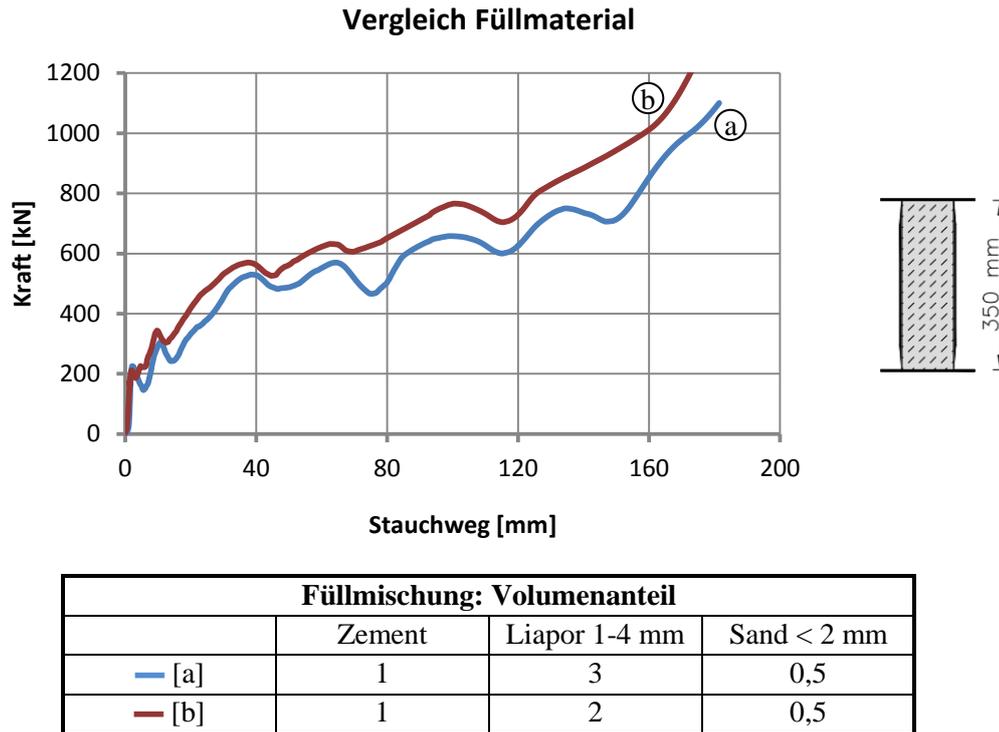


Abbildung 22: Vergleich Füllmaterial

Um den Einfluss der Porosität des Füllmaterials auf den verfügbaren Verformungsweg und die Arbeitslinie zu untersuchen, wurden zwei gleiche LSCs mit verschiedener Füllmischung miteinander verglichen (Abbildung 22). Beim Füllmaterial mit geringerer Porosität ist eine steilere Lastaufnahme gegenüber dem poröseren Füllmaterial über den beinahe gesamten Stauchweg erkennbar. Die höhere Steifigkeit der Füllung beeinflusst das Beulverhalten günstiger, weil ein höherer Innendruck vorliegt und die Lastoszillationen erkennbar zurück gehen. Allerdings muss eine geringere Gesamtverformungskapazität in Kauf genommen werden. Nichtsdestotrotz zeichnen sich beide Fälle durch eine Arbeitslinie mit konstantem Lastanstieg und geringer Oszillation aus.

5.4.2 LSC A1

Beim LSC A1 steigt die Kraft annähernd linear an bis zu einer Stauchung von 100 mm und einer Kraft von 570 kN. Danach berühren sich die oberen und die unteren Führungsrohre, gefolgt von einem abrupten Anstieg im Verformungswiderstand. Um den Verformungsweg zu verlängern, wurden kürzere Führungsrohre verwendet, die allerdings ein unkontrolliertes Beulen des Stauchrohres und einen relativ starken Lastabfall zu Folge hatten. (Abbildung 23)

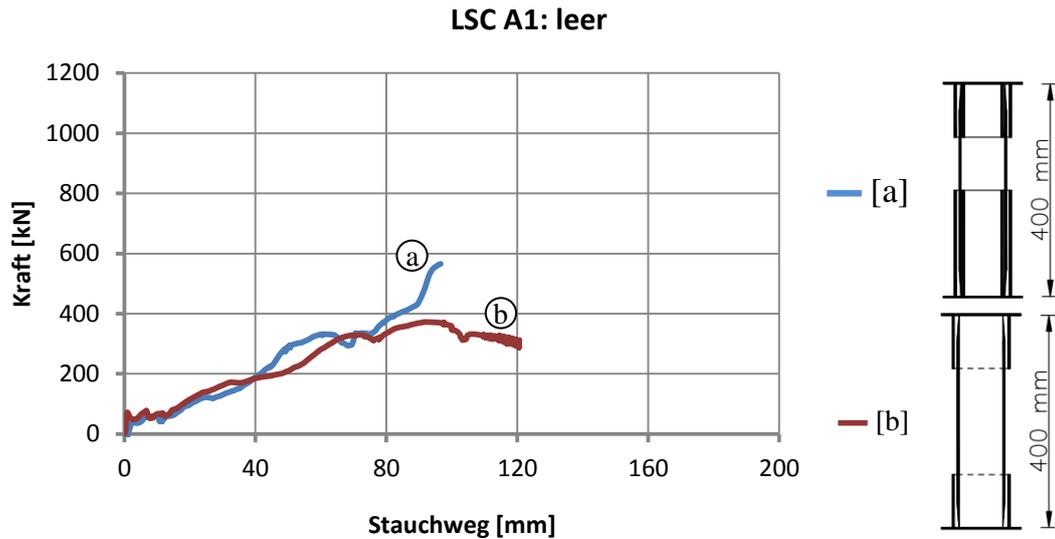


Abbildung 23: LSC A1: leer

Beim gefüllten LSC A1 oszilliert die Kraft nach dem anfänglichen Kraftanstieg zwischen 325 kN und 500 kN bis zu einer Stauchung von ungefähr 170 mm. Im Gegensatz zum LSC A2, bei dem die Kraft nach Aufbrauchen des Porenvolumens steil ansteigt, knickt der LSC A1 und es kommt zu einem Lastabfall (Abbildung 24).

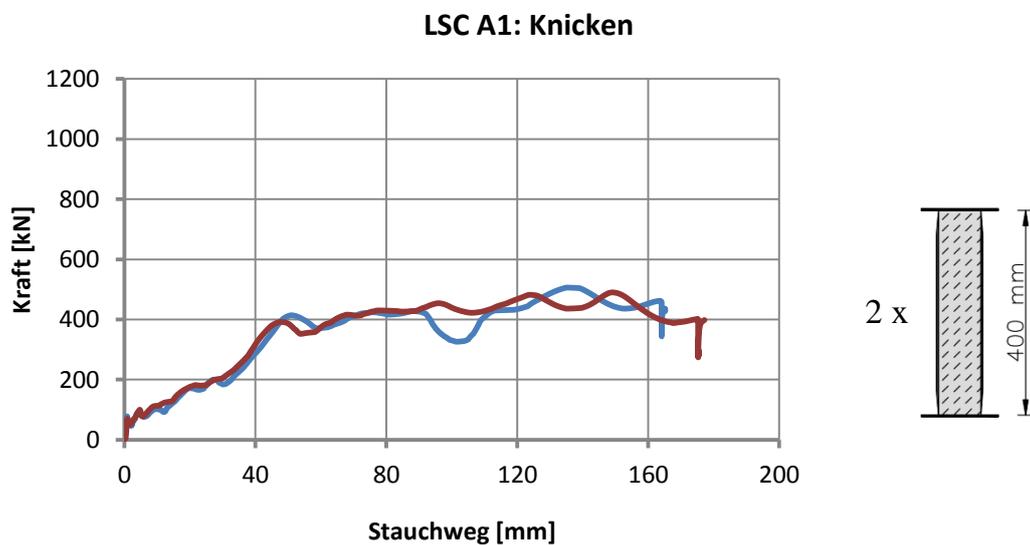


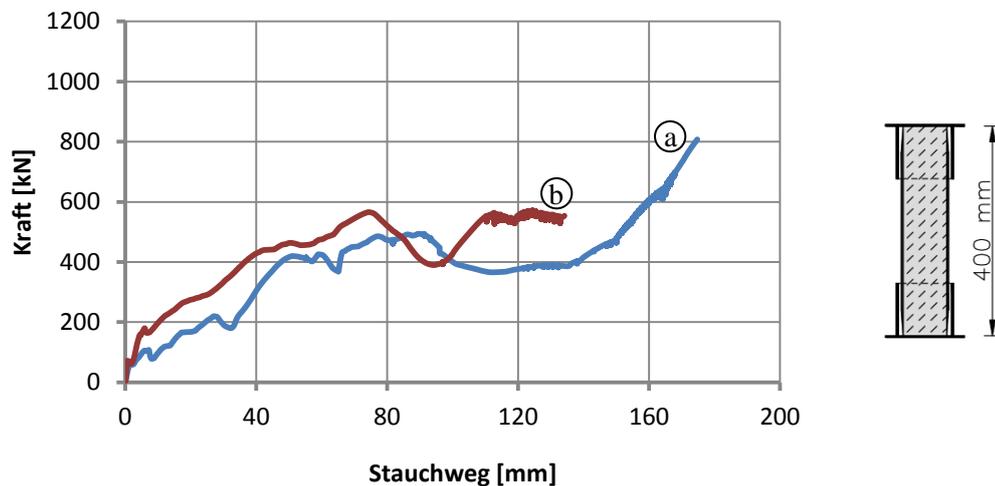
Abbildung 24: LSC A1: Knicken



Abbildung 25: LSC A1: Knicken

In Kombination mit Führungsrohren knickt das mit der gleichen Füllmischung gefüllte Stauchrohr nicht, allerdings ändert sich der Beulmodus bei höherer Last (Abbildung 26 – [a], Abbildung 27 – links). Dem kann mit einem weniger porösen Füllmaterial entgegen gewirkt werden, jedoch kommt es dann wieder zu einem Knicken des Stauchrohres trotz Führungsrohren (Abbildung 26 – [b], Abbildung 27 – rechts).

LSC A1: gefüllt



Füllmischung: Volumenanteil			
	Zement	Liapor 1-4 mm	Sand < 2 mm
— [a]	1	3	0,5
— [b]	1	2	0,5

Abbildung 26: LSC A1: gefüllt



Abbildung 27: LSC A1: gefüllt

Wie beim LSC A2 konnte auch beim LSC A1 gezeigt werden, dass sich die Kraft durch zementgebundene poröse Füllung steigern und die Arbeitslinie verbessern lässt. Als Stauchelement ist der LSC A1 allerdings generell ungeeignet. Beim leeren LSC ist der Stauchweg zu gering und beim gefüllten LSC besteht die Gefahr des Knickens. Insgesamt ist die Lastaufnahme auch zu gering, um die Spritzbetonschale in ihren geläufigen Stärken gut auszulasten.

5.4.3 Anpassung der Füllungsrezeptur

Beim Vergleich der LSC A2 mit den LSC A1 zeigt sich, dass die Auswirkungen des Füllmaterials auf das Beulverhalten des Stauchrohres nicht nur vom Mischungsverhältnis der Füllung, sondern auch vom Durchmesser, der Länge und der Wanddicke des Stauchrohres abhängen. Dementsprechend kann es nötig sein, bei Veränderung der Abmessungen des Stauchrohres auch die Füllungsrezeptur zu verändern.

5.5 Teleskopstauchrohr

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein weiteres Stauchelement entwickelt. Dieses Stauchelement wird als Teleskopstauchrohr (TSR) bezeichnet. Es ist aus einem gefüllten Außenrohr und einem gefüllten Innenrohr aufgebaut. Der Aufbau der Last erfolgt dabei vorerst durch axiale Beanspruchung der zementgebundenen porösen Füllung. Dabei ergibt sich eine Arbeitslinie, welche dem im Ödometerversuch beobachteten Materialverhalten entspricht. Dementsprechend ist die Arbeitslinie von der Füllmischung und vom Durchmesser der beiden Teleskopstauchrohre abhängig. Der Einfluss der Füllungsrezeptur auf das Last-Verformungsverhalten wurde bereits im Kapitel 5.1 beschrieben.

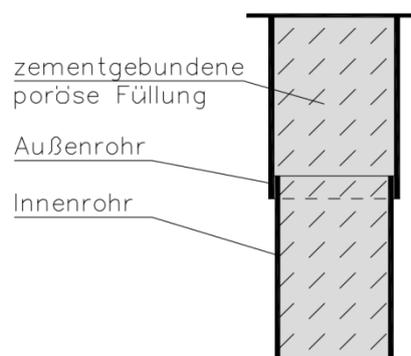
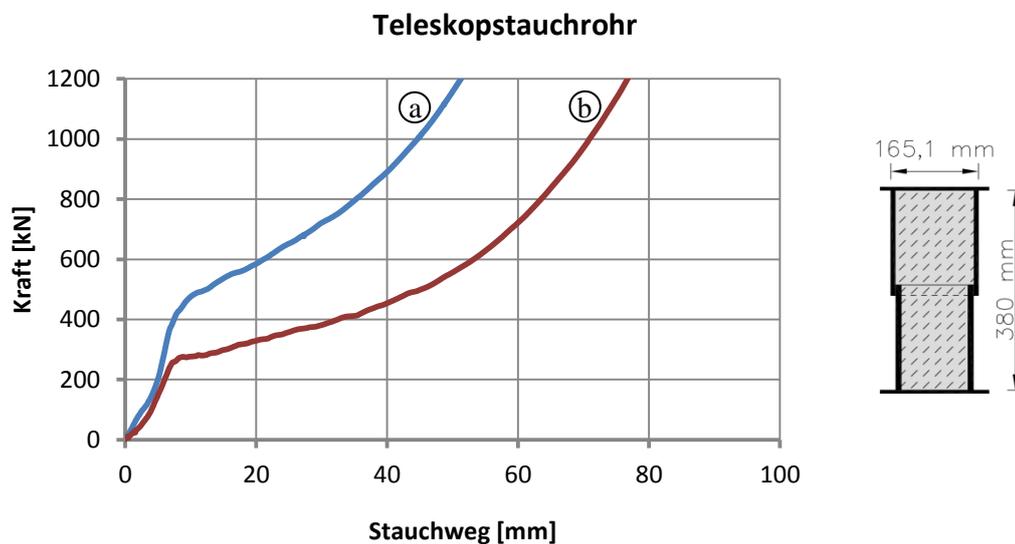


Abbildung 28: Teleskopstauchrohr



Füllmischung: Volumenanteil			
	Zement	Liapor 1-4 mm	Sand < 2 mm
— [a]	1	1,5	0,5
— [b]	1	2,5	0,5

Abbildung 29: Teleskopstauchrohr

Die Kraft steigt anfänglich steil an, bis es zu einem Bruch des Füllmaterials kommt. Nach dem Bruch steigt die Kraft weiter an, bis das Füllmaterial so stark komprimiert ist, dass es zu einem Beulen des Innen- oder Außenrohres kommt. Durch eine porösere Füllung kann zwar ein größerer Verformungsweg erreicht werden, allerdings ist dann auch die Initiallast geringer (Abbildung 29). Deswegen wurde nach Möglichkeiten gesucht, den Stauchweg zu verlängern.

In Abbildung 30 ist ein Versuch dargestellt, bei dem der Stauchweg durch das geplante Beulen des Innenrohres verlängert werden soll. Dabei ist das Außenrohr um einiges kürzer als das Innenrohr, sodass das Innenrohr bereits nach einem Stauchweg von 50 mm belastet wird. Das Innenrohr beult wie geplant nach ungefähr 50 mm bei 775 kN. Durch das Beulen fällt die Last allerdings wieder auf 400 kN ab, also fast um die Hälfte.

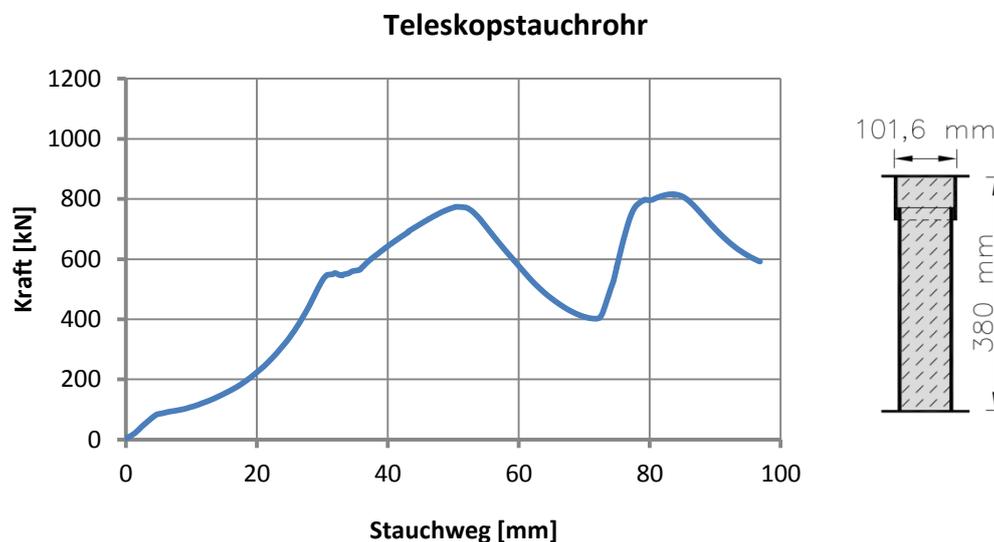


Abbildung 30: Teleskopstauchrohr

Der Stauchweg kann auch verlängert werden, indem das Teleskopstauchrohr nicht vollständig angefüllt wird und somit weiterer Verformungsraum erzeugt wird. Bei dem in Abbildung 31 dargestellten Teleskopstauchrohr wurde in der Mitte des Außenrohres ein zylindrischer Hohlraum mit einem Durchmesser von 75 mm und einer Höhe von 210 mm belassen. Das Außenrohr ist zudem länger als das Innenrohr, um ein Beulen des Innenrohres zu verhindern. Nach einem raschen Lastanstieg auf 500 kN bleibt die Last über mehrere Zentimeter Stauchweg annähernd konstant, bis sie ab einem Stauchweg von ungefähr 60 mm einen weiteren Anstieg erfährt. Obwohl der Stauchweg immer noch kürzer als der Stauchweg eines LSC ist, ist eine Verlängerung des Stauchweges klar erkennbar.

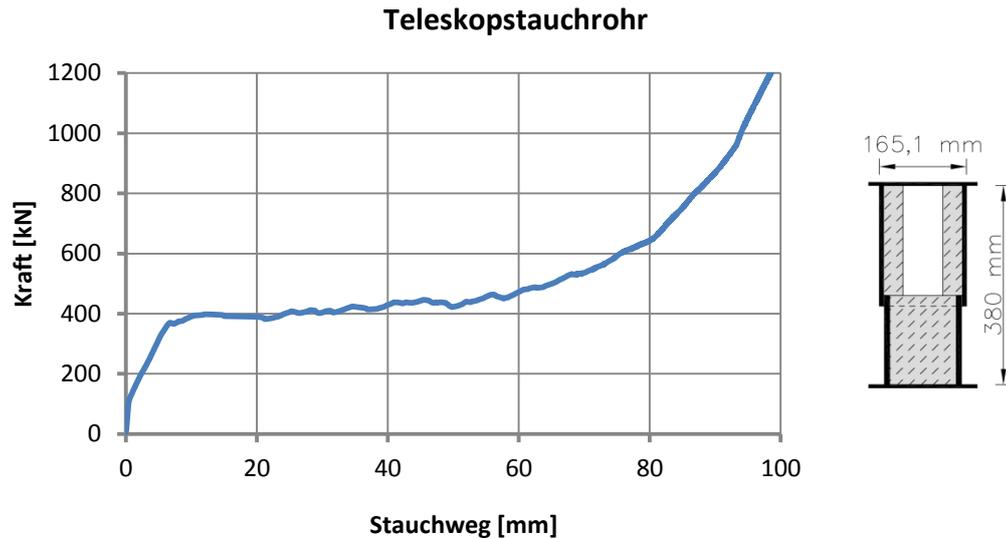


Abbildung 31: Teleskopstauchrohr

Der qualitative Verlauf der Arbeitslinie beim Teleskopstauchrohr ist gut. Die Kraft ist über einen längeren Verformungsweg relativ konstant und in der Arbeitslinie ist fast keine Oszillation vorhanden. Durch Schaffung eines weiteren Verformungsraumes konnte der Verformungsweg vergrößert werden, das gesamte Verformungsvermögen ist jedoch noch nicht ausreichend groß. Dies stellt auch den großen Nachteil gegenüber den bereits beschriebenen gefüllten LSCs dar. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass das Potential des Systems bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Aufgrund des progressiven Lastanstieges eignen sich die Teleskopstauchrohre gut für Gebirgsverhältnisse, bei denen die Verformungen langsam auftreten, wie zum Beispiel bei quellendem oder kriechendem Gebirge.

Ein Vorteil der Teleskopstauchrohre ist die einfache Herstellung, nachdem die Teleskopstauchrohre aus zwei Stahlrohren mit unterschiedlichen Durchmessern und zwei dazu passenden zementgebundenen porösen Zylindern bestehen. Bei der Kombination von Teleskopstauchrohren mit verschiedenen Elementhöhen gestaltet sich die Verringerung der Elementhöhe der verkürzten Elemente als einfach. Durch das Verkürzen der Zementzylinder beim Innenrohr wird die Überlappung der Teleskopstauchrohre vergrößert und die Elementhöhe verringert.

6 Wechselwirkung mit dem Spritzbeton

Um die Auslastung der Spritzbetonschale zu ermitteln, wird die Arbeitslinie der Stauchelemente mit der optimalen Arbeitslinie verglichen. Die optimale Arbeitslinie wurde mit einem Sicherheitsbeiwert berechnet, um einen Sicherheitsbereich zu erhalten (entspricht der Soll-Auslastung). Es wurde der Teilsicherheitsbeiwert für Beton ($\gamma_c = 1,5$) aus dem Eurocode 2 verwendet, wodurch sich eine Soll-Auslastung von 0,67 ergibt. Die Spritzbetonauslastung entspricht der tatsächlichen Auslastung der Spritzbetonschale, der Sicherheitsbeiwert wurde hierfür nicht angewendet.

6.1 LSC A2

Für die Berechnung der optimalen Arbeitslinie wurden folgende Parameter (Tabelle 5) verwendet. Die Anzahl der Schlitze in der Spritzbetonschale wird dabei abhängig vom maximalen Verformungsweg der Stauchelemente auf die Endverschiebung abgestimmt.

Tabelle 5: Parameter für die optimale Arbeitslinie (LSC)

Tunnelradius	5	[m]
Vortriebsgeschwindigkeit	4	[m/d]
Abschlagslänge	1	[m]
Spritzbetondicke	30	[cm]
Soll-Auslastung	0,67	[-]
Anzahl Schlitze	5	[-]
Höhe pro Schlitz	40	[cm]
Verschiebungscharakteristik X	20	[-]
Endverschiebung (radial)	0,2	[m]

Beim Vergleich ist erkennbar, dass die Arbeitslinie der Lining Stress Controller (Versuch 44) sehr gut an die optimale Arbeitslinie angenähert werden kann (Abbildung 32). Bei einem Durchmesser von 150 mm pro LSC A2 (nach Versuch, ohne Führungsrohre) ergibt sich eine mögliche Anzahl von 5 LSC A2 auf einer Abschlagslänge von einem Meter (10 mm Abstand zwischen den LSCs; 200 mm Tunnelbogenbreite; $5 \times \{150 \text{ mm} + 10 \text{ mm}\} + 200 \text{ mm} = 1,0 \text{ m}$).

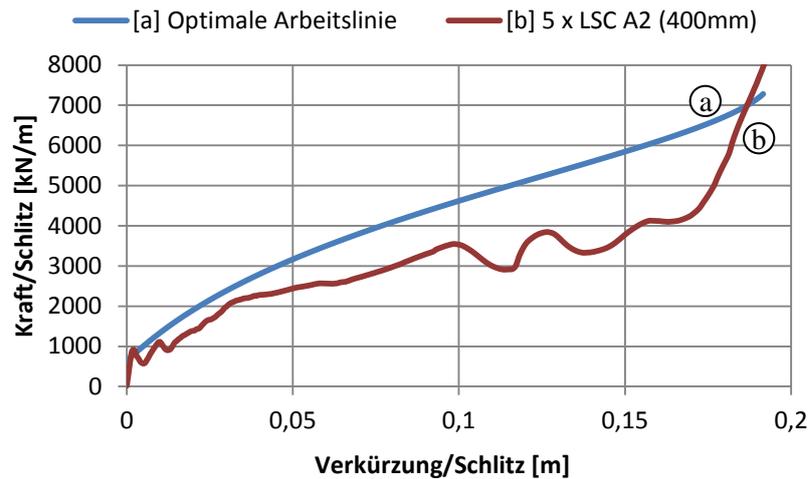


Abbildung 32: Optimale Arbeitslinie - Arbeitslinie von 5 LSC A2

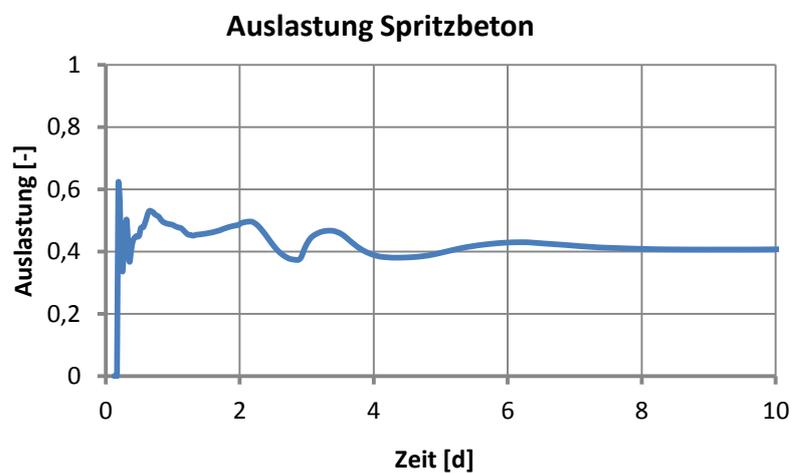


Abbildung 33: Spritzbetonauslastung bei 5 LSC A2¹

Die Auslastung der Spritzbetonschale ist über die ersten 10 Tage sehr konstant. Eine Überschreitung der Entwurfswerte (Sicherheitsbeiwert von 1,50) ist allerdings gegeben. Um dieser Überbelastung vorzubeugen, können wie bereits von Moritz (1999) vorgeschlagen teilweise kürzere LSC A2 (Versuch 51) eingebaut werden (Abbildung 34). Dadurch kann die Spritzbetonauslastung in den ersten zwei Tagen verringert werden (Abbildung 35) und eine vollständige Übereinstimmung mit den Planungsvorgaben erreicht werden.

¹ Anmerkung: Die optimale Arbeitslinie wurde unter der Annahme einer konstanten Spritzbetonauslastung berechnet. Deswegen ergeben sich Differenzen bei der Auslastung des Spritzbetons zwischen der Soll-Auslastung (0,67; Abbildung 32: Auslastung Spritzbeton > 0,67) und der tatsächlichen Auslastung der Spritzbetonschale (1,0; Abbildung 33: Auslastung Spritzbeton < 0,67).

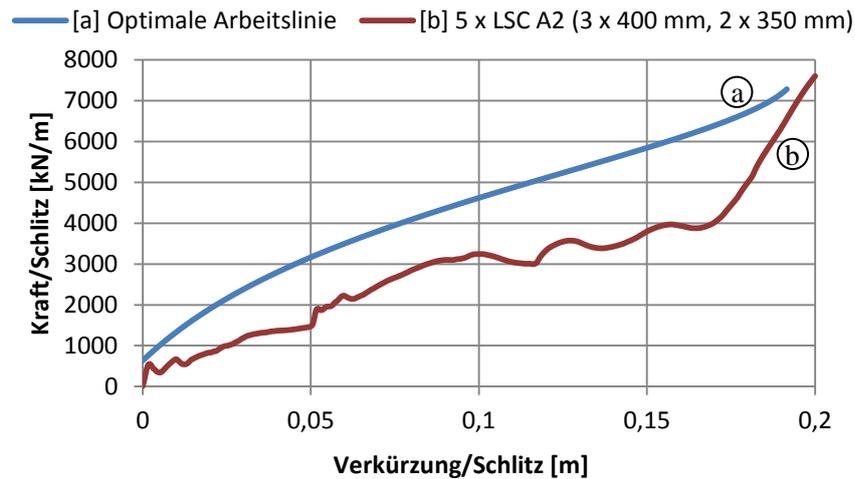


Abbildung 34: Optimale Arbeitslinie - Arbeitslinie von 5 LSC A2 (davon 2 verkürzt eingebaut)

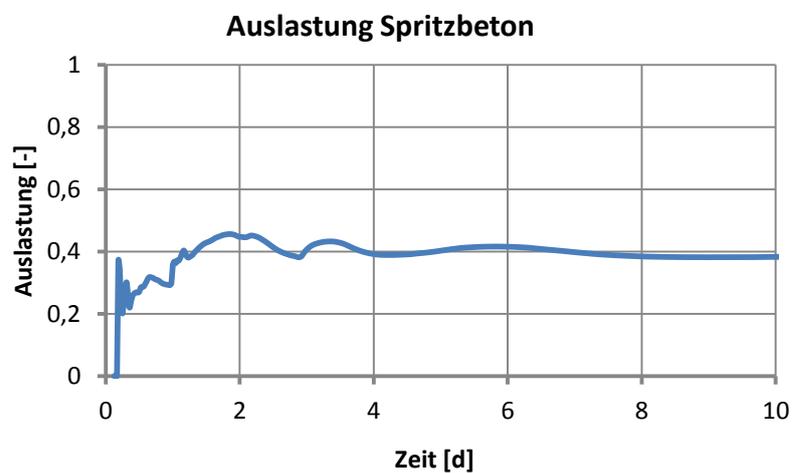


Abbildung 35: Spritzbetonauslastung bei 5 LSC A2 (3 x 400 mm, 2 x 350 mm)

6.2 Teleskopstauchrohr

Für die Berechnung der optimalen Arbeitslinie wurden die gleichen Parameter (Tabelle 6) wie beim LSC A2 verwendet. Nur die Höhe der Schlitze wurde sinngemäß der Elementhöhe angepasst.

Tabelle 6: Tabelle für die optimale Arbeitslinie (Teleskopstauchrohr)

Tunnelradius	5	[m]
Vortriebsgeschwindigkeit	4	[m/d]
Abschlagslänge	1	[m]
Spritzbetondicke	30	[cm]
Soll-Auslastung	0,67	[-]
Anzahl Schlitze	5	[-]
Höhe pro Schlitz	38	[cm]
Verschiebungscharakteristik X	20	[-]
Endverschiebung (radial)	0,2	[m]

Beim Vergleich der Arbeitslinie von 3 Teleskopstauchrohren (Versuch 78) mit der optimalen Arbeitslinie ist erkennbar, dass die Spritzbetonschale bereits früh ausgelastet ist (Abbildung 36). Die im Vergleich zum LSC zeitlich viel frühere Spritzbetonüberbeanspruchung (Abbildung 37) ist auf den geringeren Stauchweg zurückzuführen. Um den kürzeren Stauchweg der Teleskopstauchrohre auszugleichen, sind mehr Schlitze in der Tunnelschale notwendig. Um den Spritzbeton in den ersten 10 Tagen nicht überzubelasten sind bei gleichbleibender Endverschiebung 8 Schlitze (statt 5) erforderlich.

Nach einer anfänglich guten Auslastung der Spritzbetonschale fällt diese danach wieder auf unter 30 % zurück (Abbildung 37). Um die Auslastung der Spritzbetonschale zu verbessern, können, wie bereits bei den LSC beschrieben, Elemente mit verschiedenen Höhen miteinander kombiniert werden. Allerdings wurden keine Versuche mit kürzeren Teleskopstauchrohren durchgeführt, wodurch hier kein Beispiel angeführt werden kann.

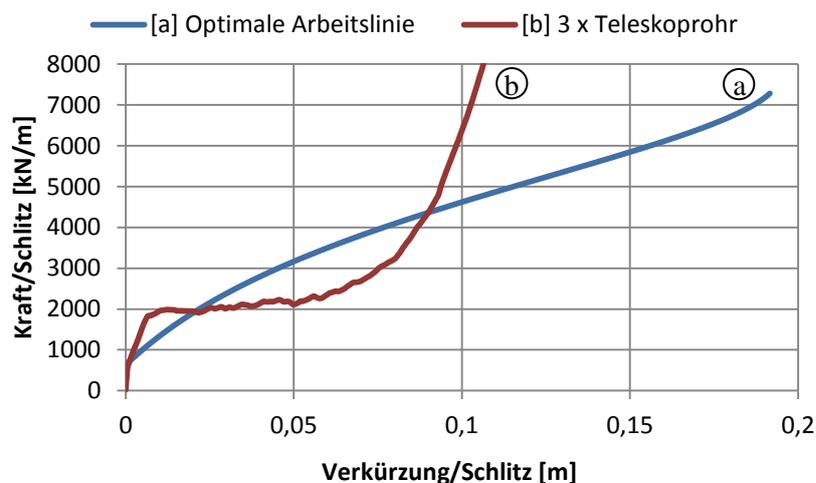
**Abbildung 36:** Optimale Arbeitslinie - Arbeitslinie von 3 Teleskopstauchrohren



Abbildung 37: Spritzbetonauslastung bei 3 Teleskopstauchrohren

7 Spaltzugbewehrung

Die Lining Stress Controller belasten die Spritzbetonfläche in den Schlitzen nur teilweise. Zur Aufnahme der infolge der Teilflächenpressung auftretenden Spaltzugkräfte ist eine entsprechende Bewehrung erforderlich.

7.1 Erforderliche Bewehrung

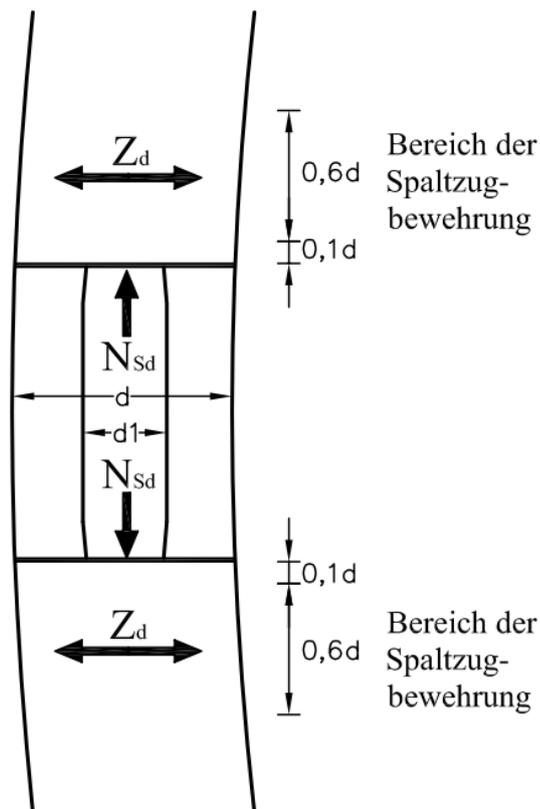


Abbildung 38: Skizze Spaltzugbewehrung

Die Spaltzugkräfte lassen sich näherungsweise mit folgender Formel berechnen (ÖNORM B4700):

$$Z_d = 0,3 * N_{Sd} * \left(1 - \frac{d_1}{d}\right) \quad \text{Formel 21}$$

Für die Normalkraft N_{Sd} wird die Kraft angesetzt, die pro Abschlag durch die Spritzbetonschale nach 28 Tagen aufgenommen werden kann.

$$N_{Sd} = \beta_{28} * d * b_{Schl} \quad \text{Formel 22}$$

mit:

β_{28} ... Mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen

b_{Schl} ... Schlitzbreite

Die erforderliche Spaltzugbewehrung errechnet sich wie folgt:

$$A_{erf} = \frac{Z_d}{f_{yd}} \quad \text{Formel 23}$$

Die Spaltzugbewehrung ist im Bereich zwischen 0,1 d und 0,7 d zu verteilen (ÖNORM B4700). Eine Dehnung in Längsrichtung wird aufgrund der durchgehenden Spritzbetonschale verhindert, eine Längsbewehrung ist dementsprechend nicht erforderlich.

7.2 Spaltzugwendel

Eine Möglichkeit, die Spaltzugbewehrung einzubauen, ist, sie als Wendel an der Unterseite der LSC-Platten anzuschweißen.

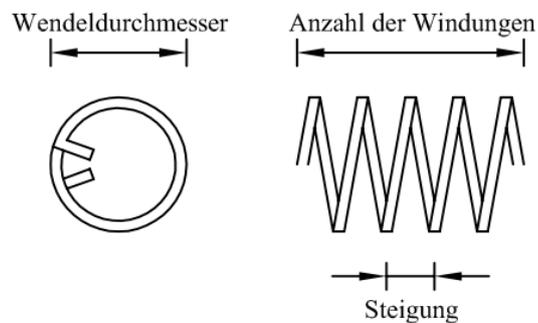


Abbildung 39: Detail Spaltzugwendel

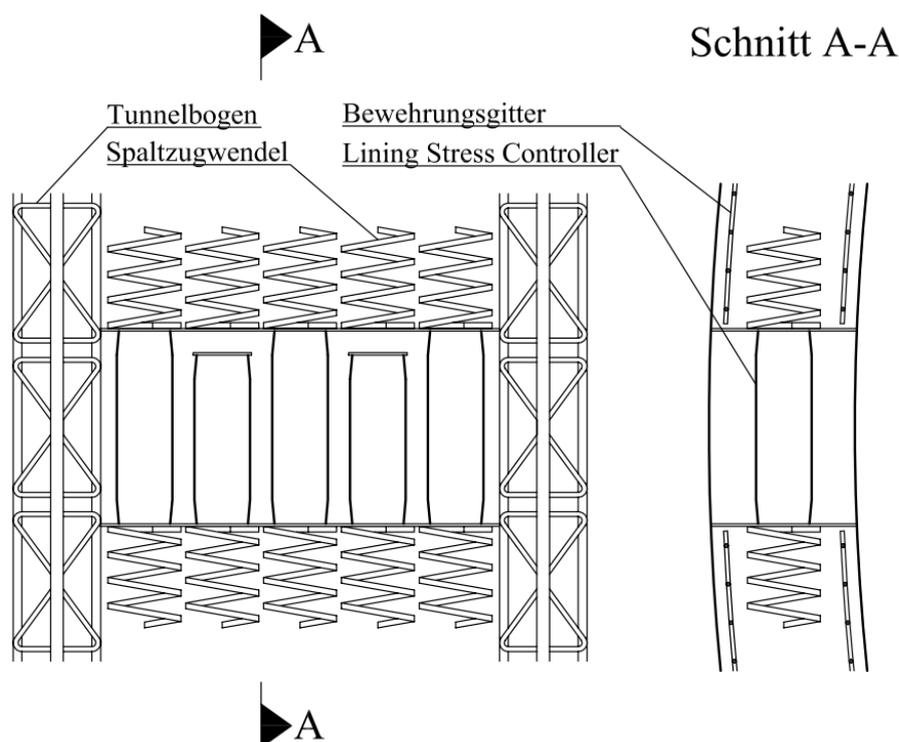


Abbildung 40: Skizze Stützmittel

7.3 Berechnungsbeispiel

Die Berechnung der Spaltzugbewehrung erfolgt für die im Kapitel 6.1 gewählten Parameter. Die mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen beträgt 40 MPa, die Dicke der Spritzbetonschale d beträgt 30 cm und für die Dicke der belasteten Teilfläche d_l wird der äußere Durchmesser der LSC (11,43 cm) eingesetzt.

7.3.1 Erforderliche Bewehrung

Normalkraft:

$$N_{sd} = 40 \text{ MPa} * 0,3 * 1,0 = 12 \text{ MN}$$

Spaltzugkräfte:

$$Z_d = 0,3 * N_{sd} * \left(1 - \frac{d_l}{d}\right) = 0,3 * 12\,000 * \left(1 - \frac{11,43}{30}\right) = 2230 \text{ kN/Element}$$

Erforderliche Spaltzugbewehrung:

$$A_{erf} = \frac{Z_d}{f_{yd}} = \frac{2230 * 10}{550/1,15} = 46,63 \text{ cm}^2/\text{Element}$$

$$A_{erf,LSC} = \frac{A_{erf}}{n_{LSC}} = \frac{46,63}{5} = 9,33 \text{ cm}^2/\text{LSC}$$

Bereich der Spaltzugbewehrung:

$$0,1 * d = 0,1 * 30 = 3 \text{ cm}$$

$$0,7 * d = 0,7 * 30 = 21 \text{ cm}$$

In Tabelle 7 ist die erforderliche Spaltzugbewehrung für den LSC A2 bei verschiedene Abschlaglängen und Spritzbetondicken dargestellt. Die Spaltzugbewehrung wurde mit einer 28-Tage Betondruckfestigkeit von 40 MPa berechnet.

Tabelle 7: Spaltzugbewehrung

Spaltzugbewehrung [cm ²]		Abschlaglänge		
		0,7 m	1 m	1,3 m
Spritzbetondicke	25 cm	23,83	34,05	44,26
	30 cm	32,62	46,63	60,57
	35 cm	41,40	59,14	76,88
	40 cm	50,18	71,68	93,19

7.3.2 Spaltzugwendel

Gewählter Stabdurchmesser d_A :	\emptyset 12 mm
Gewählter Wendeldurchmesser d_W :	15 cm
Gewählte Höhe h_W :	20 cm

Tabelle 8: Mindestwerte der Wendeldurchmesser nach Eurocode 2

Stabdurchmesser	Mindestwerte der Wendeldurchmesser
$\emptyset \leq 16$ mm	4 \emptyset
$\emptyset > 16$ mm	7 \emptyset

Querschnittsfläche der Bewehrung pro Windung:

$$A_{win} = 0,6^2 * \pi * 2 = 2,26 \text{ cm}^2$$

Erforderliche Windungen:

$$n_{win} = \frac{A_{erf,LSC}}{A_{win}} = \frac{9,33}{2,26} = 4,13 \rightarrow 5 \text{ Windungen}$$

Steigung:

$$s_W = \frac{h_W}{n_{win}} = \frac{20}{5} = 4 \text{ cm}$$

8 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war die Optimierung der Lining Stress Controller durch eine zementgebundene poröse Füllung. Das Ergebnis zeigte, dass durch das Füllmaterial die Lastaufnahme der Lining Stress Controller erhöht, die Oszillation der Arbeitslinie verringert und ein symmetrisches Beulen des Stauchrohres gewährleistet wird. Beim gefüllten Lining Stress Controller sind keine Führungsrohre erforderlich, wodurch die Herstellung vereinfacht wird.

Es wurde eine optimale Arbeitslinie ermittelt, um das Verhalten der Lining Stress Controller beurteilen zu können. Diese Arbeitslinie gibt die Kraft an, die abhängig von der aufgezwungenen Radialverschiebung des Ausbaus immer zu einer konstanten Auslastung des Spritzbetons führt. Die Arbeitslinie der Stauchelemente wurde systematisch mit der optimalen Arbeitslinie verglichen, um eine Abschätzung der Spritzbetonauslastung zu erhalten. Durch die Kombination von Lining Stress Controllern mit verschiedenen Einbaulängen ist eine annähernd konstante Spritzbetonauslastung erreichbar.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein weiteres Stauchelement entwickelt. Dieses Stauchelement wird als Teleskopstauchrohr bezeichnet. Der Vorteil dieser Stauchelemente ist eine geringe Oszillation in der Arbeitslinie. Der Nachteil der Teleskopstauchrohre gegenüber den Lining Stress Controllern ist der kürzere Stauchweg, wodurch bei gleichbleibender Endverschiebung mehr Schlitze in der Spritzbetonschale erforderlich sind. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich der Verformungsweg der Teleskopstauchrohre verlängern lässt, womit durchaus weiteres Entwicklungs- und Anpassungspotential vorhanden ist.

9 Literaturverzeichnis

Bochumer Eisenhütte

Stauchelement WABE – mit Widerstandsverstärkung.

URL: http://www.heintzmann.eu/fileadmin/Dateien_Unternehmen/BE/PDF/Innopreis_low.pdf [07.06.2011]

Eurocode 2 (2009)

Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

hiDCon

Materialeigenschaften der hiDCon-Elemente

URL: http://www.hidcon.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=60&lang=de [07.06.2011]

Kovári K. (2009)

Design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks. World Tunnel Congress 2009, Budapest

Moritz B. (1999)

Ductile Support System for Tunnels in Squeezing Rock. Dissertation, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz.

ÖNORM B4700 (2001)

Stahlbetontragwerke – EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Pöchlacker H. (1974)

Moderner Tunnelvortrieb in sehr stark druckhaftem Gebirge. Porr Nachrichten 57/58.

Rabcewicz L. v. (1950)

Die Hilfgewölbebauweise. Dissertation, Technische Hochschule Graz.

Radončić N. (2011)

Tunnel design and prediction of system behaviour in weak ground. Dissertation, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz.

Radončić N., Moritz B., Schubert W. (2009)

Ductile support design. *Geomechanics and tunnelling* 2 (2009), Nr. 5, Seiten 561-577. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Schubert, P (1988)

Beitrag zum rheologischen Verhalten von Spritzbeton. *Felsbau* 6 (1988), Nr. 3, Seiten 150-153. Verlag Glückauf, Essen

Schubert W. (2008)

Design of ductile tunnel linings. 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, 29. Juni – 2. Juli 2008, San Francisco.

Schubert W., Riedmüller G. (1995)

Geotechnische Nachlese eines Verbruches – Erkenntnisse und Impulse. In Semprich S. (ed.): *Beiträge zum 10. Christian Veder Kolloquium – Innovationen in der Geotechnik*, Seiten 59-68. Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.

Solexperts (2005)

Knautschelemente Lötschberg Basistunnel. Technischer Bericht A-1569.

Solexperts (2010)

hiDCon – Elemente im Tunnelbau.

URL: http://www.solexperts.com/pdfs/en/geo_hdc_en.pdf [07.06.2011]

Sulem J., Panet M., Guenot A. (1987)

An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* Vol. 24 (1987), Nr. 3, Seiten 155-164.

Anhang

Materialkennwerte

Stahl der Stauchelemente

Stahlqualität: S355

Dichte der Materialien

Material	Dichte ρ_D [g/cm ³]
Zement	1,07
Liapor 1-4 mm	0,44
Liapor 4-8 mm	0,37
Sand < 2 mm	1,56
Wasser	1,00

Die Dichte der Materialien wurde im Labor ermittelt.

Liapor 1-4 mm

Dichte	[g/cm ³]	Bestimmung
Lockerste Lagerung ρ_{DL}	0,437	Lagerungsdichte
Normale Lagerung ρ_D	0,44	Lagerungsdichte
Dichteste Lagerung ρ_U	0,46	Lagerungsdichte
Korndichte ρ_S	1,06	Pyknometer-Test
Rohdichte ρ_R	2,435	Pyknometer-Test
Korndichte inkl. offene Poren	0,67	Abmessen und Abwiegen

Porosität (Porenanteil)	n [-]
Poren gesamt	0,819
Haufwerksporen	0,343
Haufwerks - und offene Poren	0,585
offene Poren	0,242
geschlossene Poren	0,234

Liapor 4-8 mm

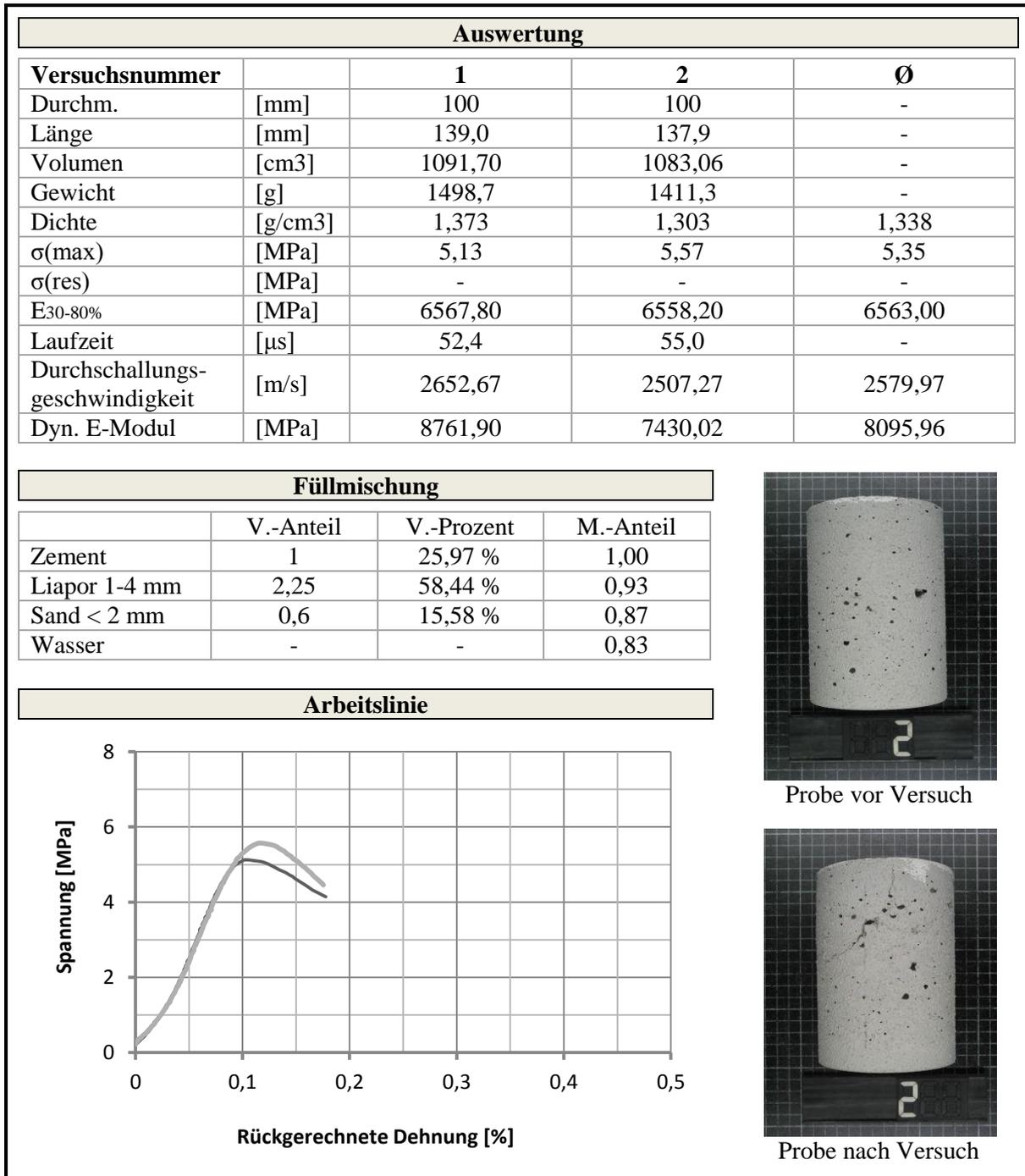
Dichte	[g/cm ³]	Bestimmung
Normale Lagerung ρ_D	0,37	Lagerungsdichte
Rohdichte ρ_R	2,435	Pyknometer-Test
Korndichte inkl. offene Poren	0,58	Abmessen und Abwiegen

Porosität (Porenanteil)	n [-]
Poren gesamt	0,848
Haufwerksporen	0,362

Volumenanteil

Der Volumenanteil wird für das Trockenvolumen des Füllmaterials angegeben.

Füllmaterial: Einachsialer Druckversuch



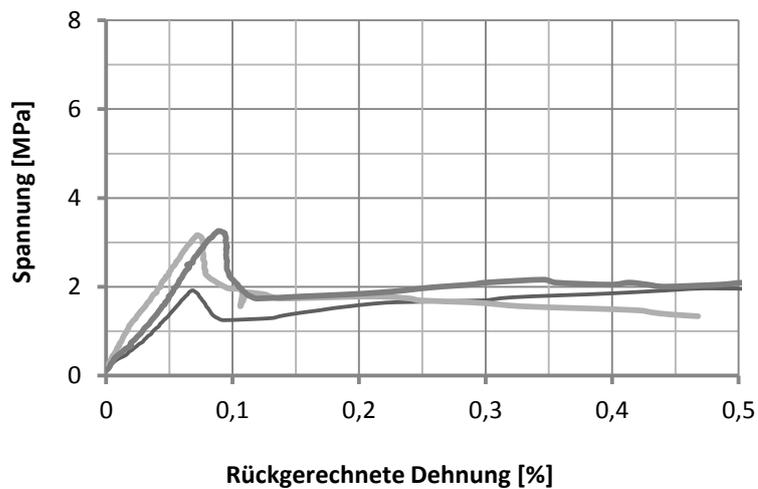
Auswertung

Versuchsnummer		3	4	5	Ø
Durchm.	[mm]	100	100	100	-
Länge	[mm]	141,0	142,0	141,4	-
Volumen	[cm ³]	1107,41	1115,27	1110,55	-
Gewicht	[g]	942,9	944,4	943,0	-
Dichte	[g/cm ³]	0,851	0,847	0,849	0,849
$\sigma(\max)$	[MPa]	1,96	3,16	3,26	2,79
$\sigma(\text{res})$	[MPa]	1,75	1,62	1,99	1,79
E _{30-80%}	[MPa]	2781,52	4005,26	3897,60	3561,46
Laufzeit	[μs]	62,4	62,3	61,9	-
Durchschallungs- geschwindigkeit	[m/s]	2259,62	2279,29	2284,33	2274,41
Dyn. E-Modul	[MPa]	3943,18	3990,25	4018,94	3984,12

Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	21,05 %	1,00
Liapor 1-4 mm	3,75	78,95 %	1,54
Sand < 2 mm	0	0,00 %	0,00
Wasser	-	-	0,68

Arbeitslinie



Probe vor Versuch



Probe nach Versuch

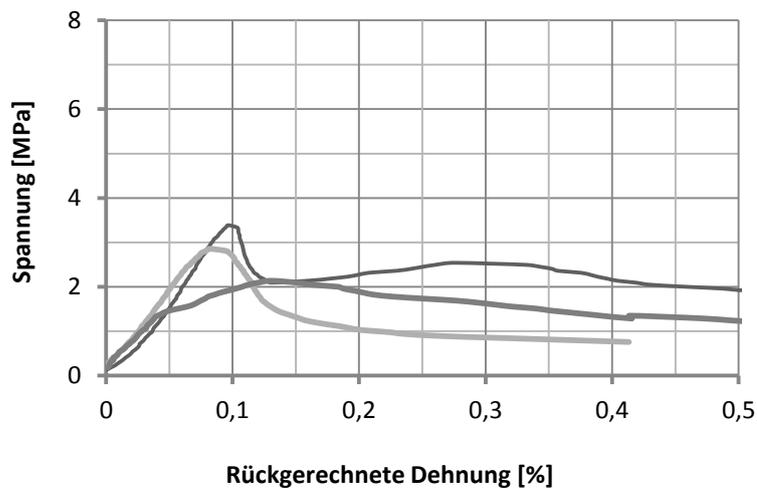
Auswertung

Versuchsnummer		6	7	8	Ø
Durchm.	[mm]	100	100	100	-
Länge	[mm]	140,7	139,6	141,5	-
Volumen	[cm ³]	1105,06	1096,42	1111,34	-
Gewicht	[g]	1123,7	1057,9	1074,4	-
Dichte	[g/cm ³]	1,017	0,965	0,967	0,983
$\sigma(\max)$	[MPa]	3,39	2,85	2,14	2,79
$\sigma(\text{res})$	[MPa]	2,20	0,70	1,00	1,30
E _{30-80%}	[MPa]	4325,48	3747,41	1777,61	3283,50
Laufzeit	[μs]	61,6	62,2	64,4	-
Durchschallungs- geschwindigkeit	[m/s]	2284,09	2244,37	2197,20	2241,89
Dyn. E-Modul	[MPa]	4811,88	4408,40	4233,33	4484,54

Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	17,39 %	1,00
Liapor 1-4 mm	3,75	65,22 %	1,54
Sand < 2 mm	1	17,39 %	1,46
Wasser	-	-	0,8

Arbeitslinie



Probe vor Versuch



Probe nach Versuch

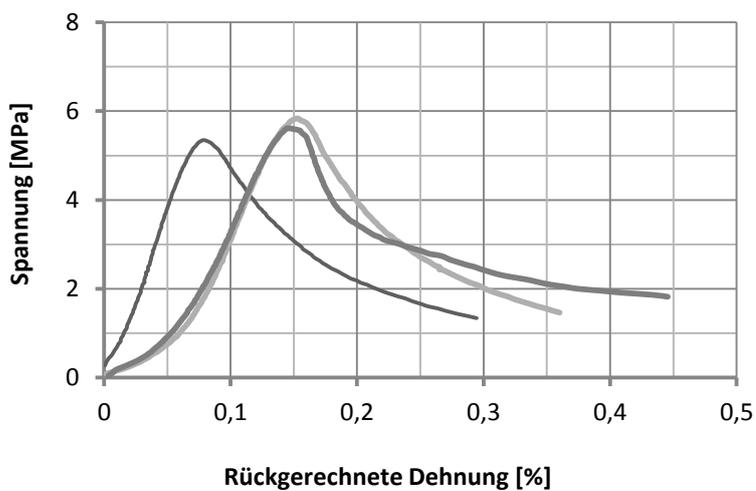
Auswertung

Versuchsnummer		13	14	15	Ø
Durchm.	[mm]	100	100	100	-
Länge	[mm]	138,4	138,6	138,6	-
Volumen	[cm ³]	1086,99	1088,56	1088,56	-
Gewicht	[g]	1254,8	1286,4	1285,5	-
Dichte	[g/cm ³]	1,154	1,182	1,181	1,172
$\sigma(\max)$	[MPa]	5,35	5,84	5,62	5,60
$\sigma(\text{res})$	[MPa]	1,20	1,20	1,60	1,33
E _{30-80%}	[MPa]	8383,06	6560,44	5835,28	6926,26
Laufzeit	[μs]	57,5	57,7	57,5	-
Durchschallungs- geschwindigkeit	[m/s]	2406,96	2402,08	2410,43	2406,49
Dyn. E-Modul	[MPa]	6066,06	6184,71	6223,45	6158,07

Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	25,97 %	1,00
Liapor 1-4 mm	2,25	58,44 %	0,93
Sand < 2 mm	0,6	15,58 %	0,87
Wasser	-	-	0,8

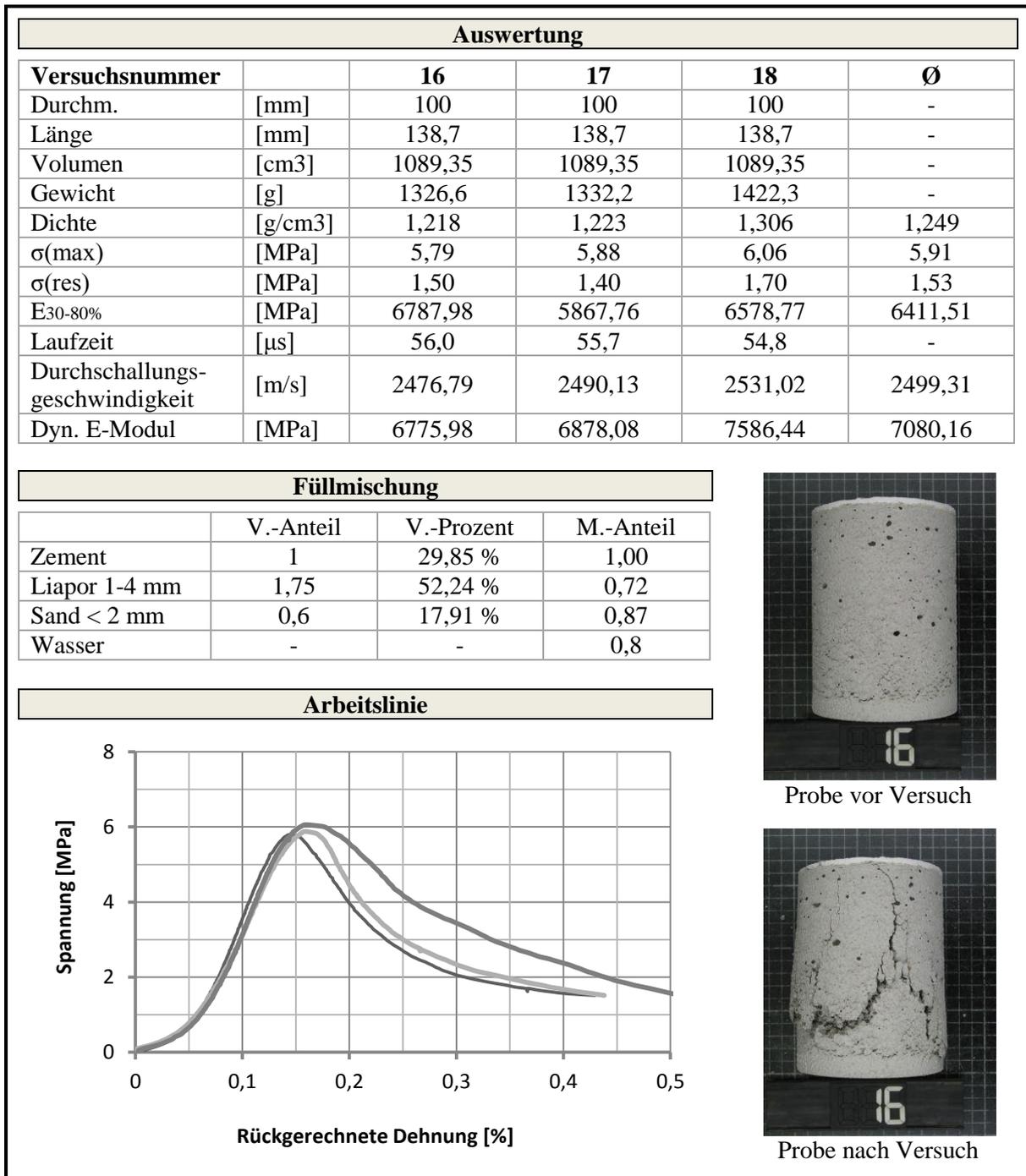
Arbeitslinie



Probe vor Versuch



Probe nach Versuch



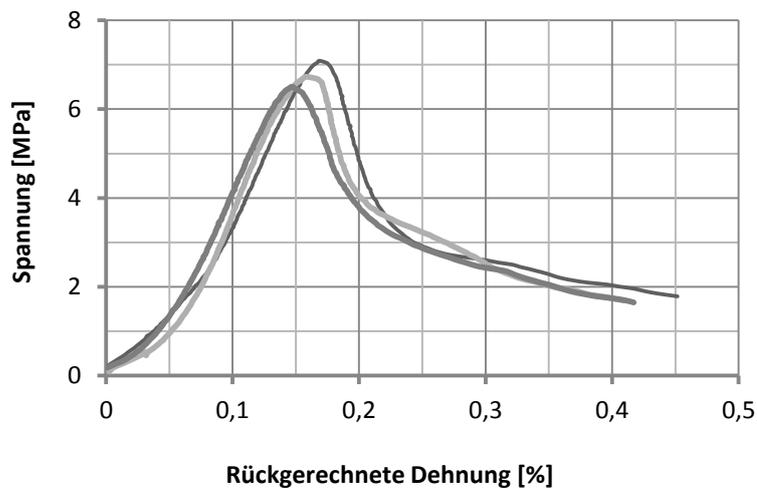
Auswertung

Versuchsnummer		19	20	21	Ø
Durchm.	[mm]	100	100	100	-
Länge	[mm]	138,2	138,5	138,6	-
Volumen	[cm ³]	1085,42	1087,78	1088,56	-
Gewicht	[g]	1276,0	1282,3	1265,9	-
Dichte	[g/cm ³]	1,176	1,179	1,163	1,172
$\sigma(\max)$	[MPa]	7,09	6,73	6,51	6,77
$\sigma(\text{res})$	[MPa]	1,40	1,40	1,40	1,40
E _{30-80%}	[MPa]	5603,80	6825,77	6075,90	6168,49
Laufzeit	[µs]	54,4	54,6	54,6	-
Durchschallungs- geschwindigkeit	[m/s]	2540,44	2536,63	2538,46	2538,51
Dyn. E-Modul	[MPa]	6881,65	6879,96	6796,87	6852,82

Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	22,99 %	1,00
Liapor 1-4 mm	2,75	63,22 %	1,13
Sand < 2 mm	0,6	13,79 %	0,87
Wasser	-	-	0,8

Arbeitslinie



Probe vor Versuch



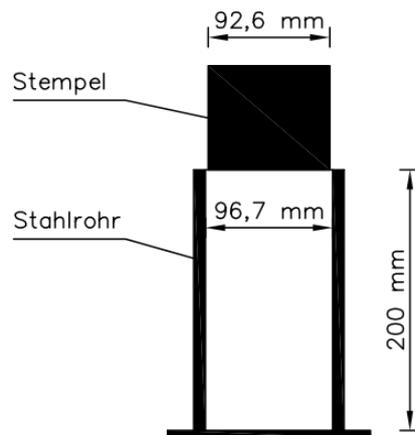
Probe nach Versuch

Füllmaterial: Ödometerversuch

Abmessungen

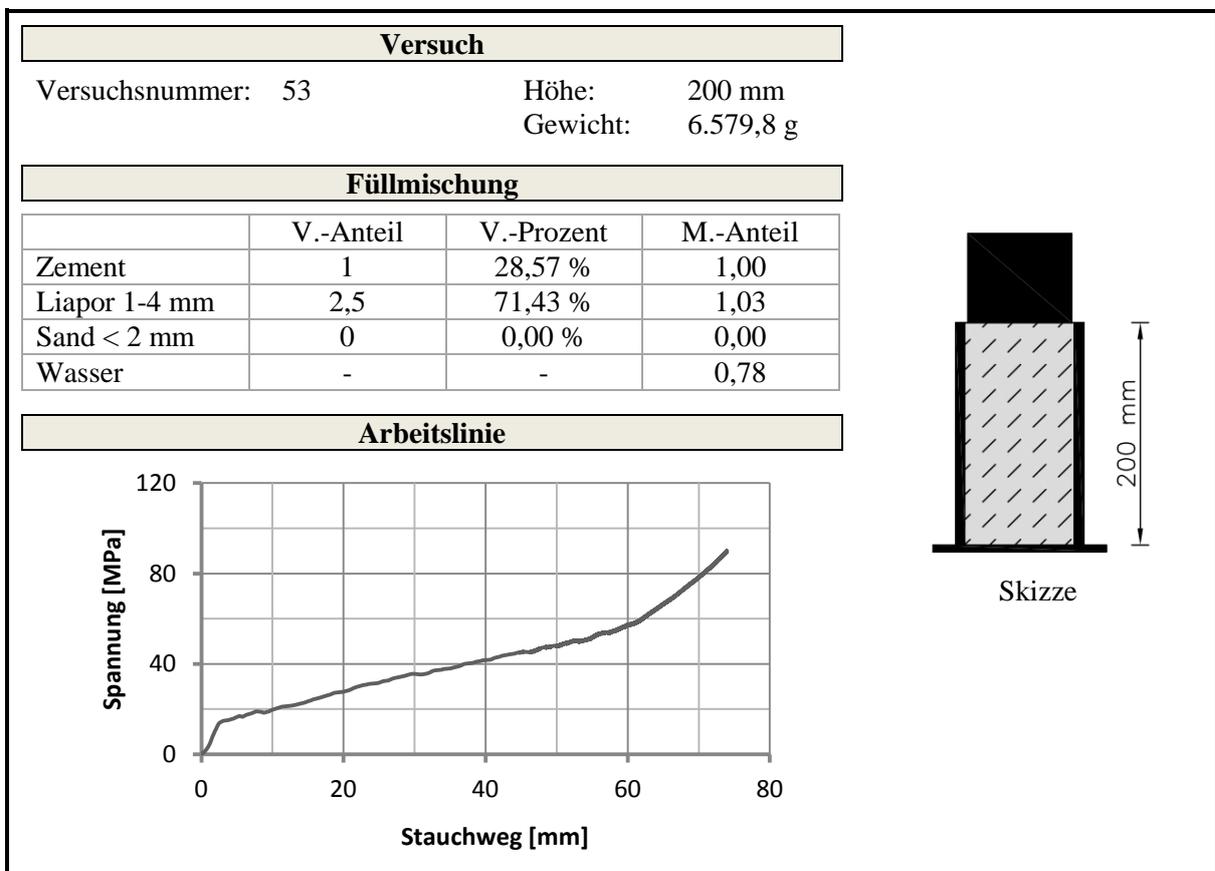
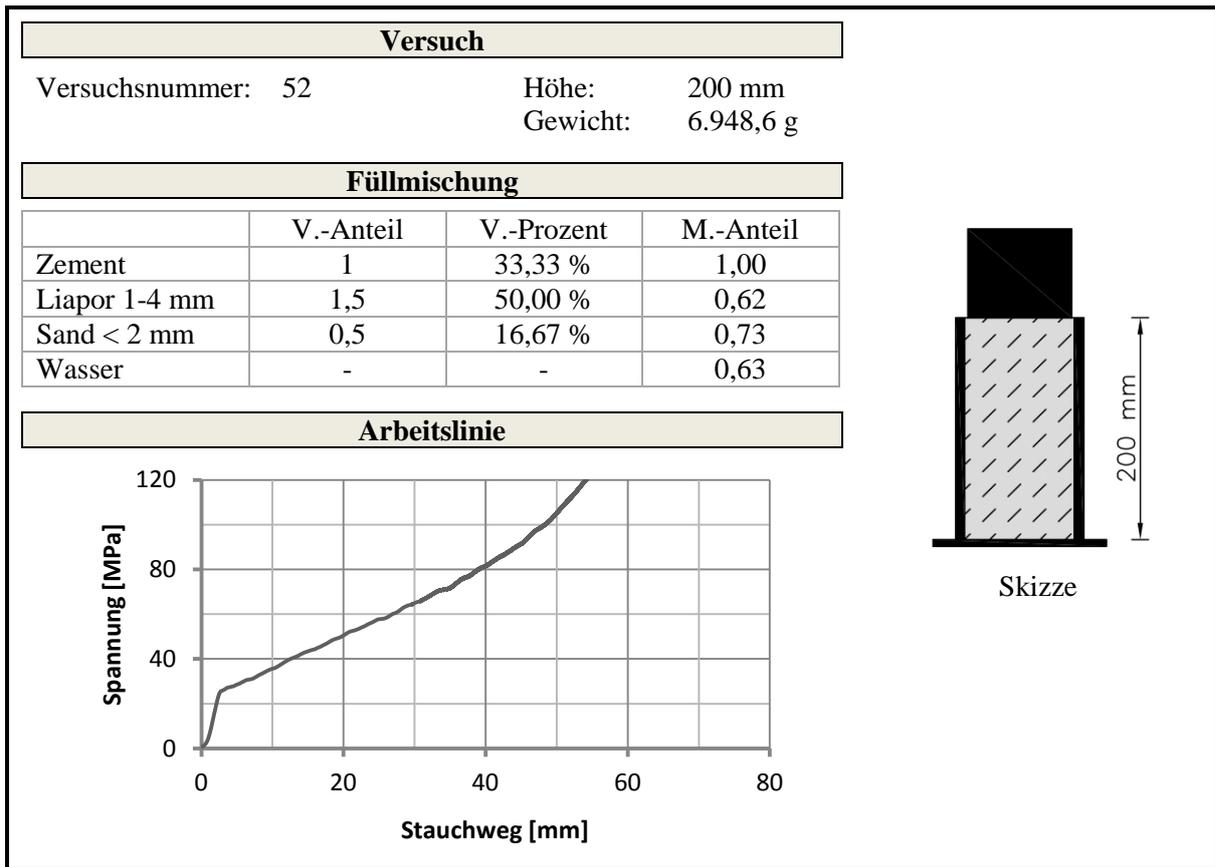
	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Stahlrohr	114,3	96,7	8,8	200
Stempel	92,6	-	-	-

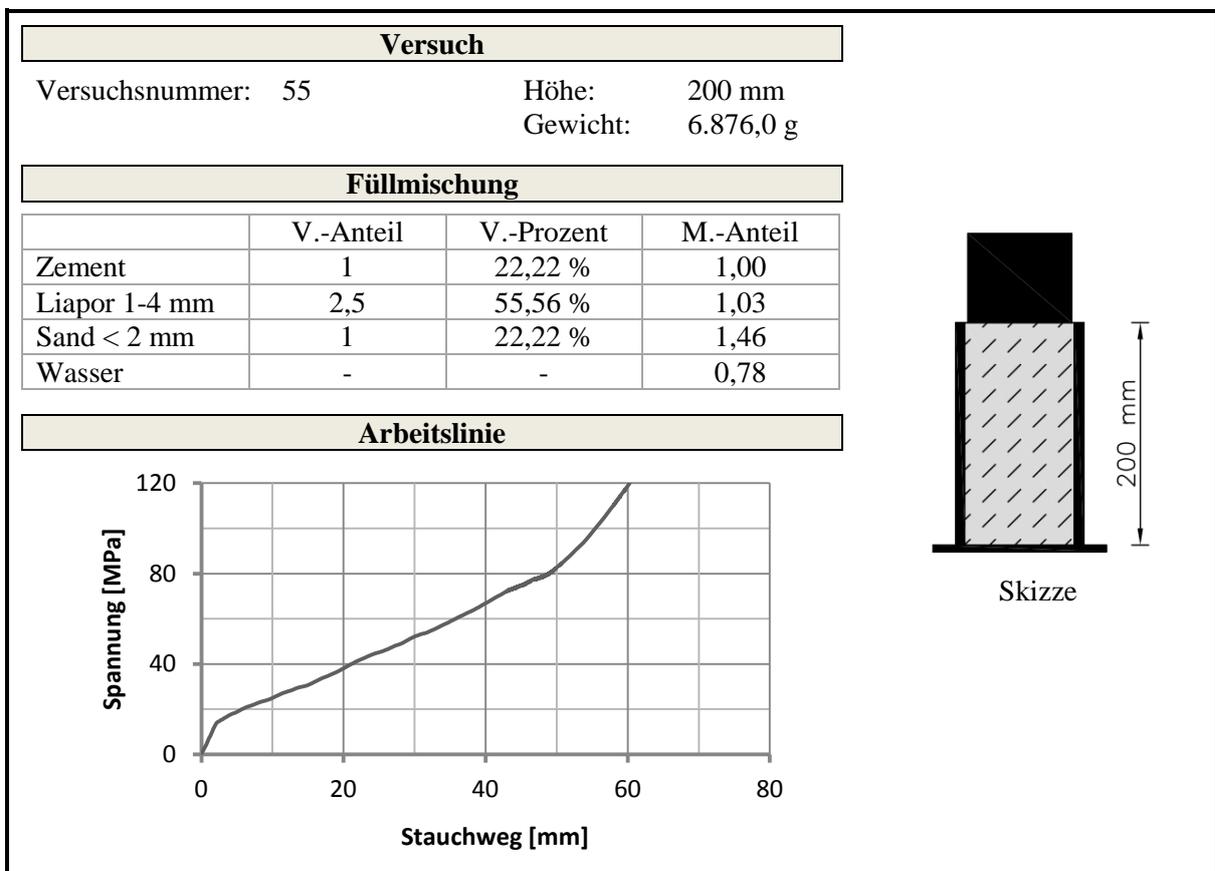
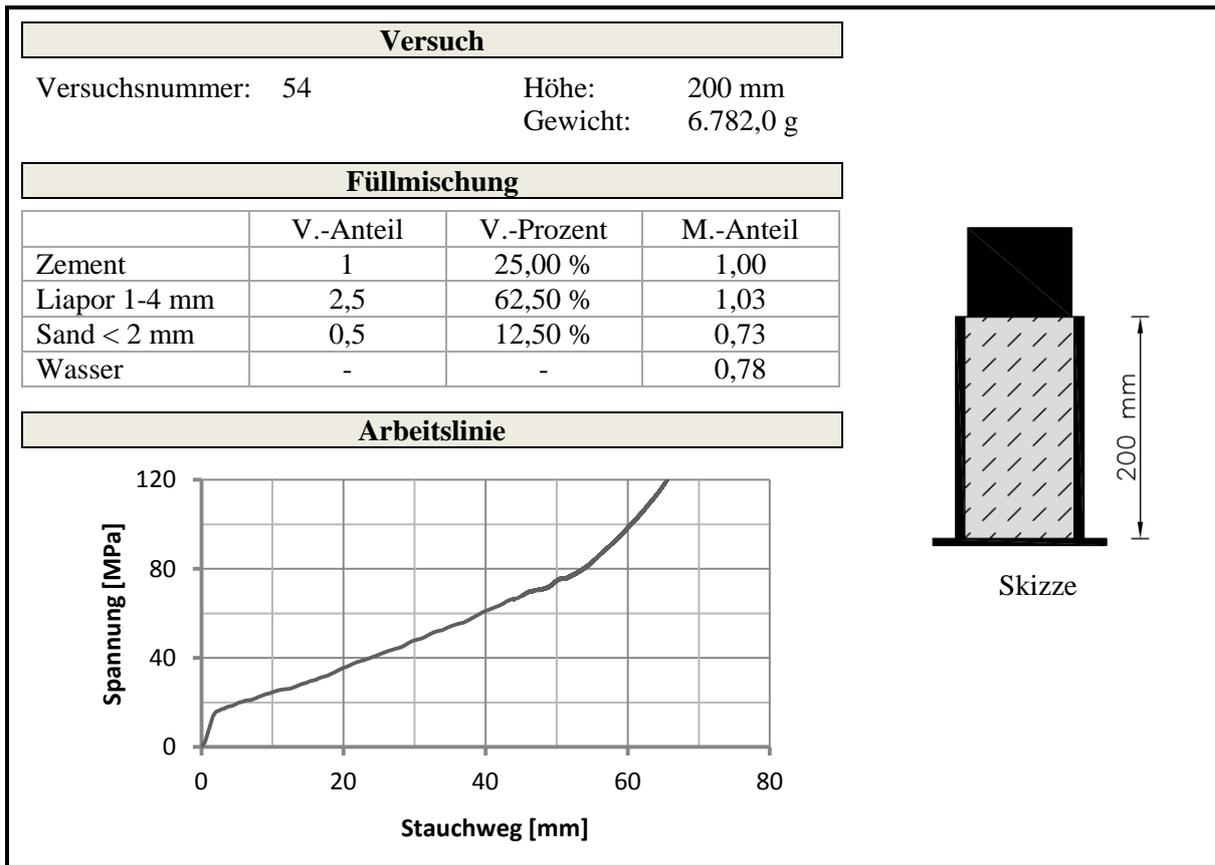
Skizze

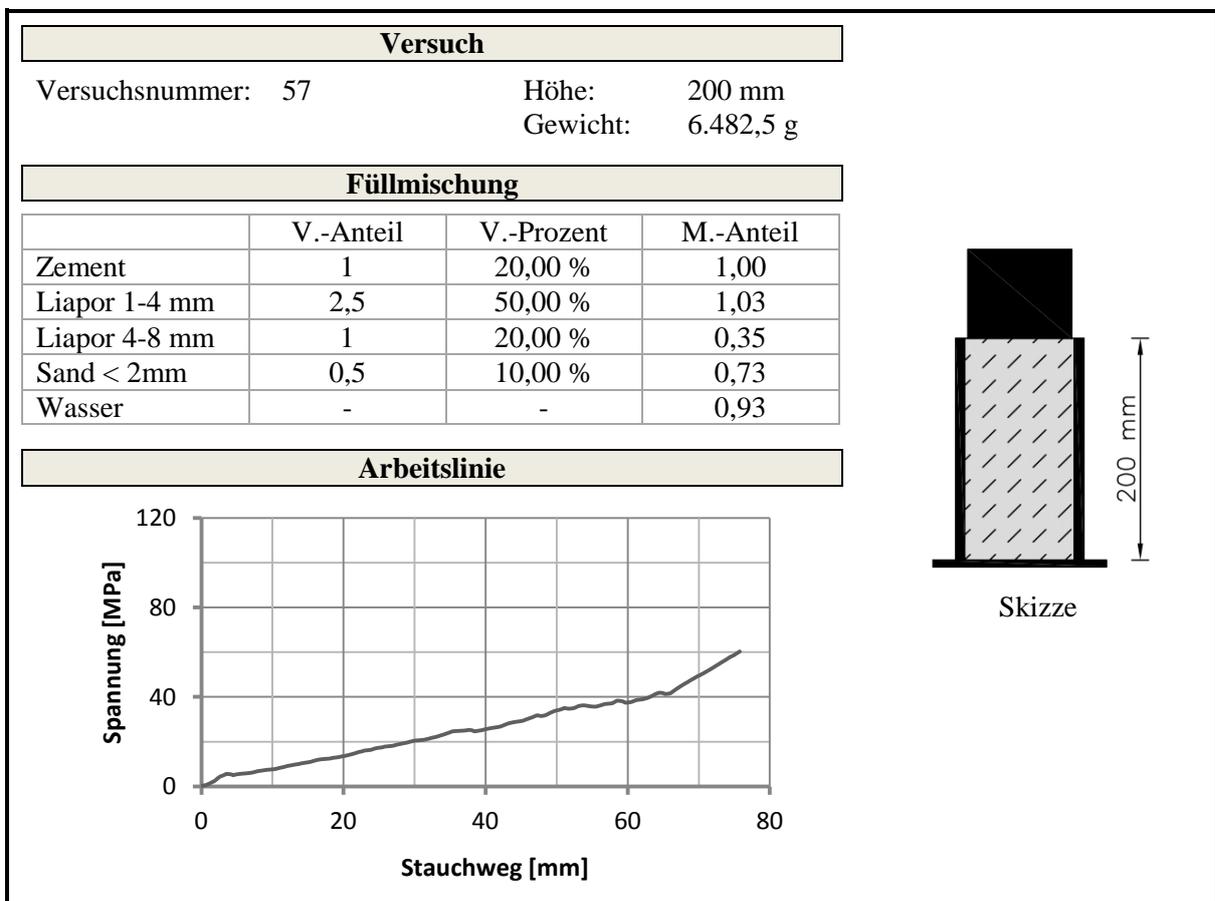
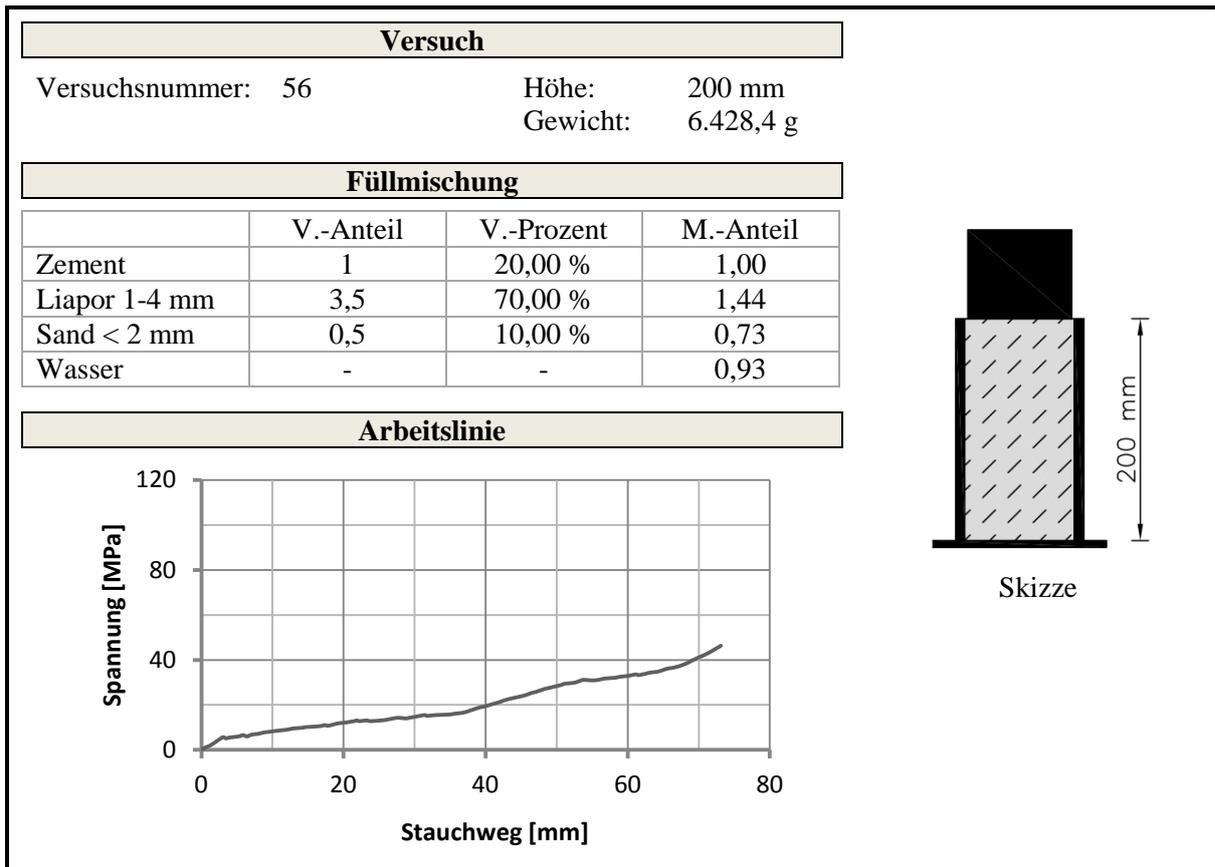


Fotos







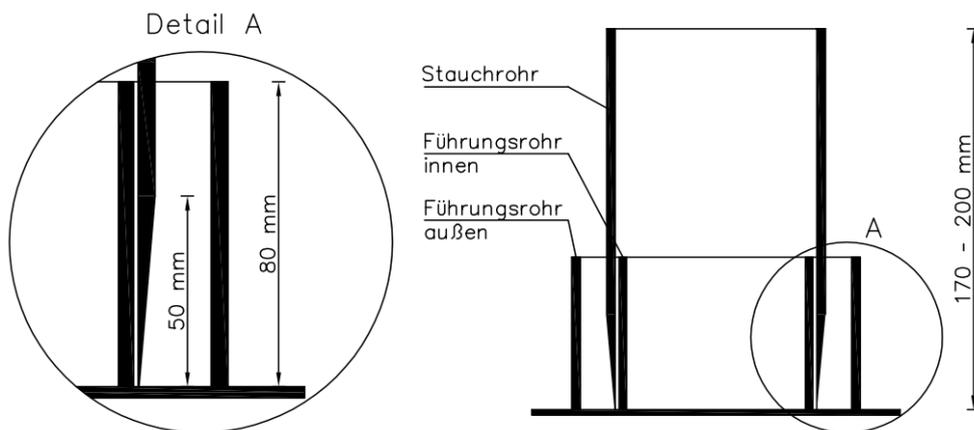


Einseitig abgeschrägtes Stauchrohr

Abmessungen

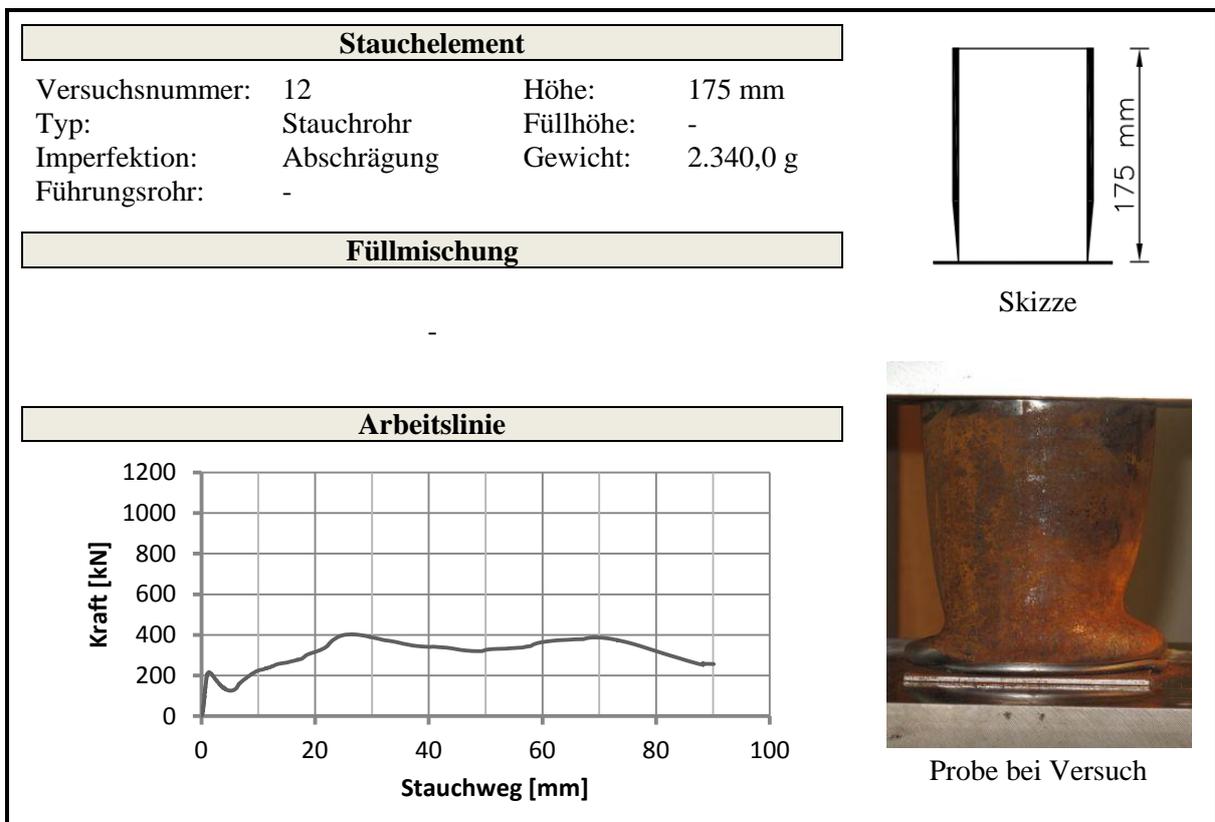
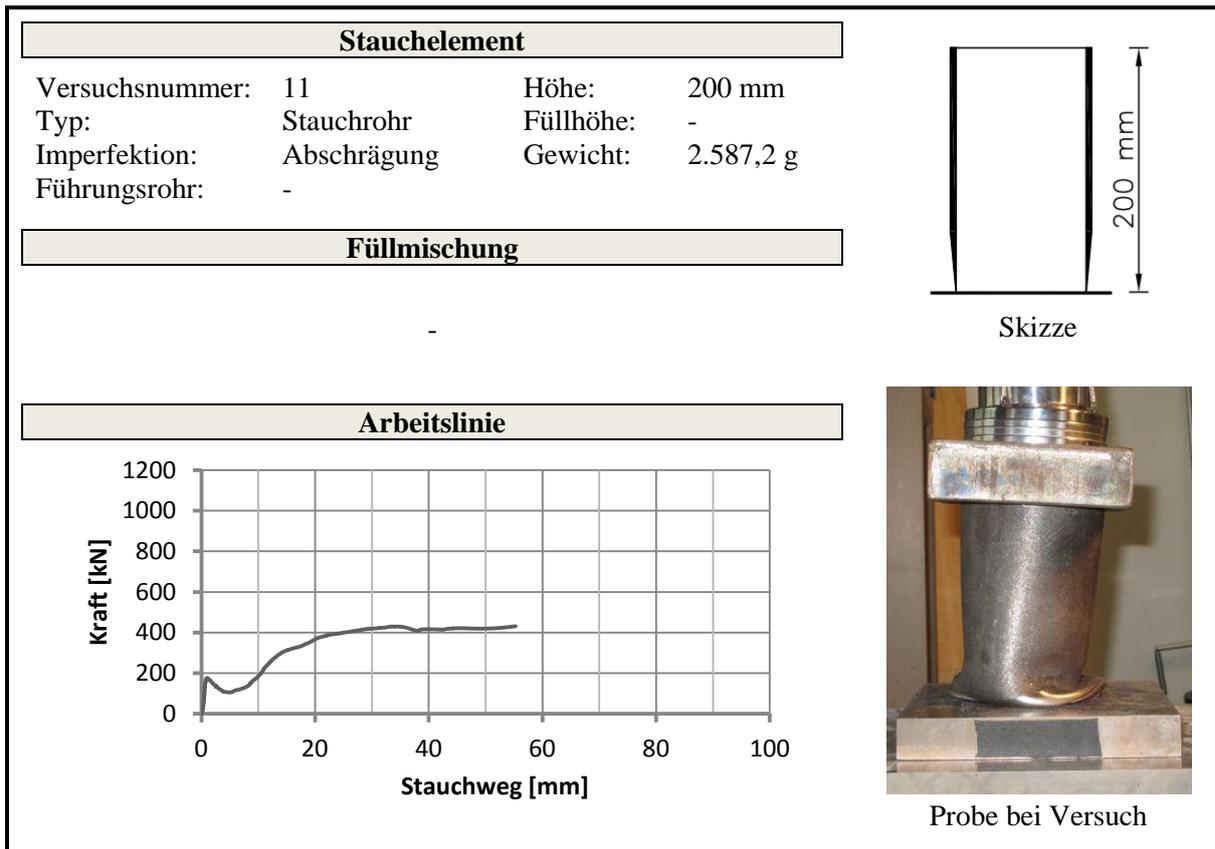
	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Stauchrohr	114,3	105,3	4,5	170 – 200
Imperfektion	-	-	0,3 – 4,5	50
Führungsrohr innen	103,0	95,0	4,0	80
Führungsrohr außen	152,4	143,4	4,5	80

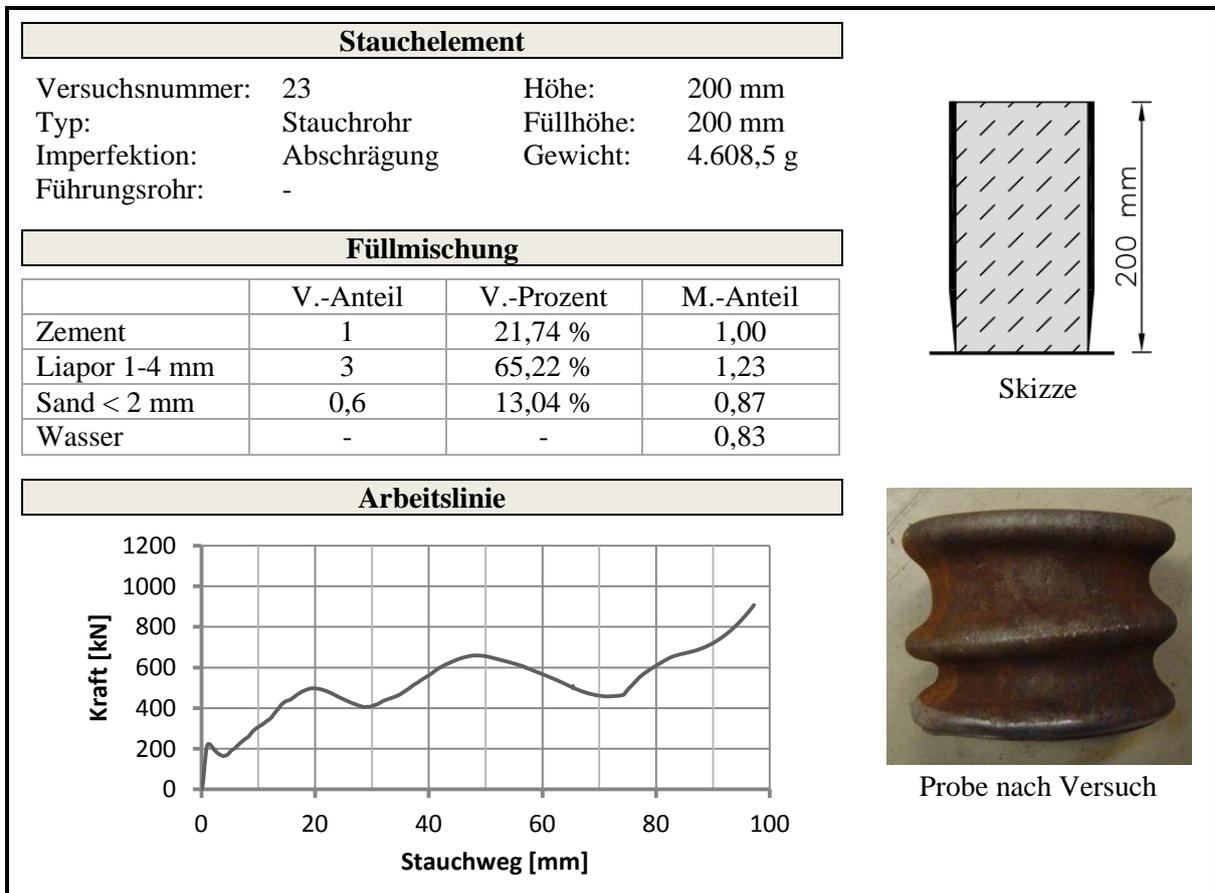
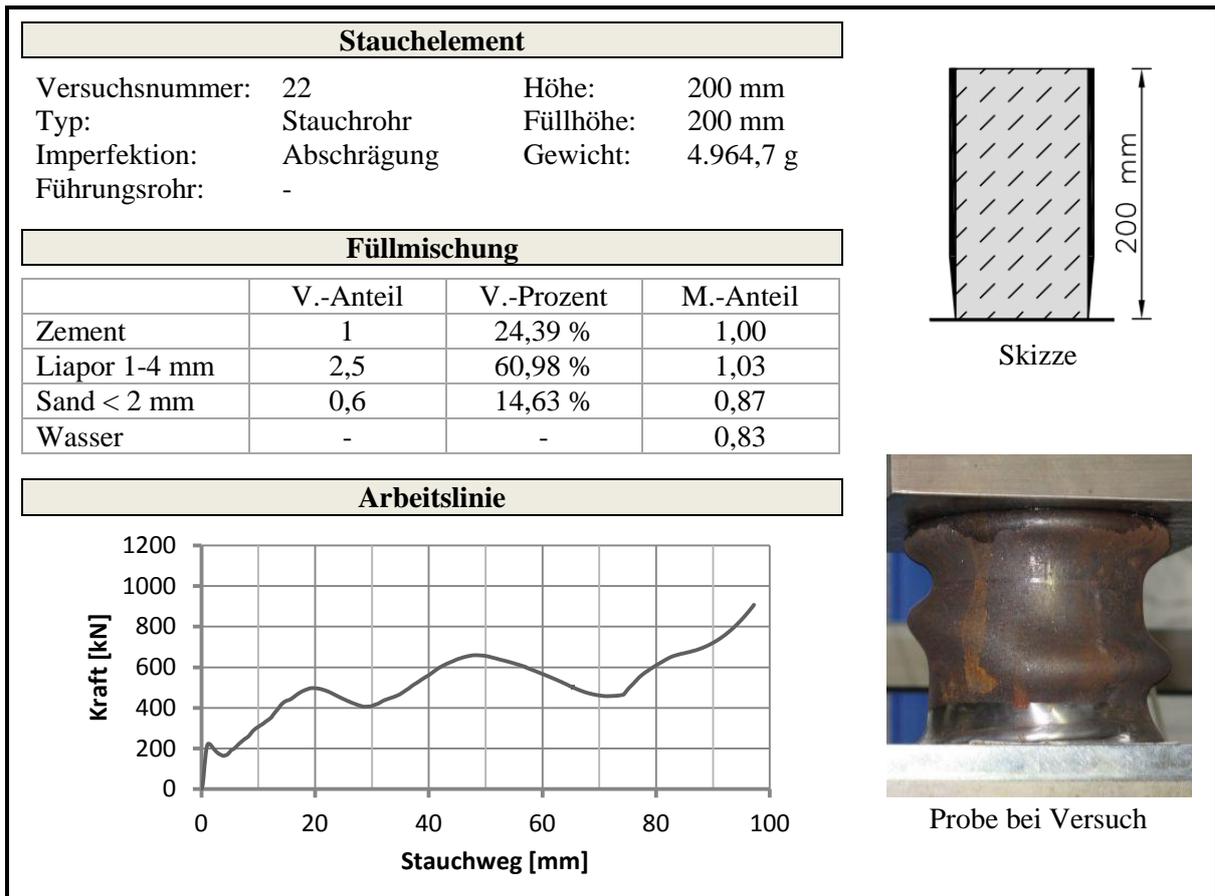
Skizze

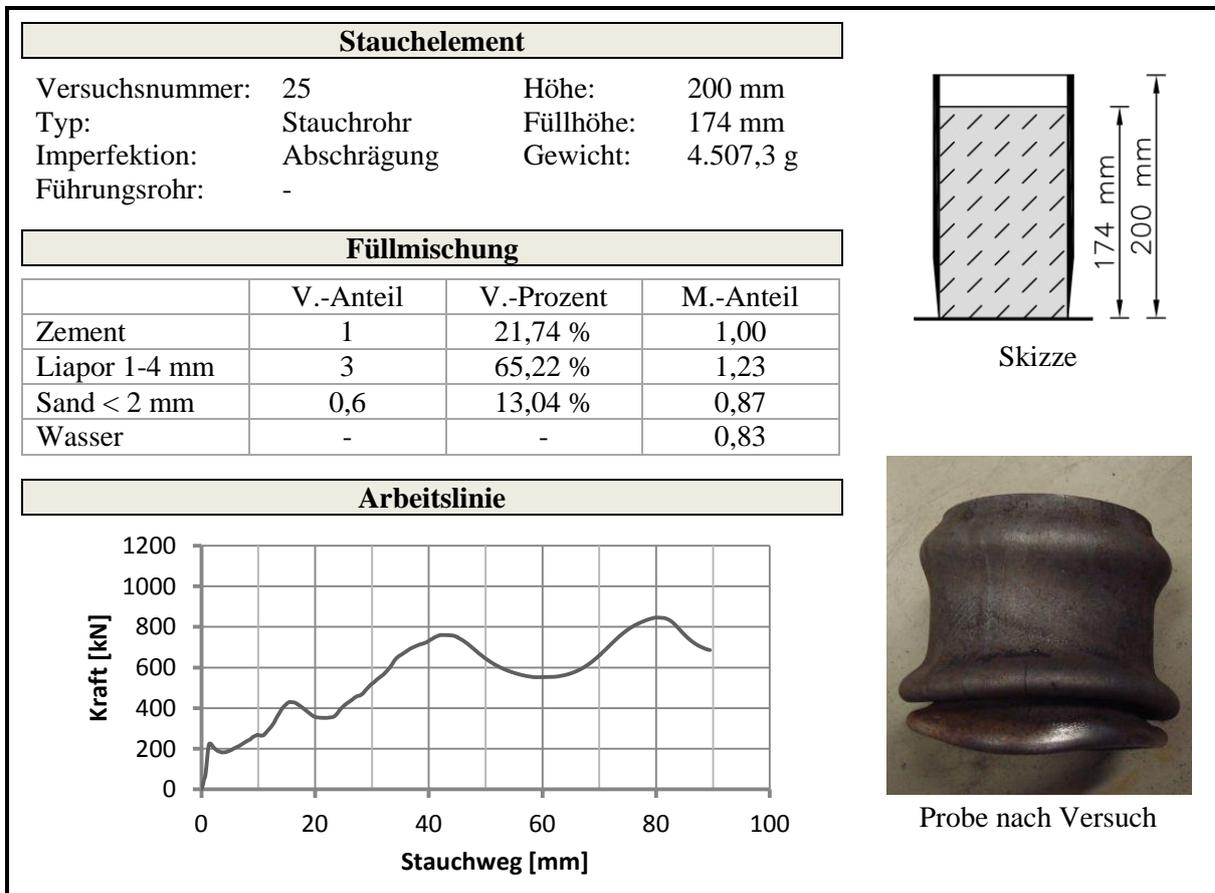
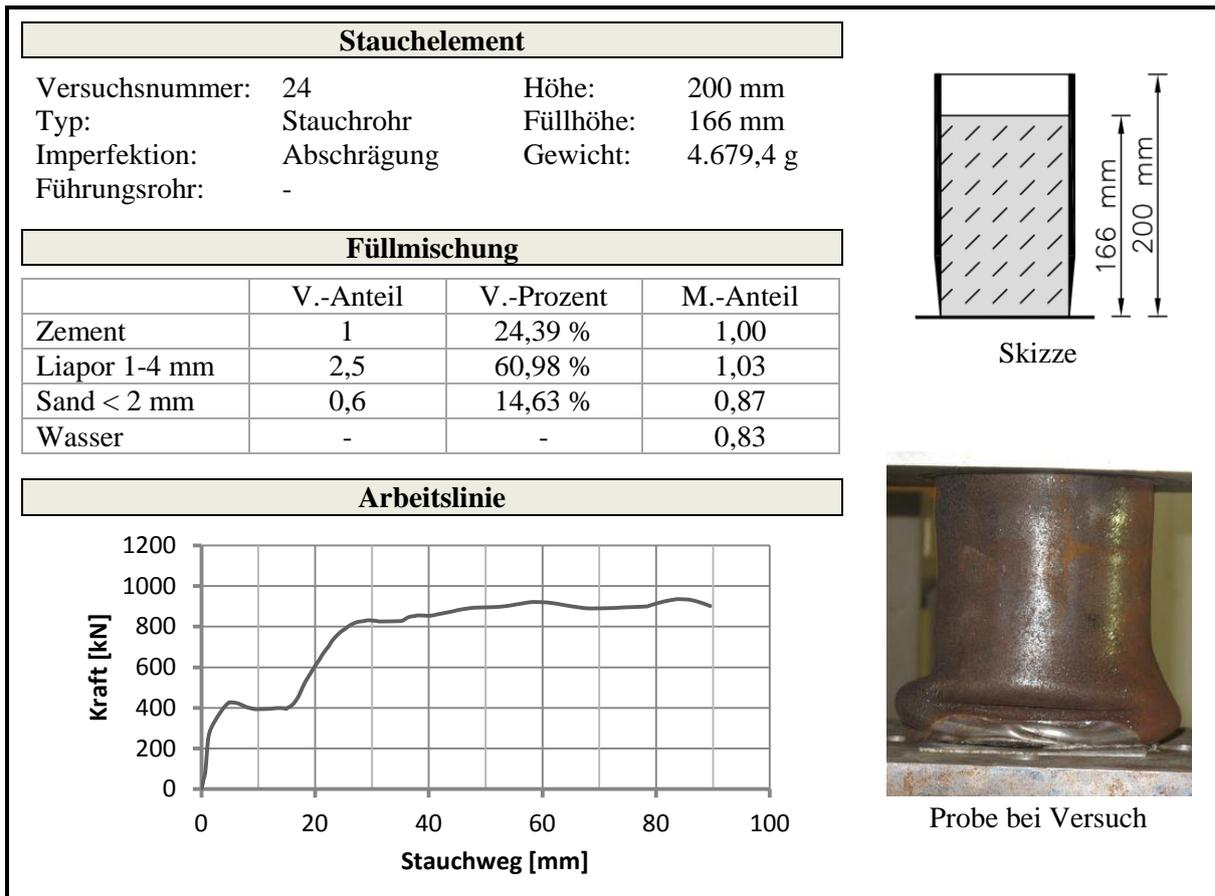


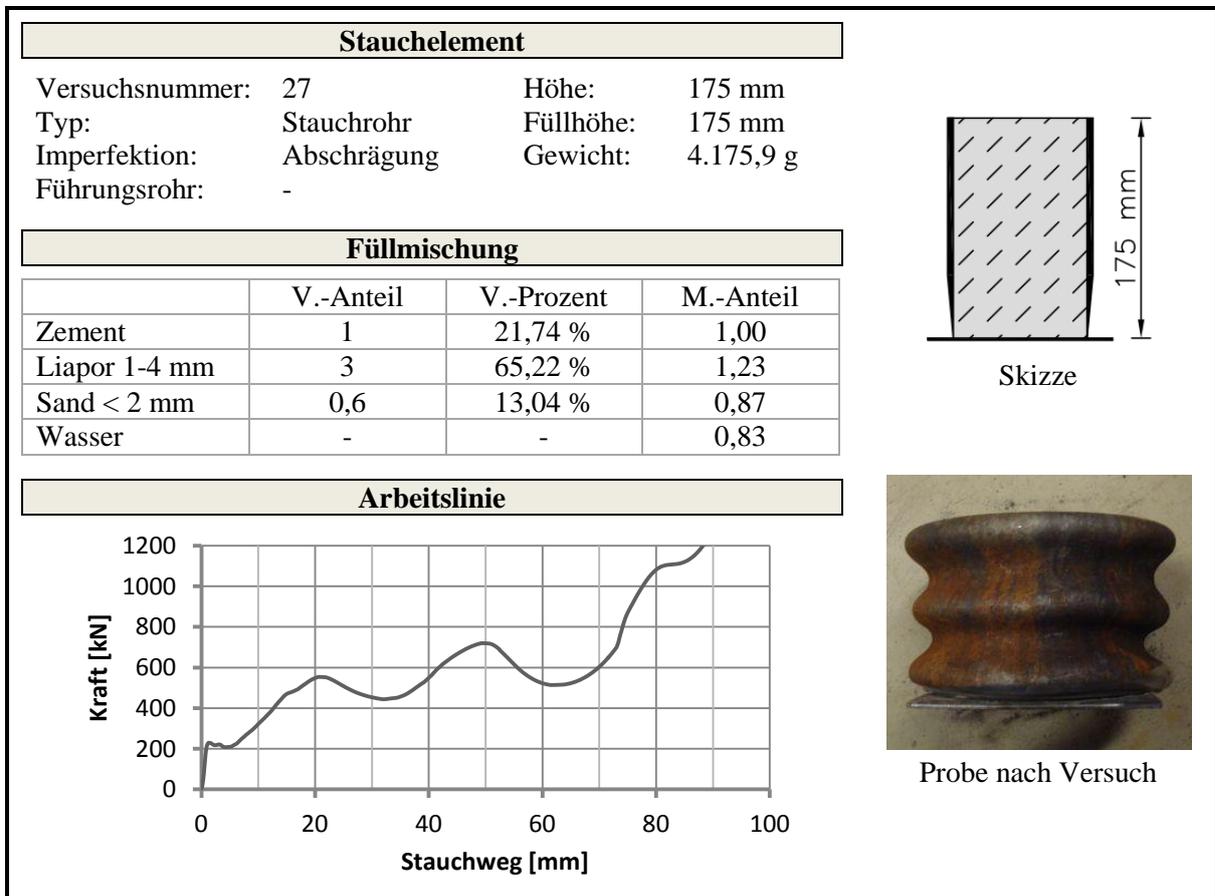
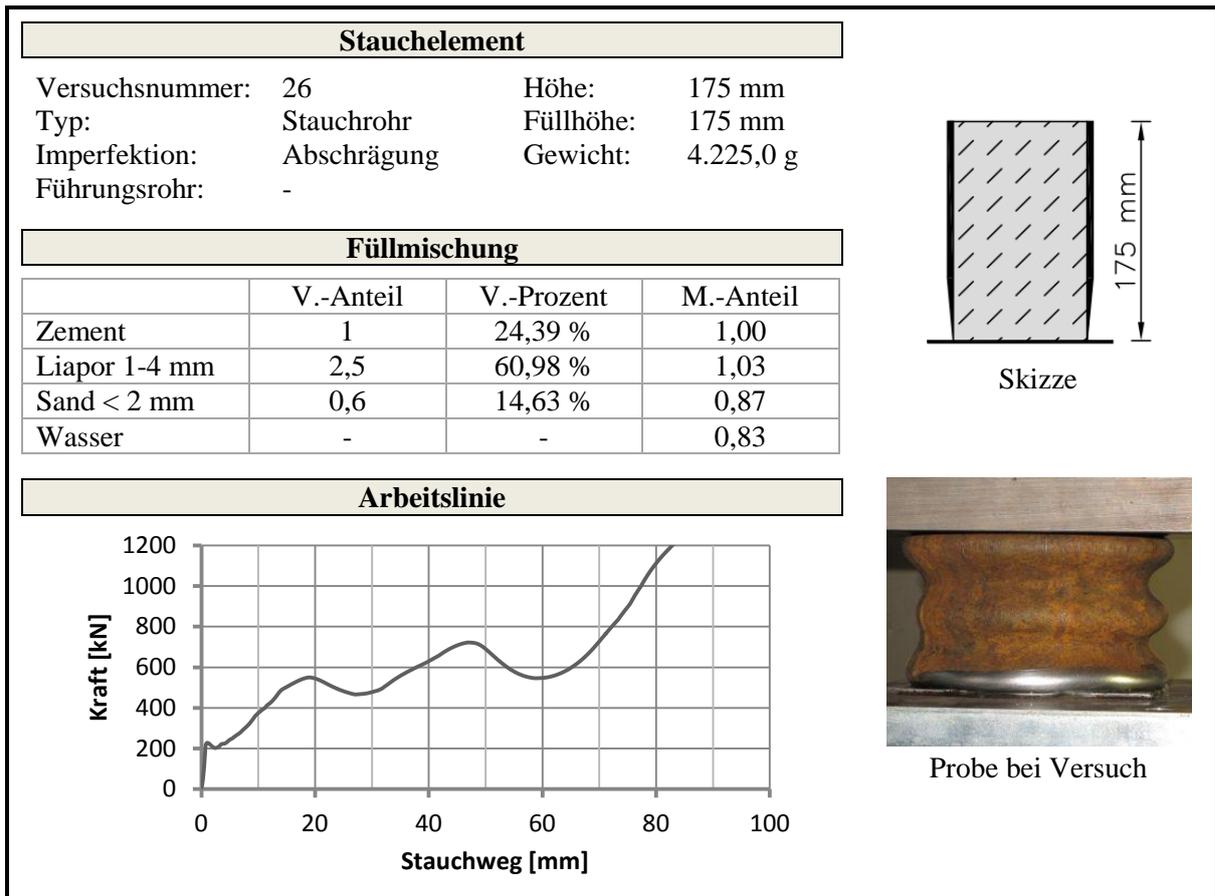
Fotos

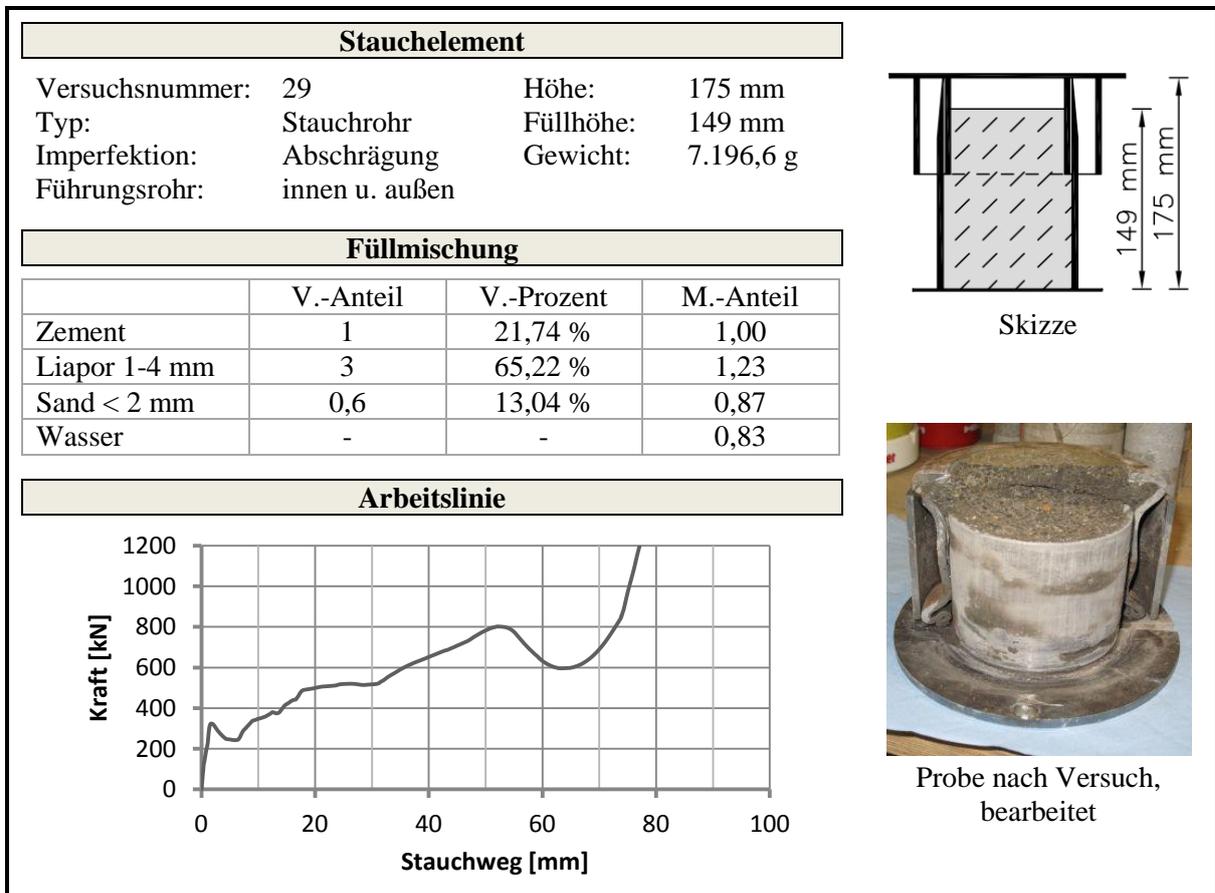
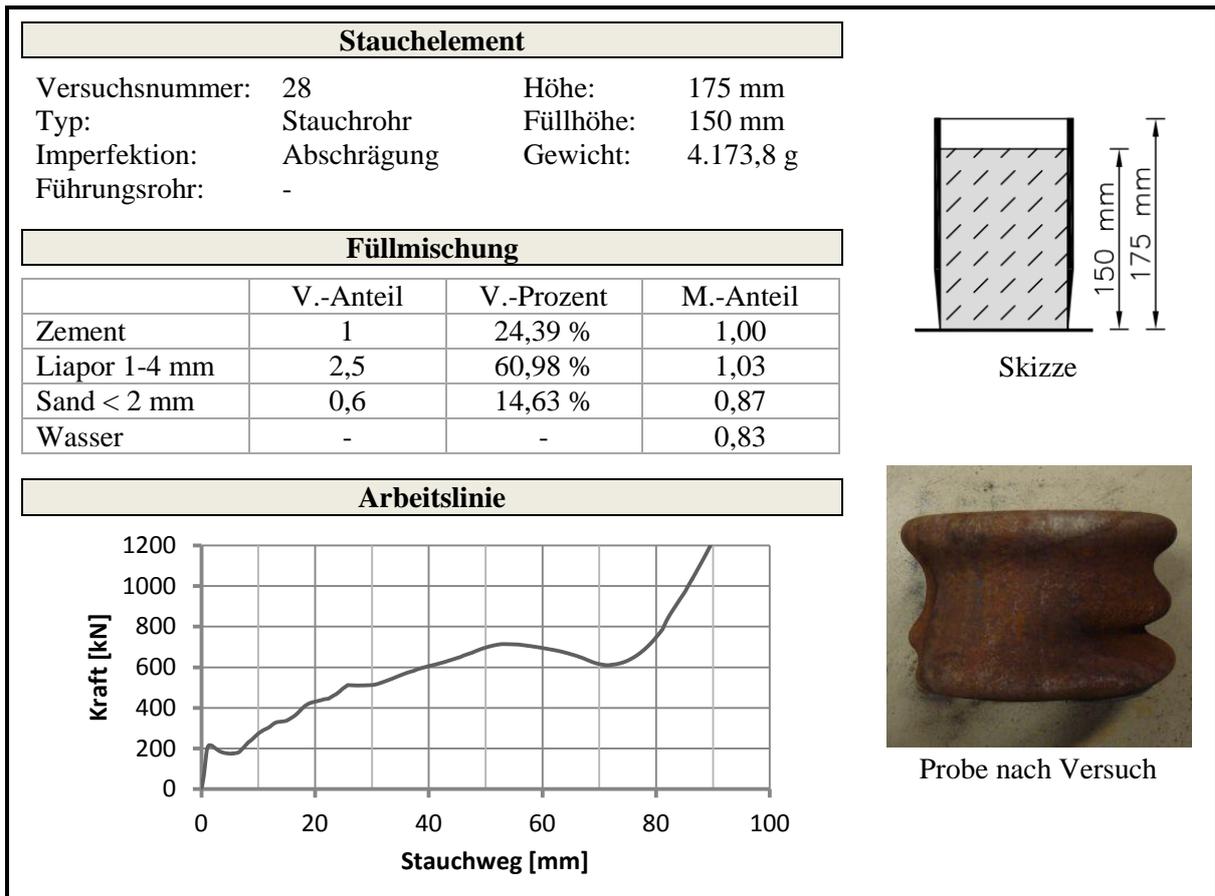


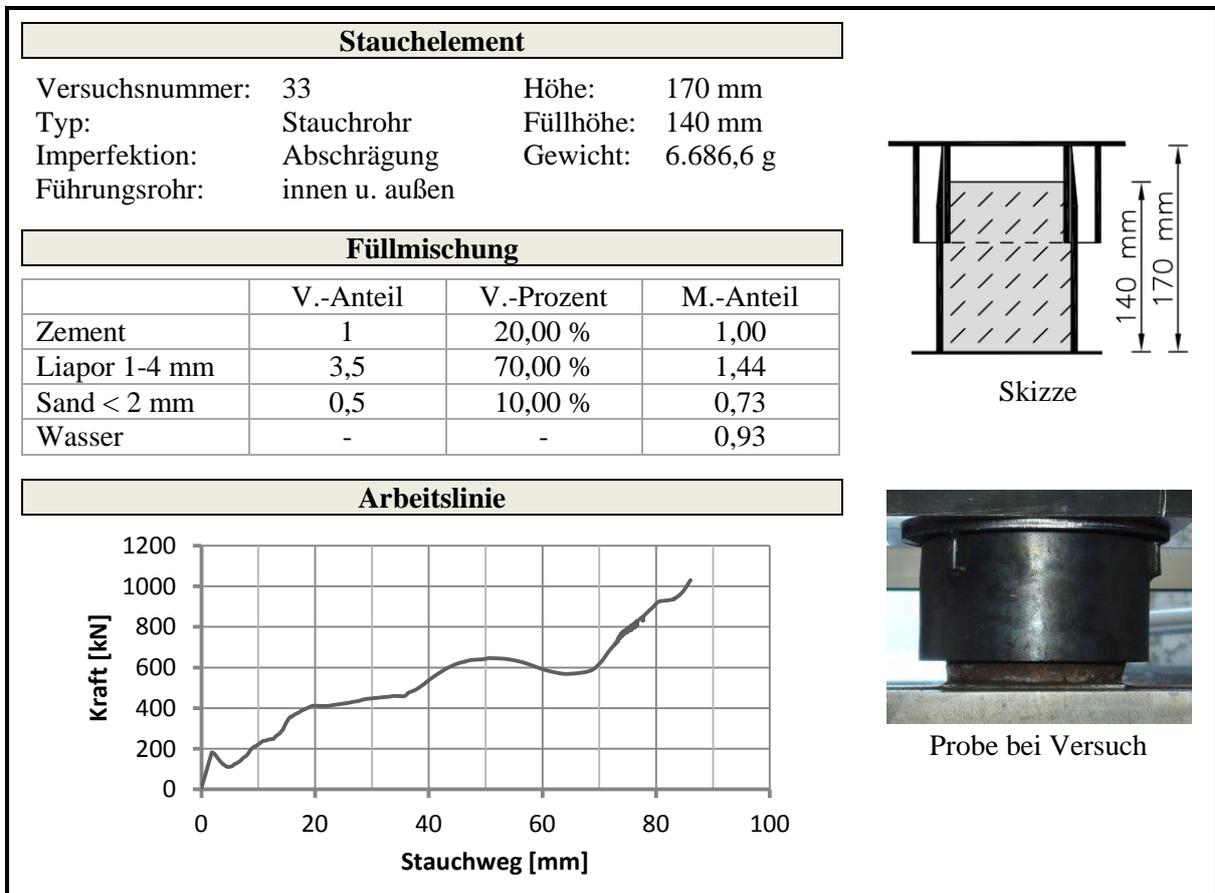
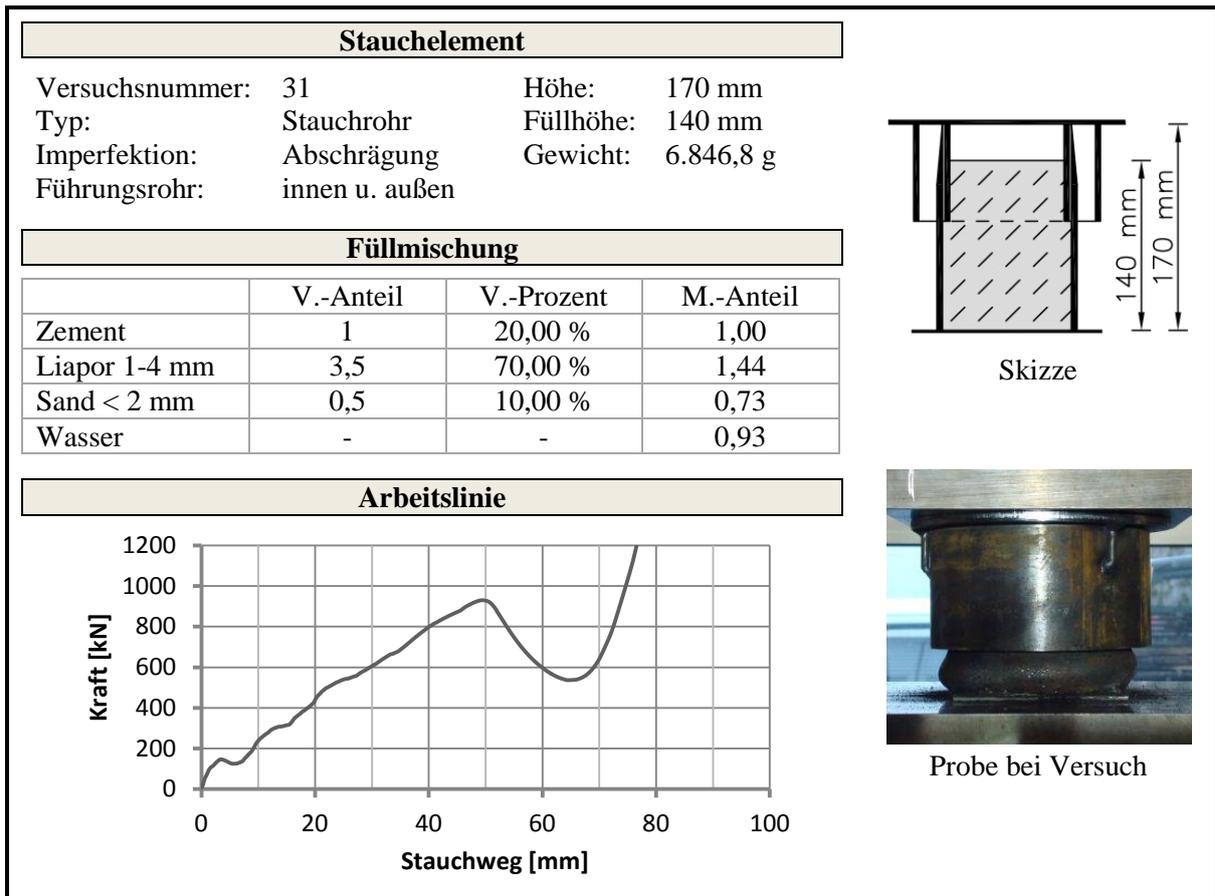










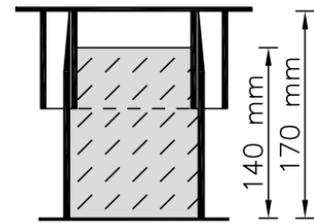


Stachelement

Versuchsnummer: 35 Höhe: 170 mm
 Typ: Stauchrohr Füllhöhe: 140 mm
 Imperfektion: Abschrägung Gewicht: 7006,0 g
 Führungsrohr: innen u. außen

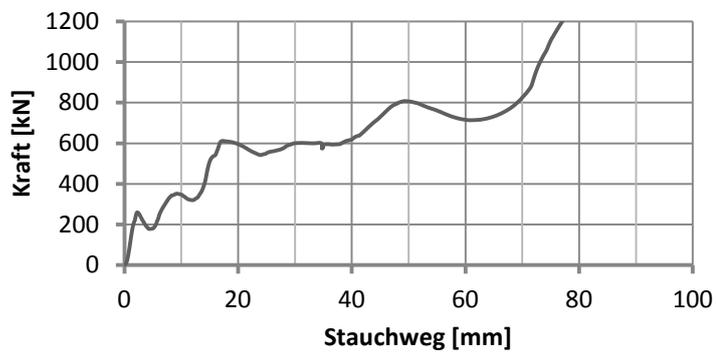
Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	22,22 %	1,00
Liapor 1-4 mm	3	66,67 %	1,23
Sand < 2 mm	0,5	11,11 %	0,73
Wasser	-	-	0,85



Skizze

Arbeitslinie



Probe nach Versuch

Perforiertes Stauchrohr

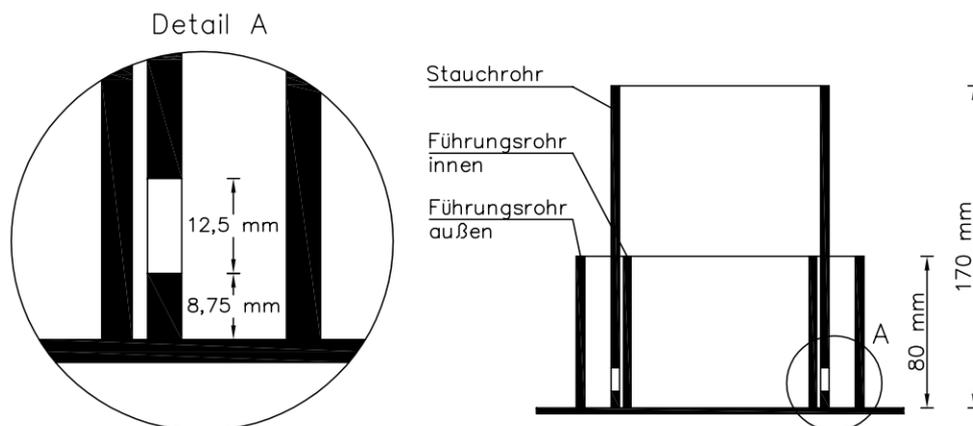
Abmessungen

	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Stauchrohr	114,3	105,3	4,5	170
Führungsrohr innen	103,0	95,0	4,0	80
Führungsrohr außen	152,4	143,4	4,5	80

Imperfektion

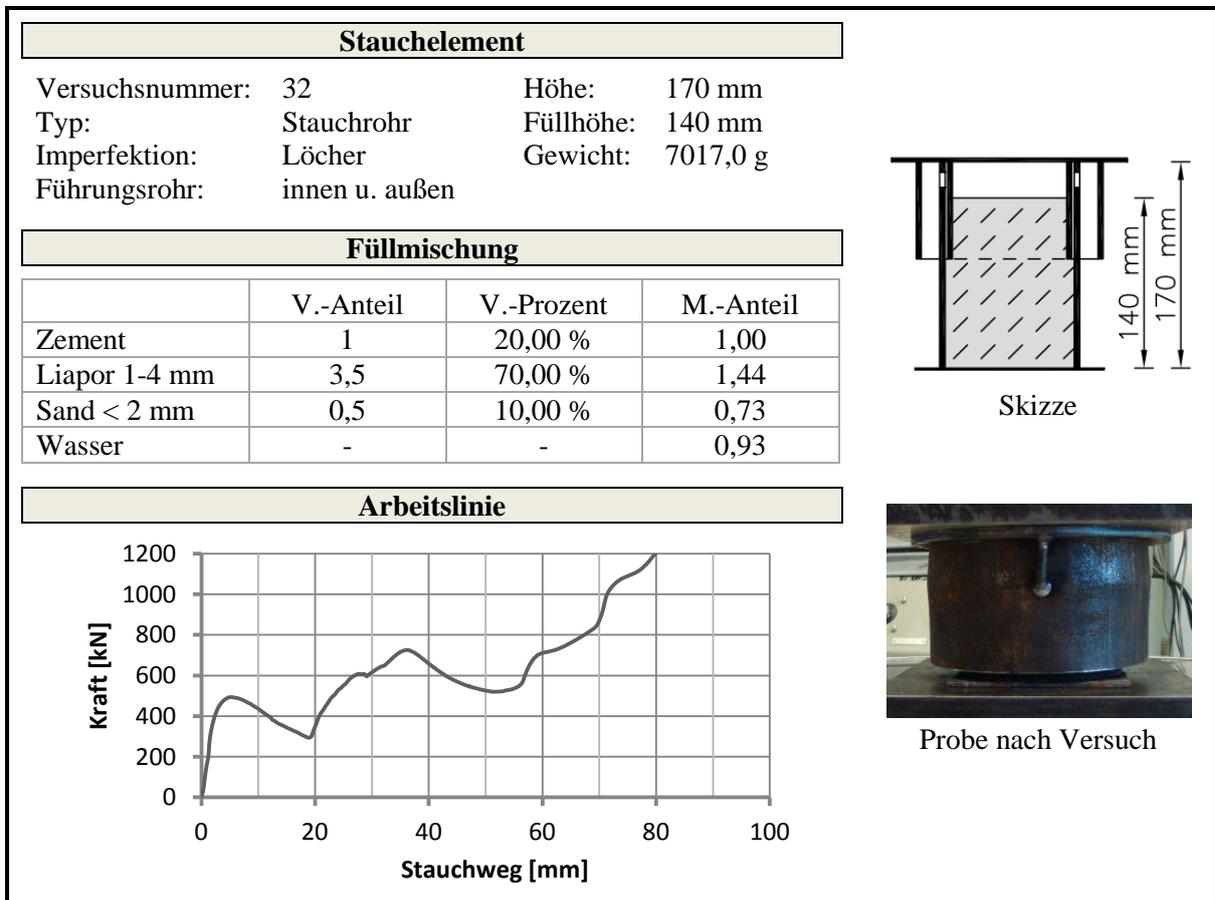
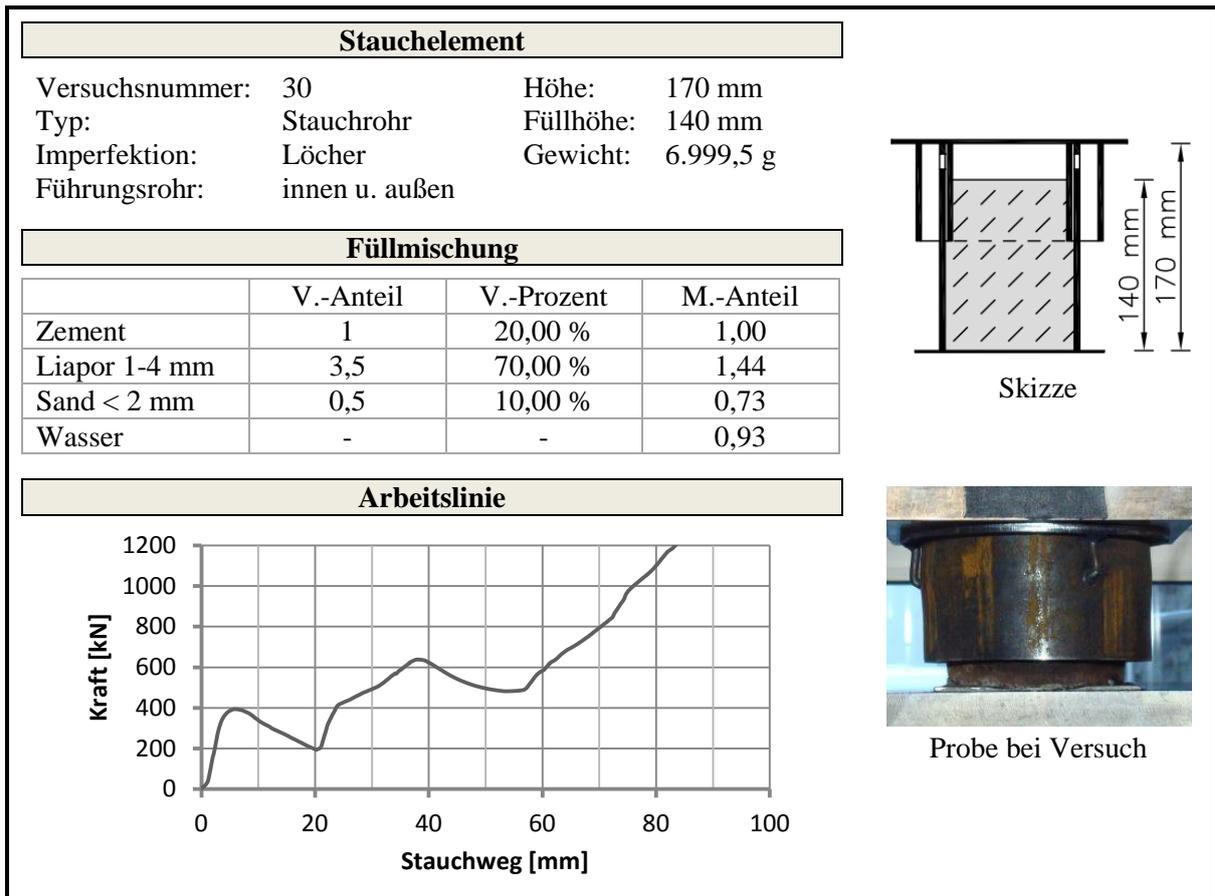
Anzahl der Löcher:	17
Durchmesser der Löcher:	12,5 mm
Abstand der Löcher vom Rand:	8,75 mm

Skizze



Fotos





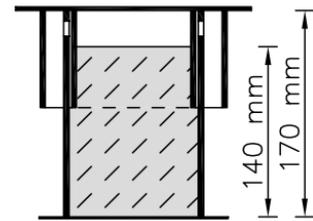
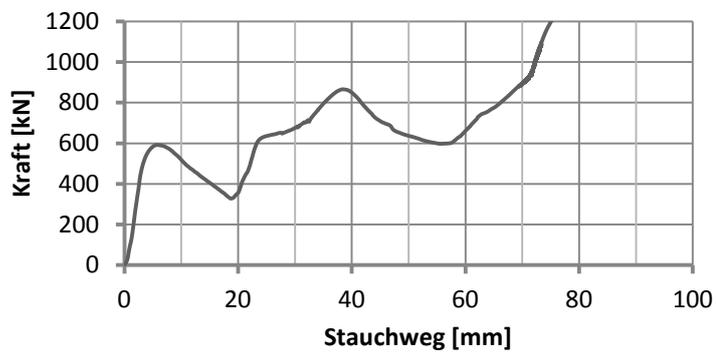
Stauchelement

Versuchsnummer: 34 Höhe: 170 mm
 Typ: Stauchrohr Füllhöhe: 140 mm
 Imperfektion: Löcher Gewicht: 7002,0 g
 Führungsrohr: innen u. außen

Füllmischung

	V.-Anteil	V.-Prozent	M.-Anteil
Zement	1	22,22 %	1,00
Liapor 1-4 mm	3	66,67 %	1,23
Sand < 2 mm	0,5	11,11 %	0,73
Wasser	-	-	0,85

Arbeitslinie



Skizze



Probe bei Versuch

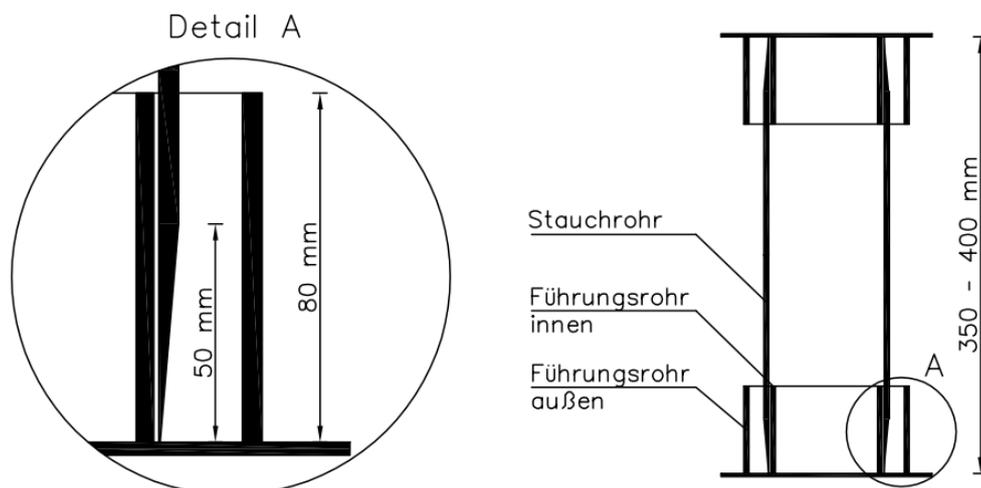
LSC A2

Abmessungen

	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Stauchrohr	114,3	105,3	4,5	350 / 400
Imperfektion	-	-	0,3 – 4,5	50
Führungsrohr innen	103,0	95,0	4,0	80
Führungsrohr außen	152,4	143,4	4,5	80

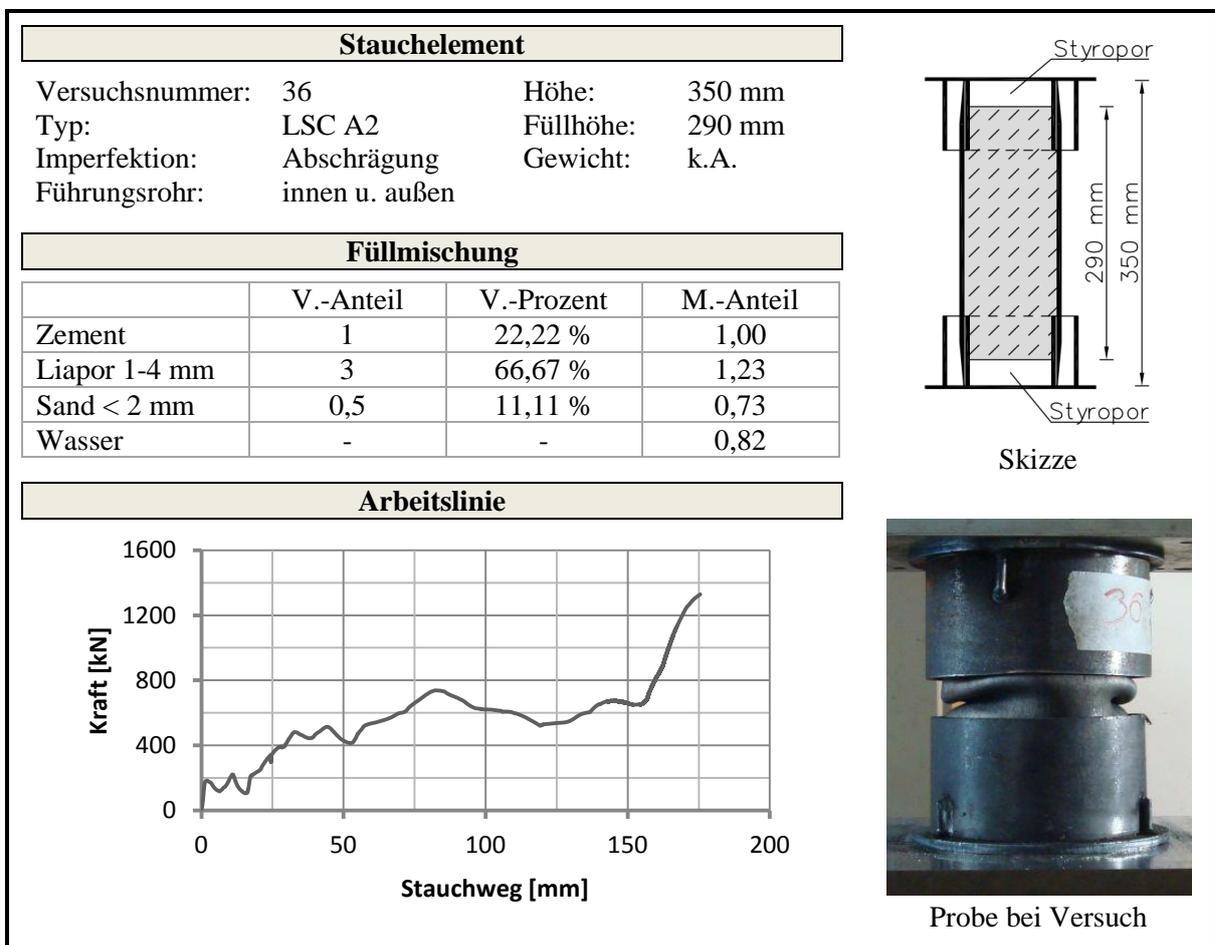
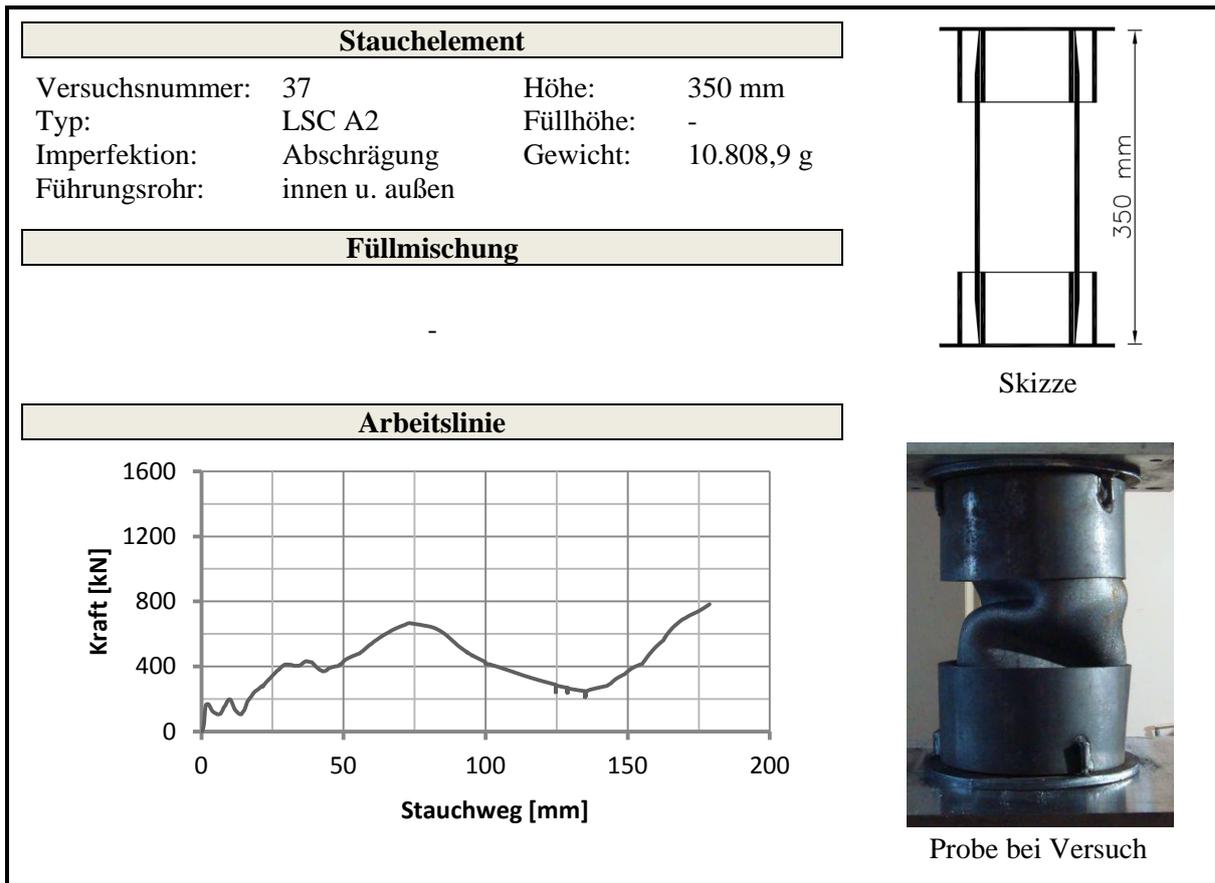
Anmerkung: Die Abmessungen weichen von den von Moritz (1999) definierten Abmessungen für den LSC A2 leicht ab (siehe Tabelle 1). Abgesehen davon ist die Stahlqualität (S355) mittlerweile besser als jene, welche bei den Untersuchungen von Moritz (1999) verwendet wurde.

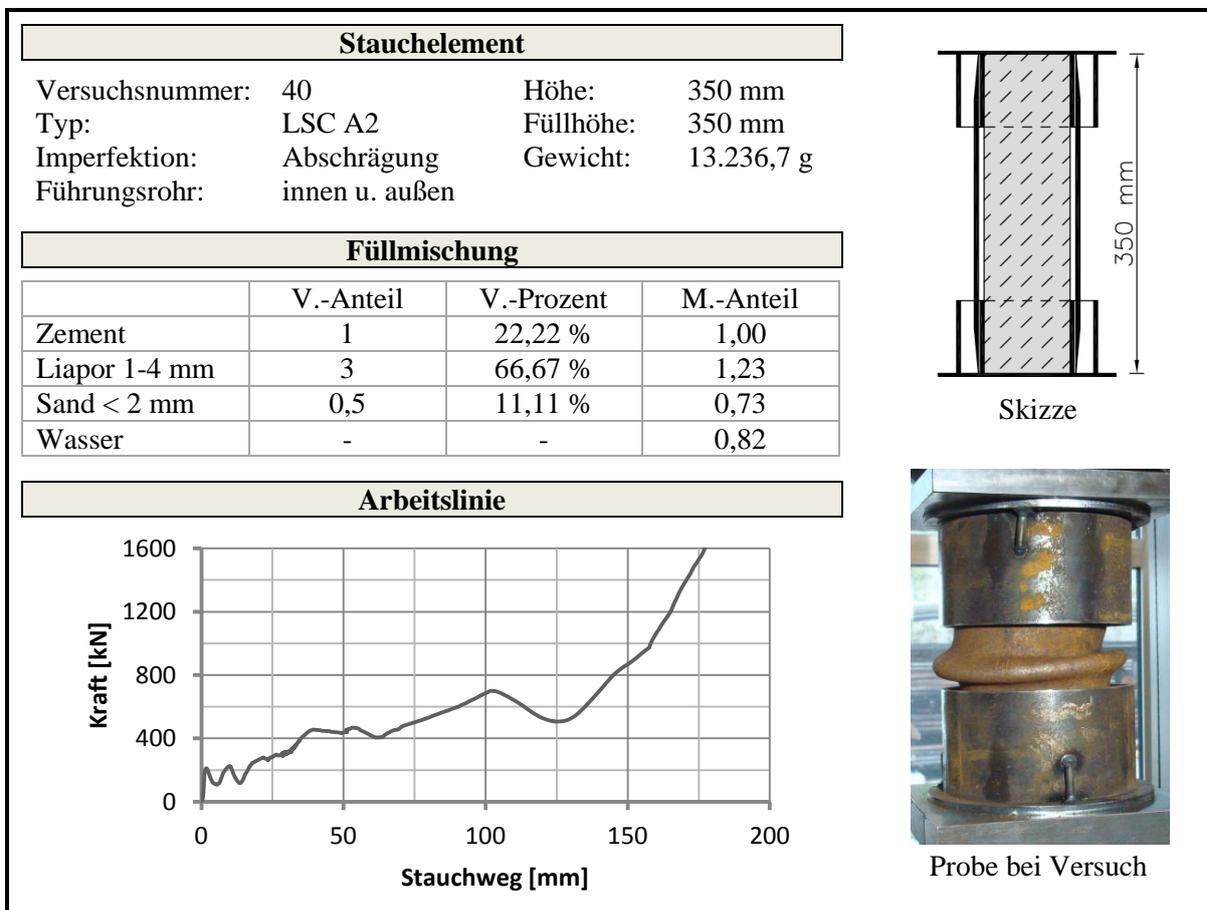
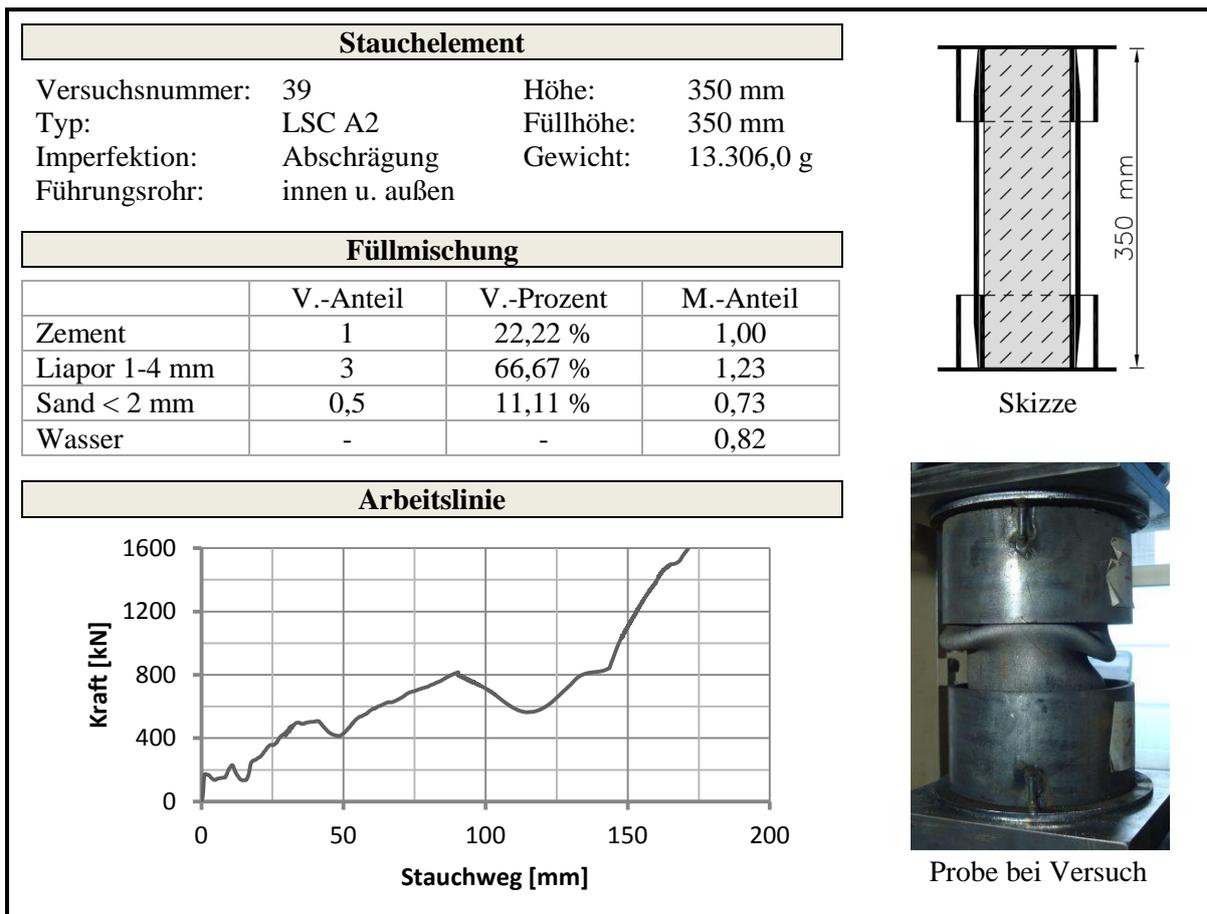
Skizze

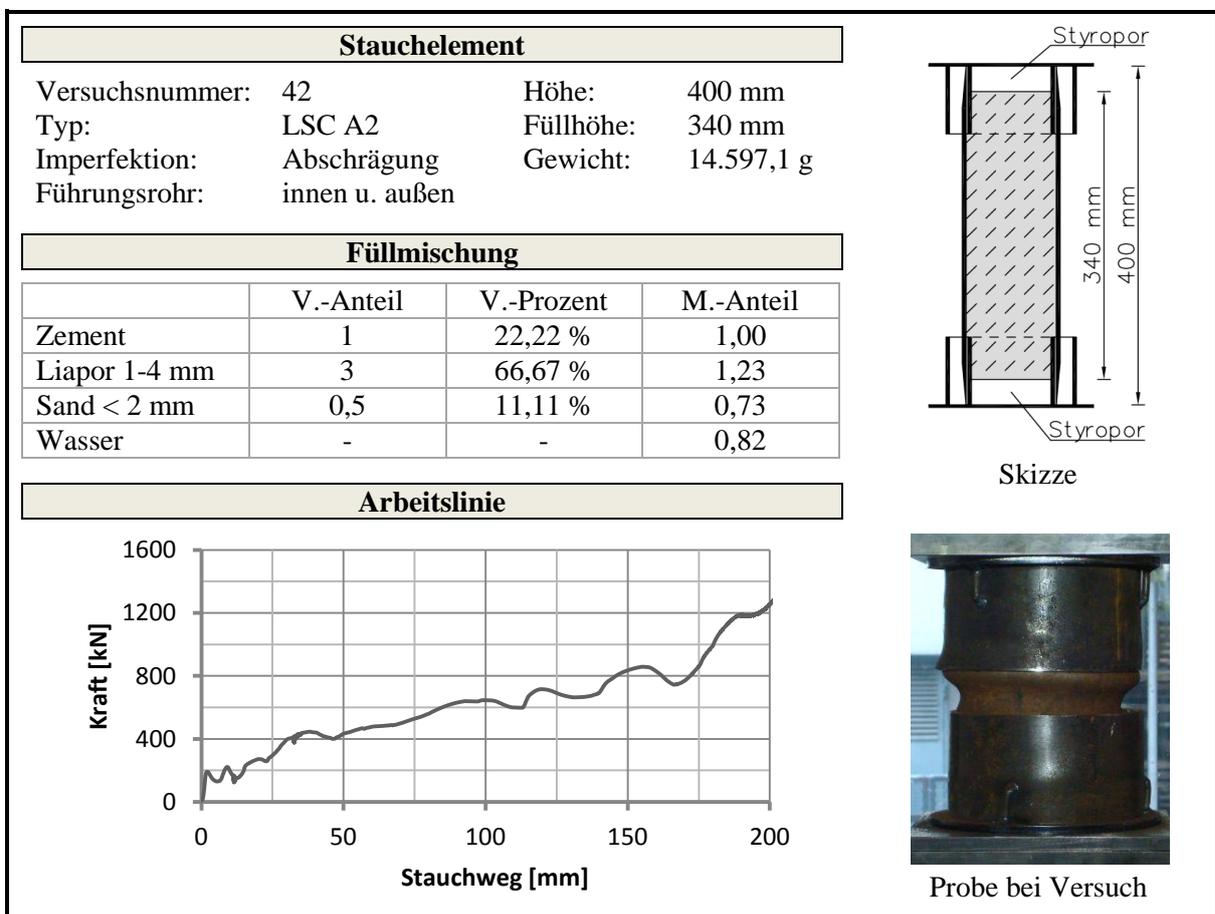
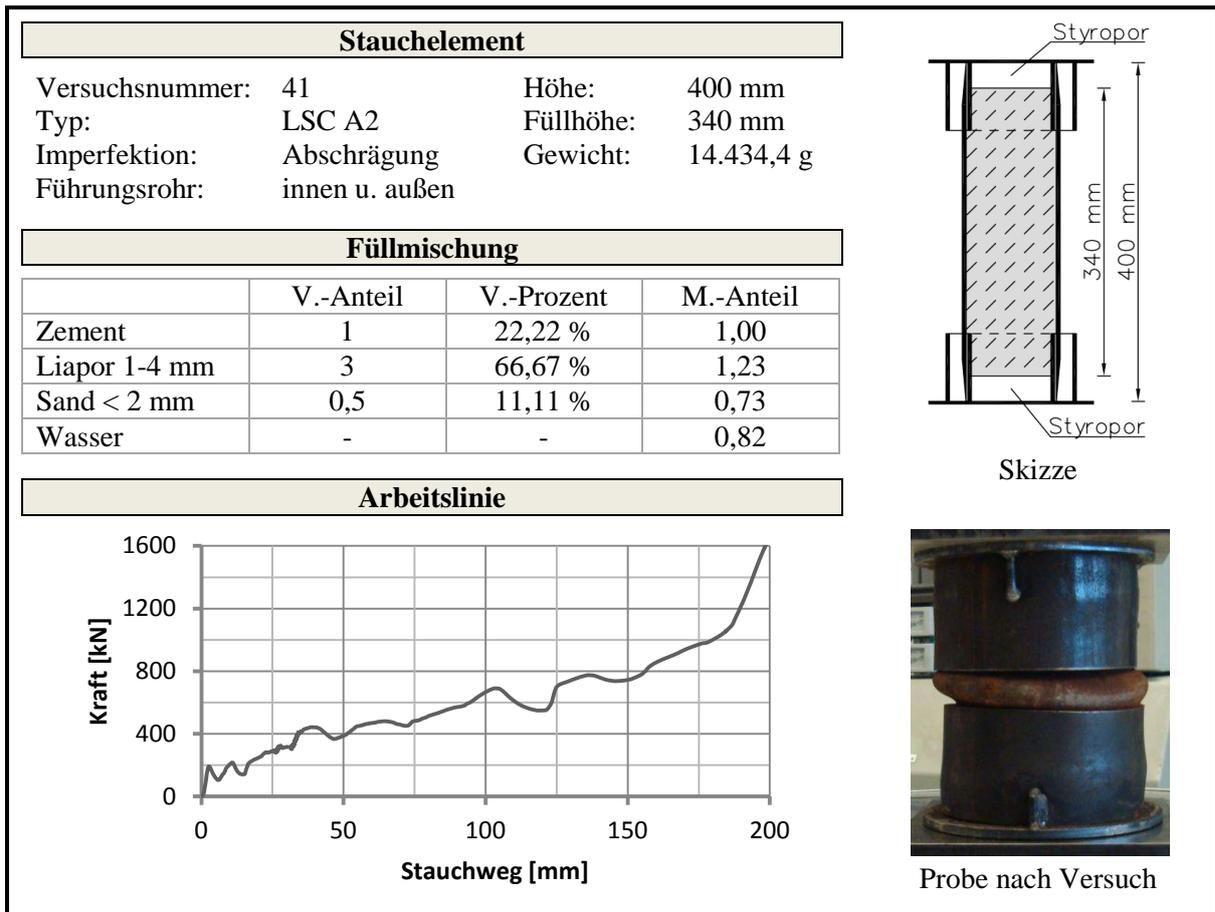


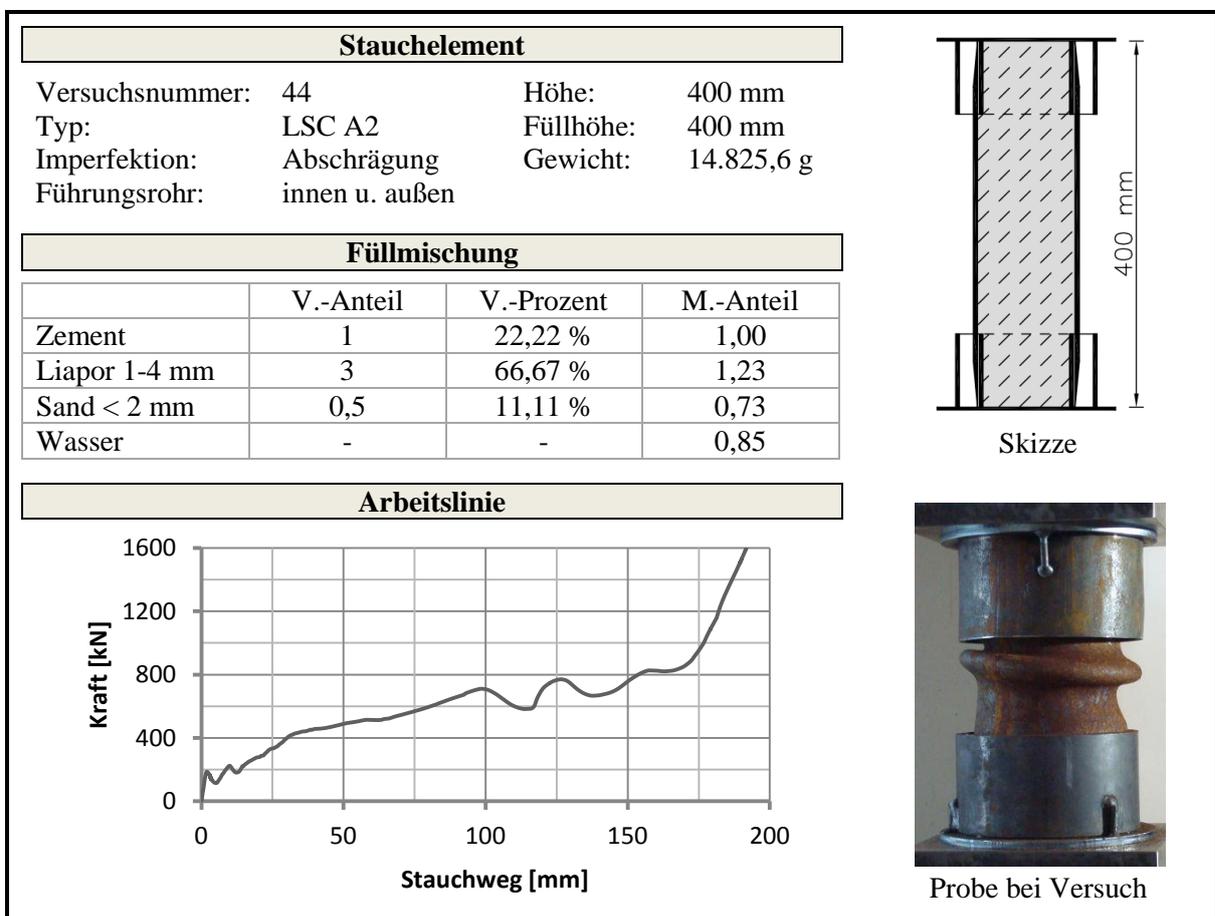
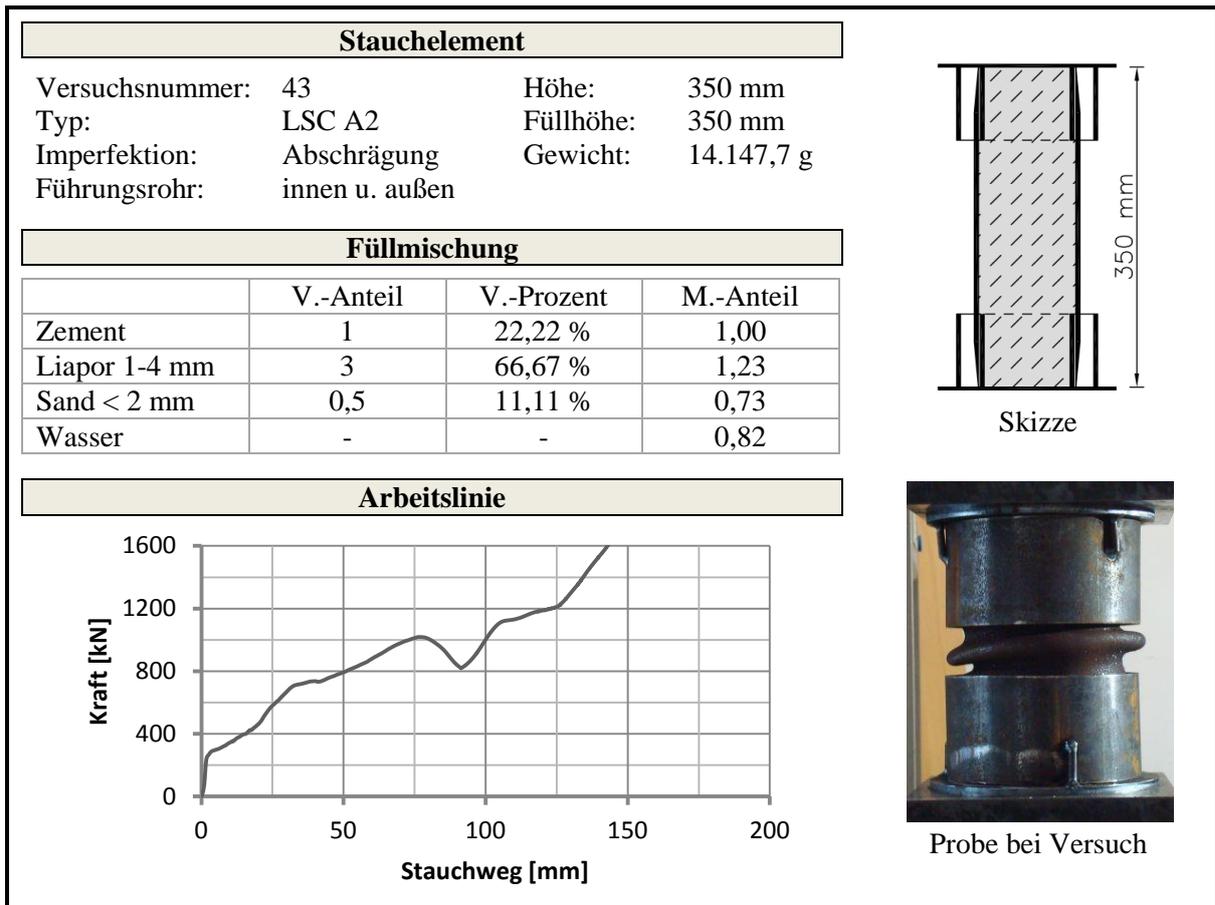
Fotos

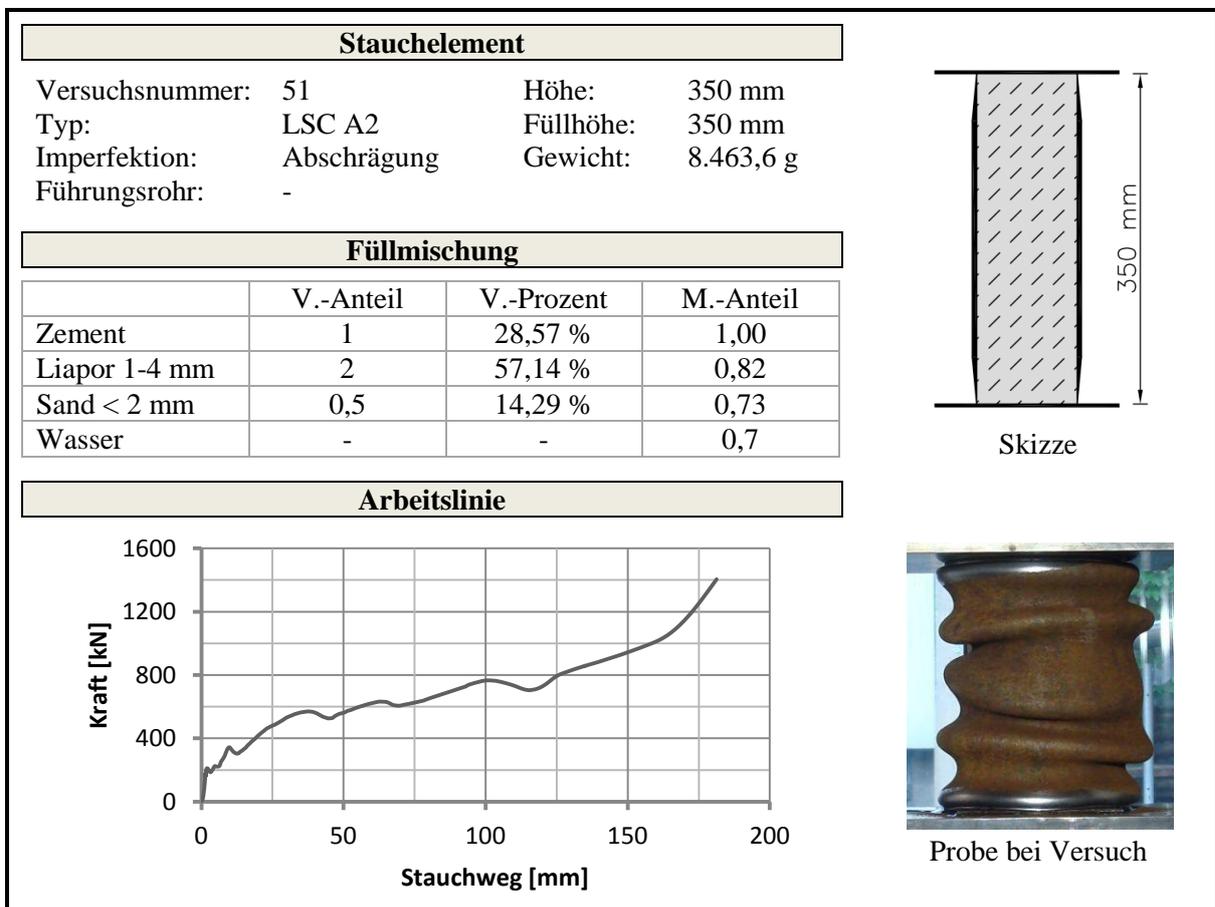
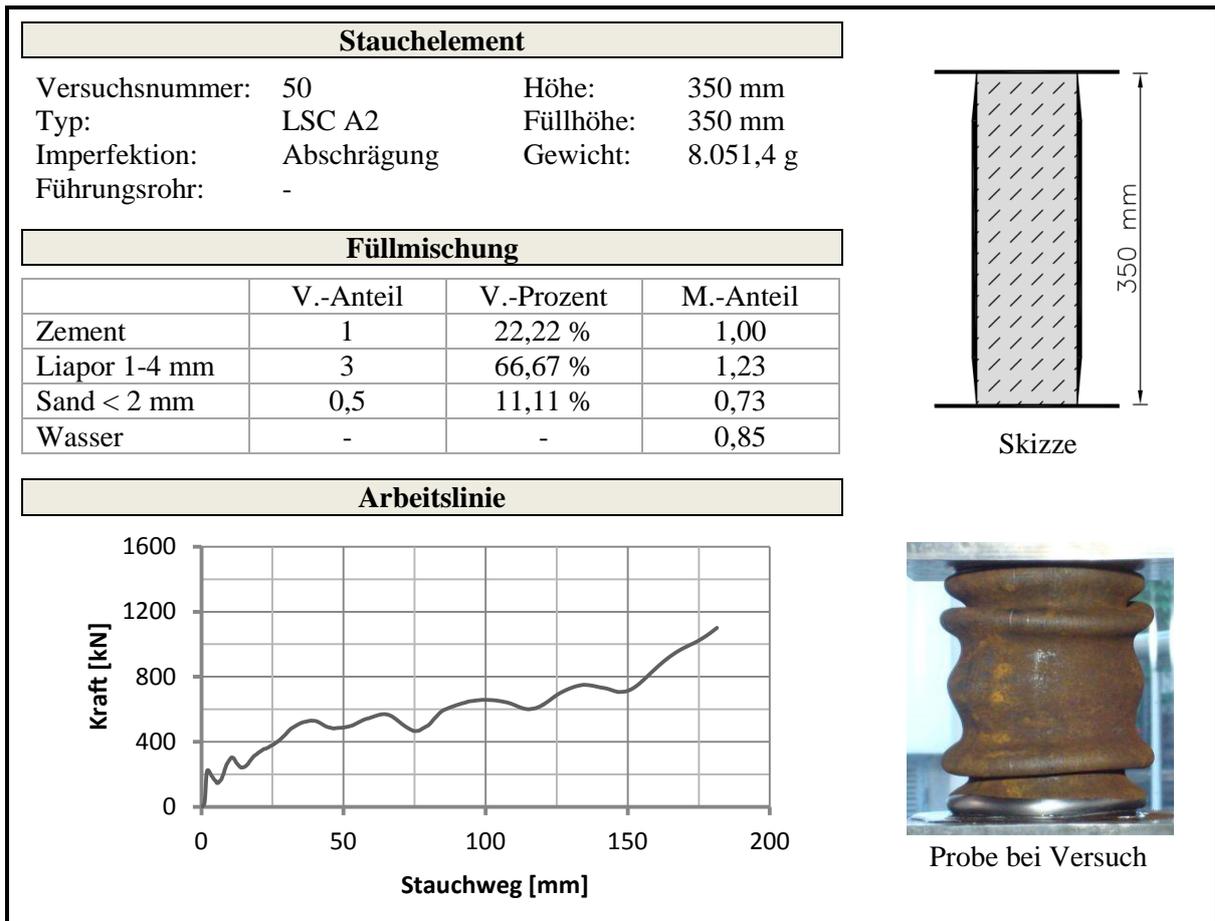










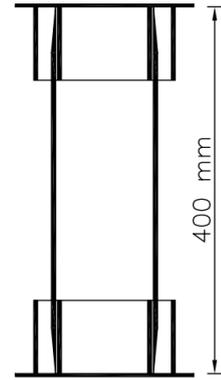
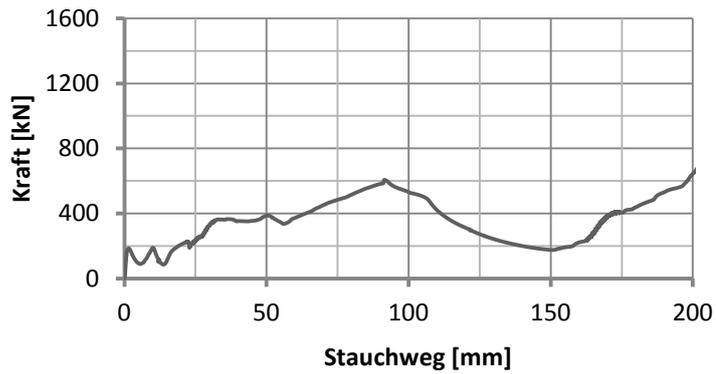


Stauchelement

Versuchsnummer:	46	Höhe:	400 mm
Typ:	LSC A2	Füllhöhe:	-
Imperfektion:	Abschrägung	Gewicht:	11.307,0 g
Führungsrohr:	innen u. außen		

Füllmischung

-

Arbeitslinie

Skizze



Probe bei Versuch

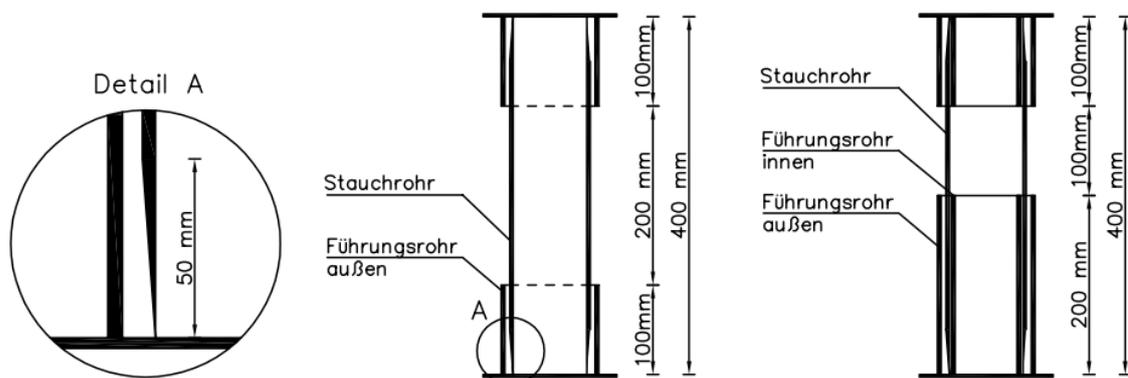
LSC A1

Abmessungen

	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Stauchrohr	88,9	81,7	3,6	400
Imperfektion	-	-	0,3 – 3,6	50
Führungsrohr innen	76,1	68,1	4,0	100 / 200
Führungsrohr außen	108,0	100,0	4,0	100 / 200

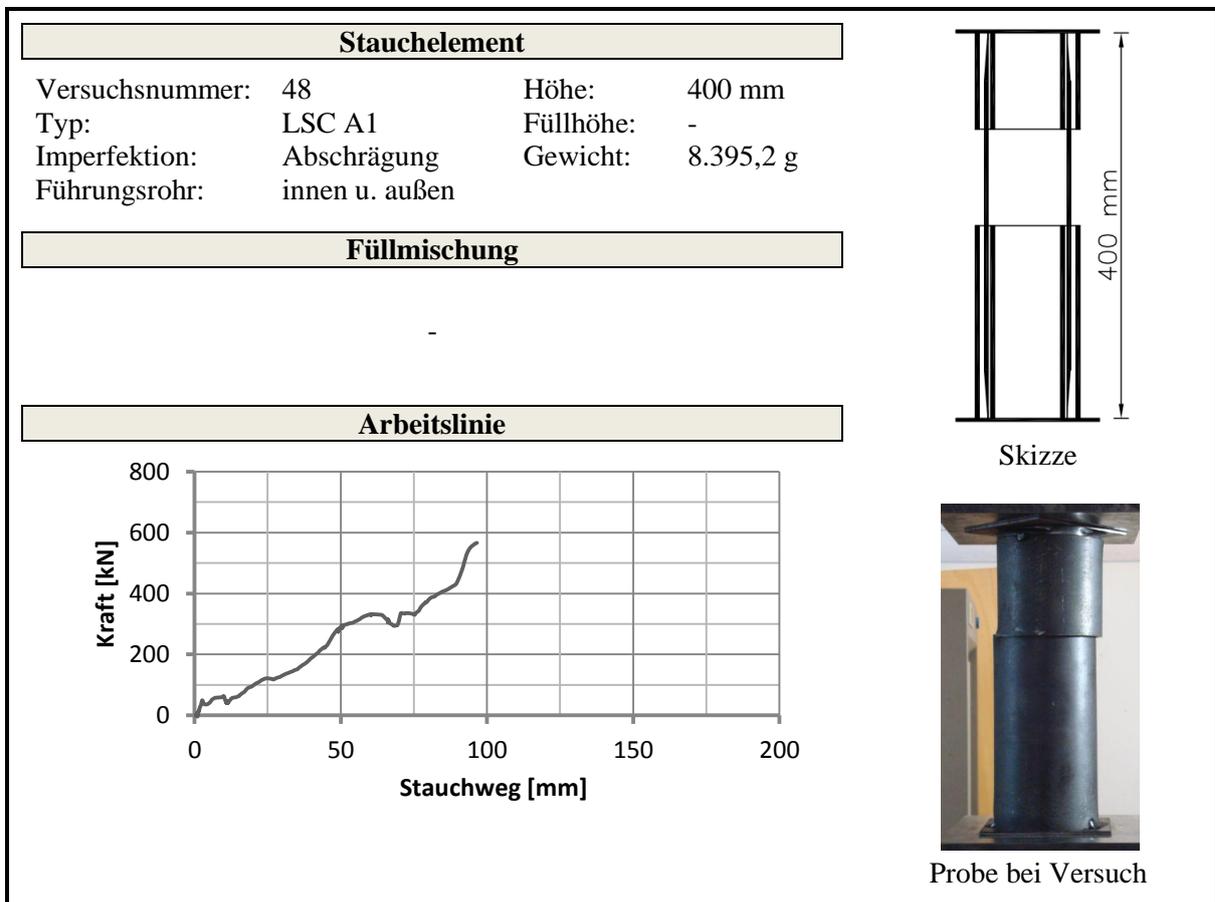
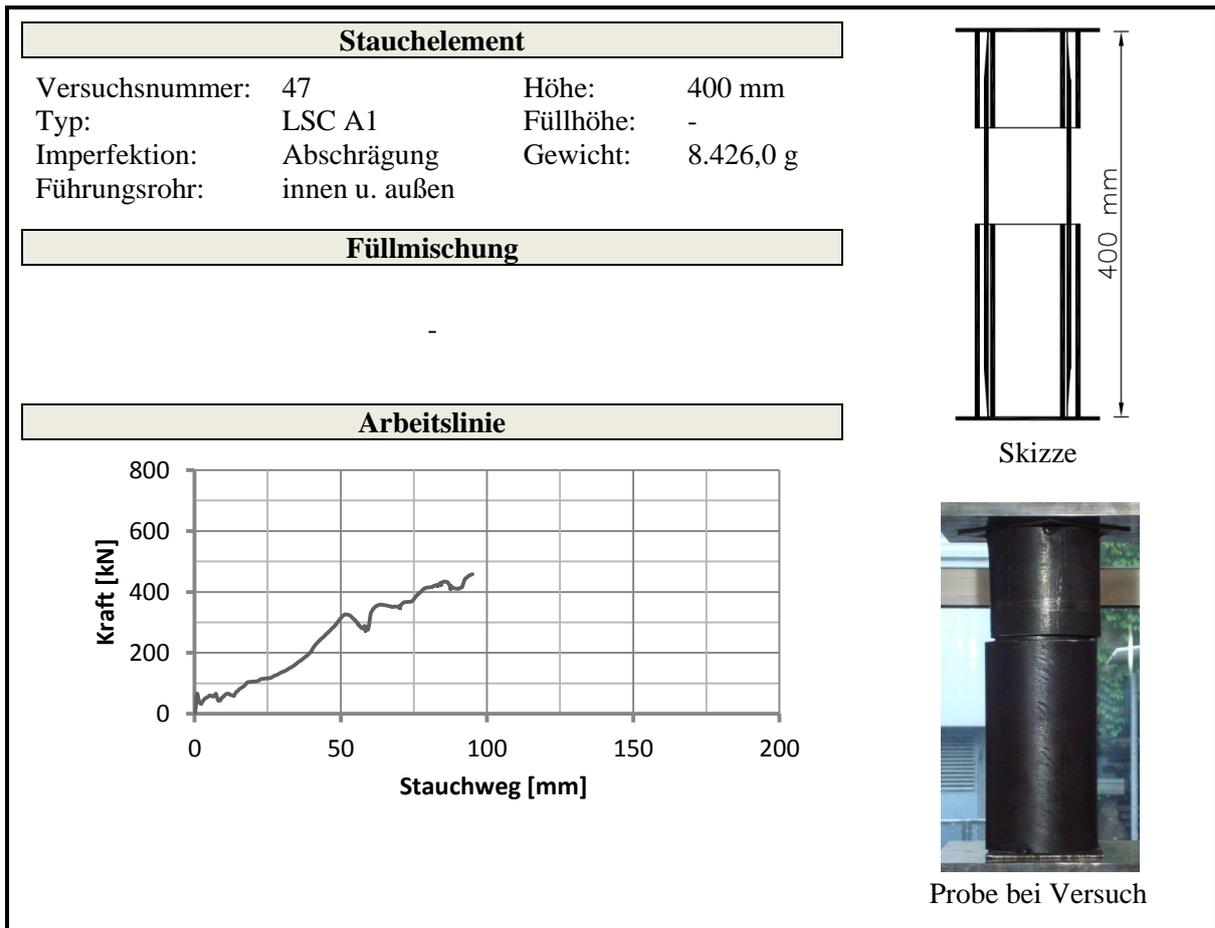
Anmerkung: Die Abmessungen weichen von den von Moritz (1999) definierten Abmessungen für den LSC A1 leicht ab (siehe Tabelle 1). Abgesehen davon ist die Stahlqualität (S355) mittlerweile besser als jene, welche bei den Untersuchungen von Moritz (1999) verwendet wurde.

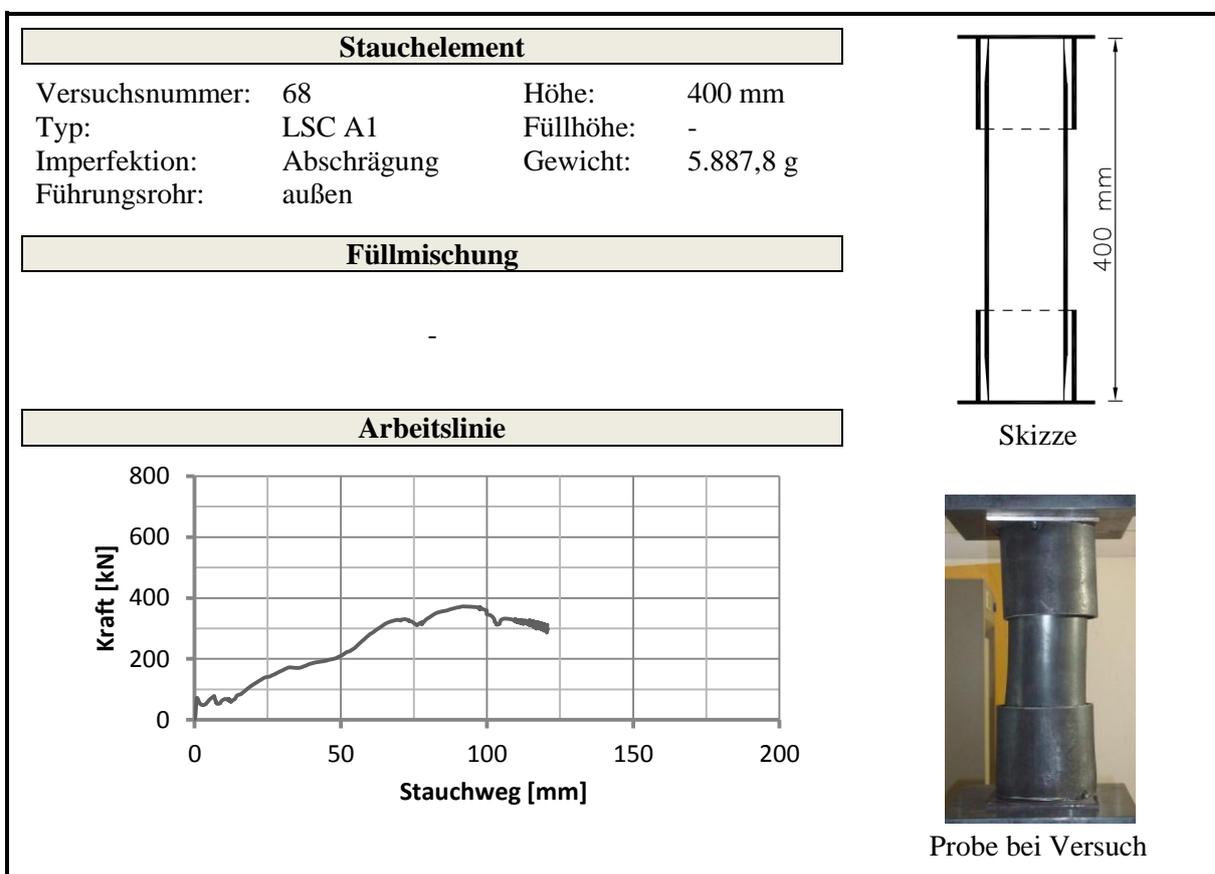
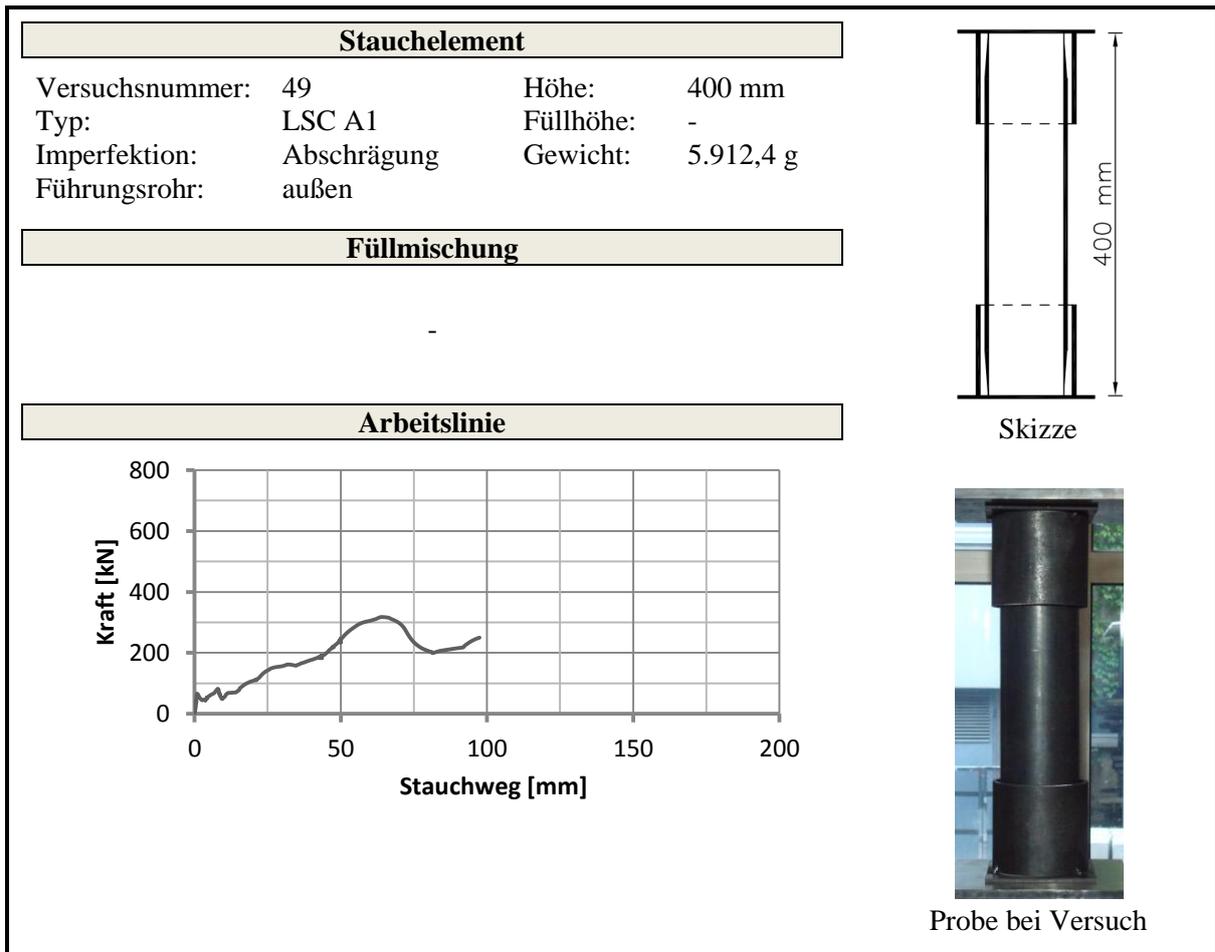
Skizze

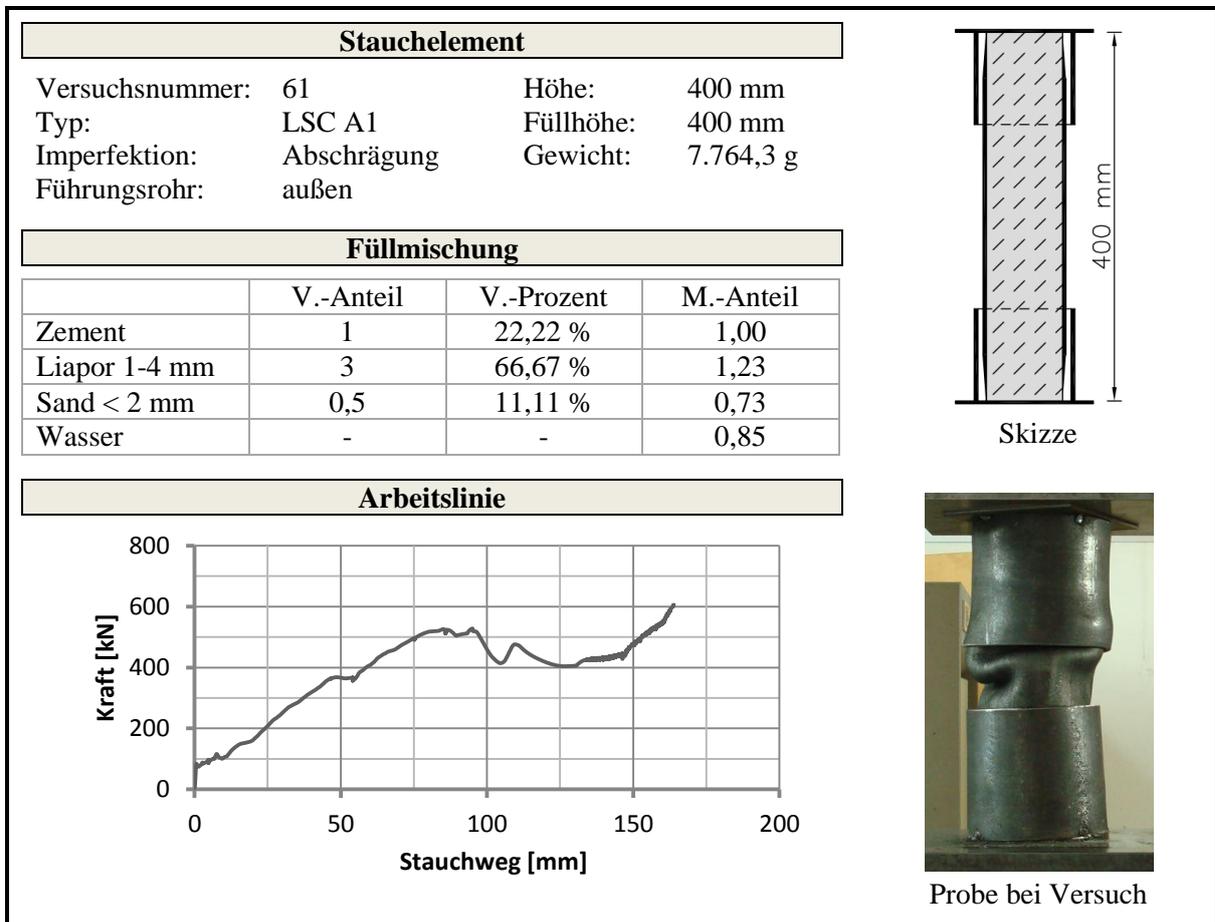
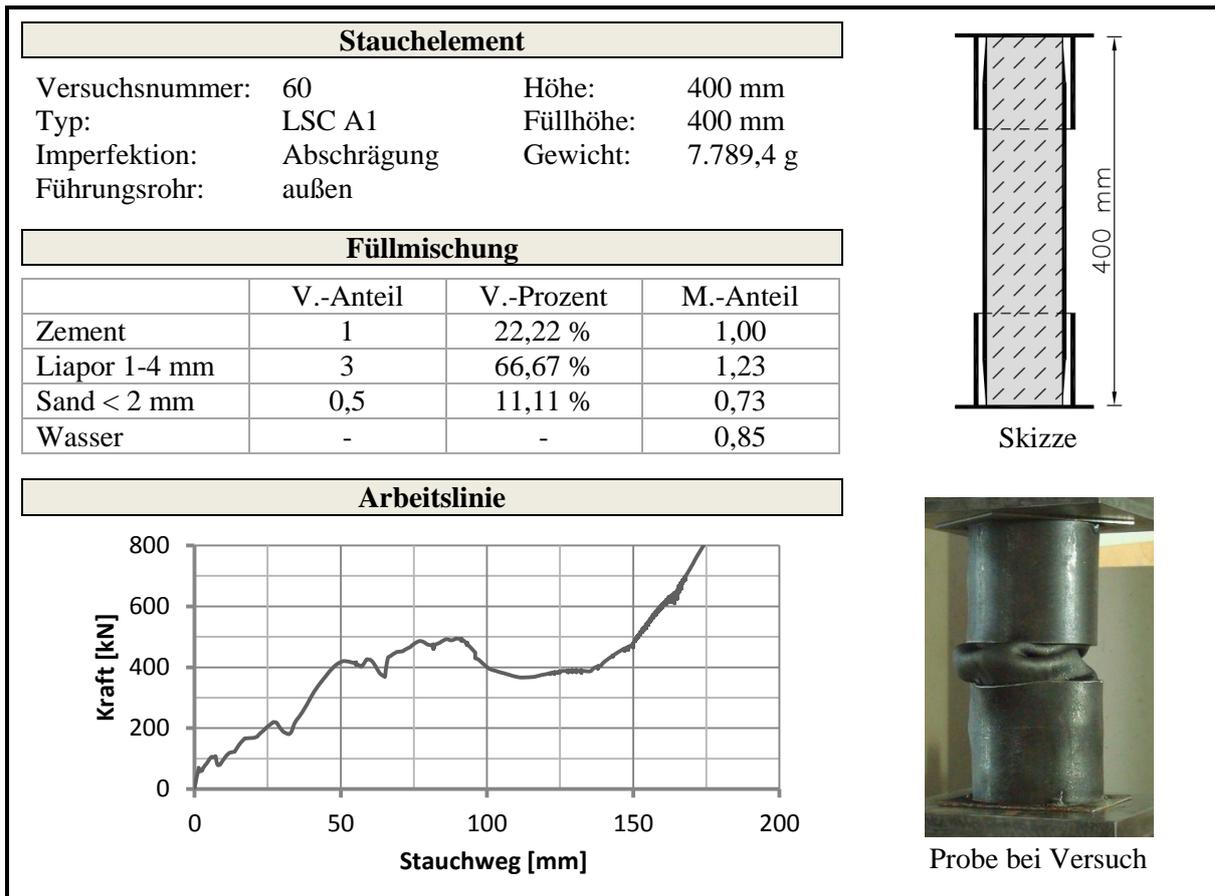


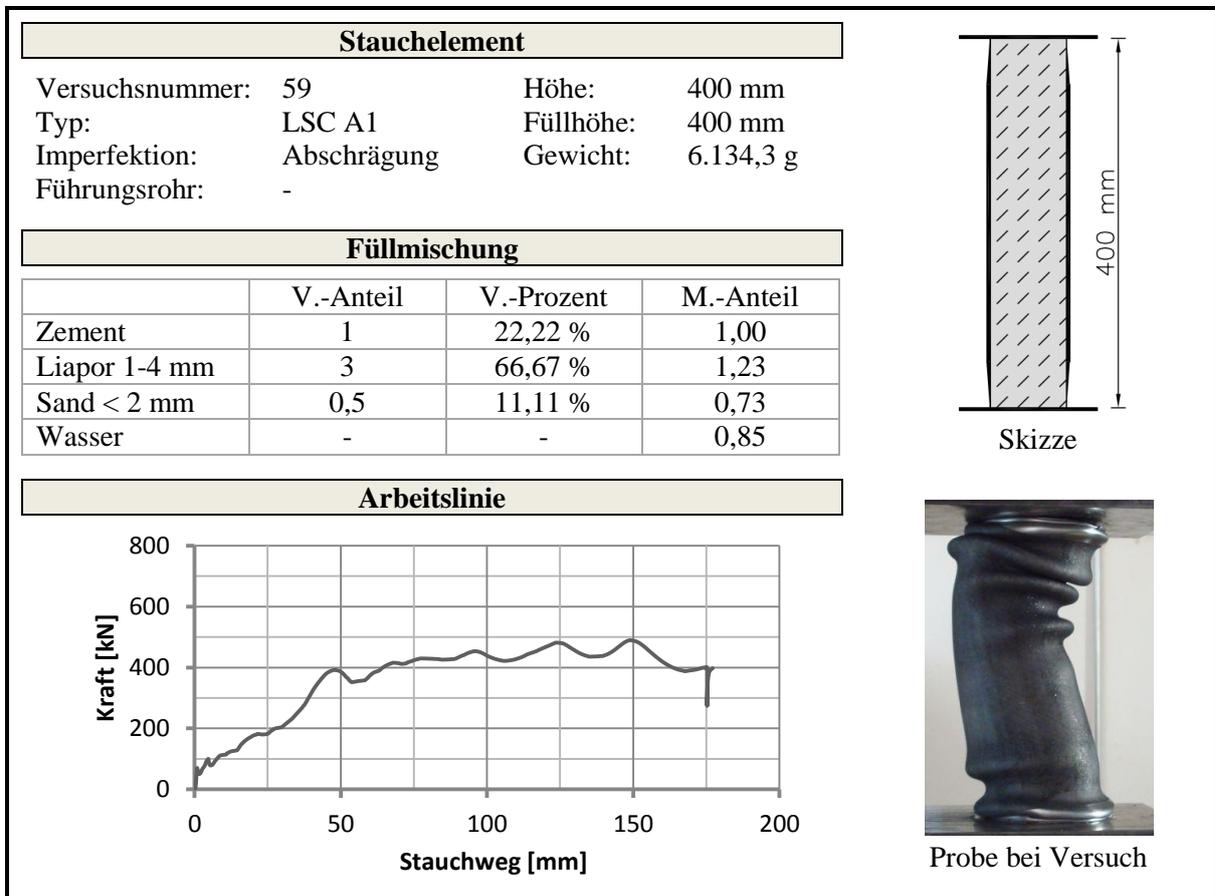
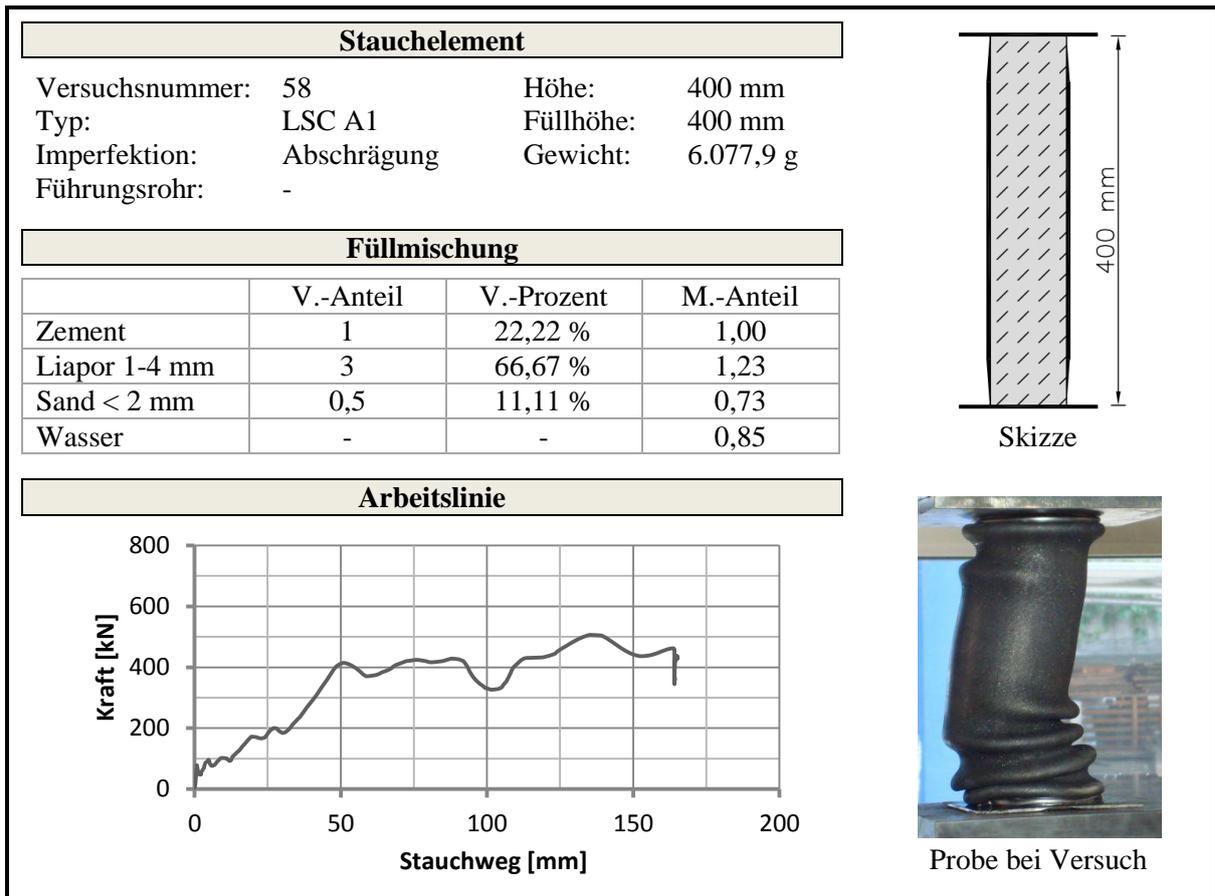
Fotos

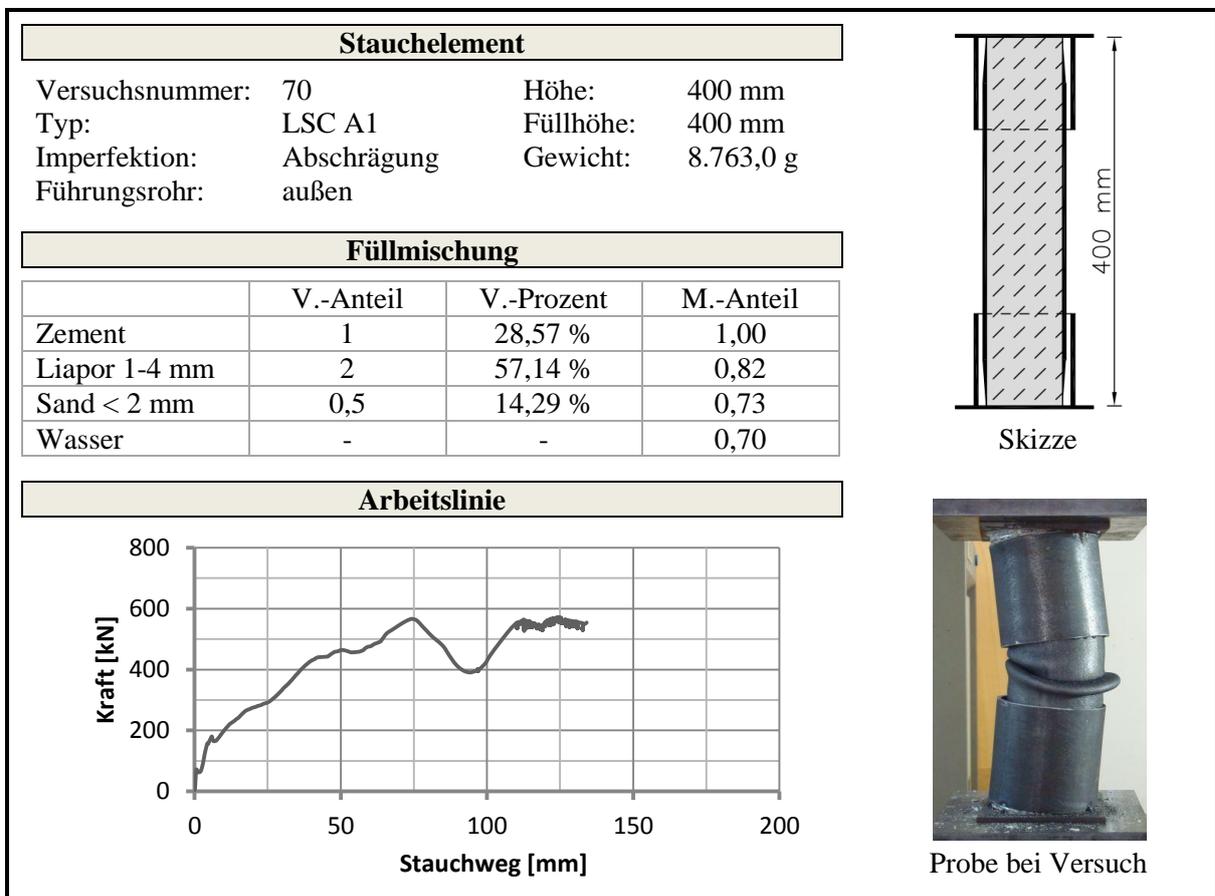
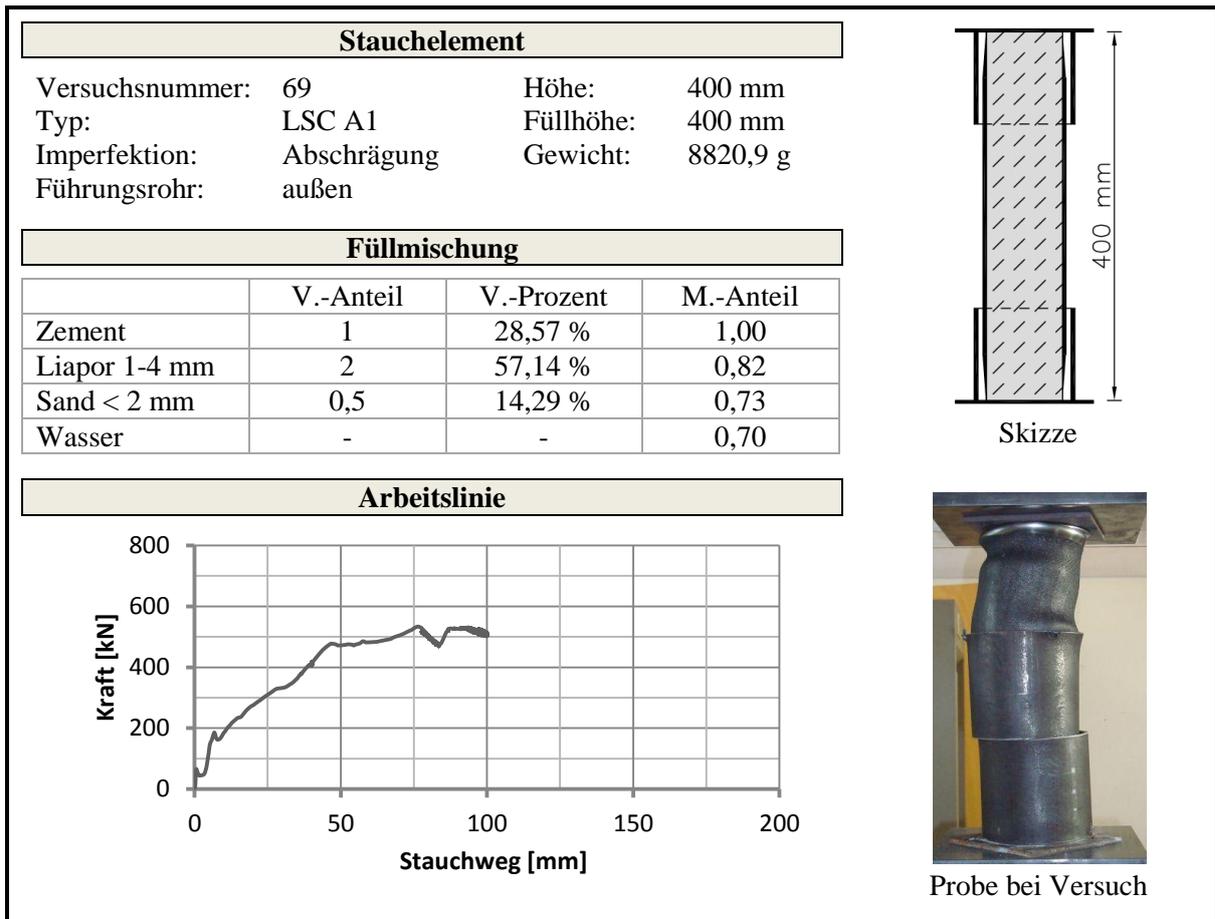


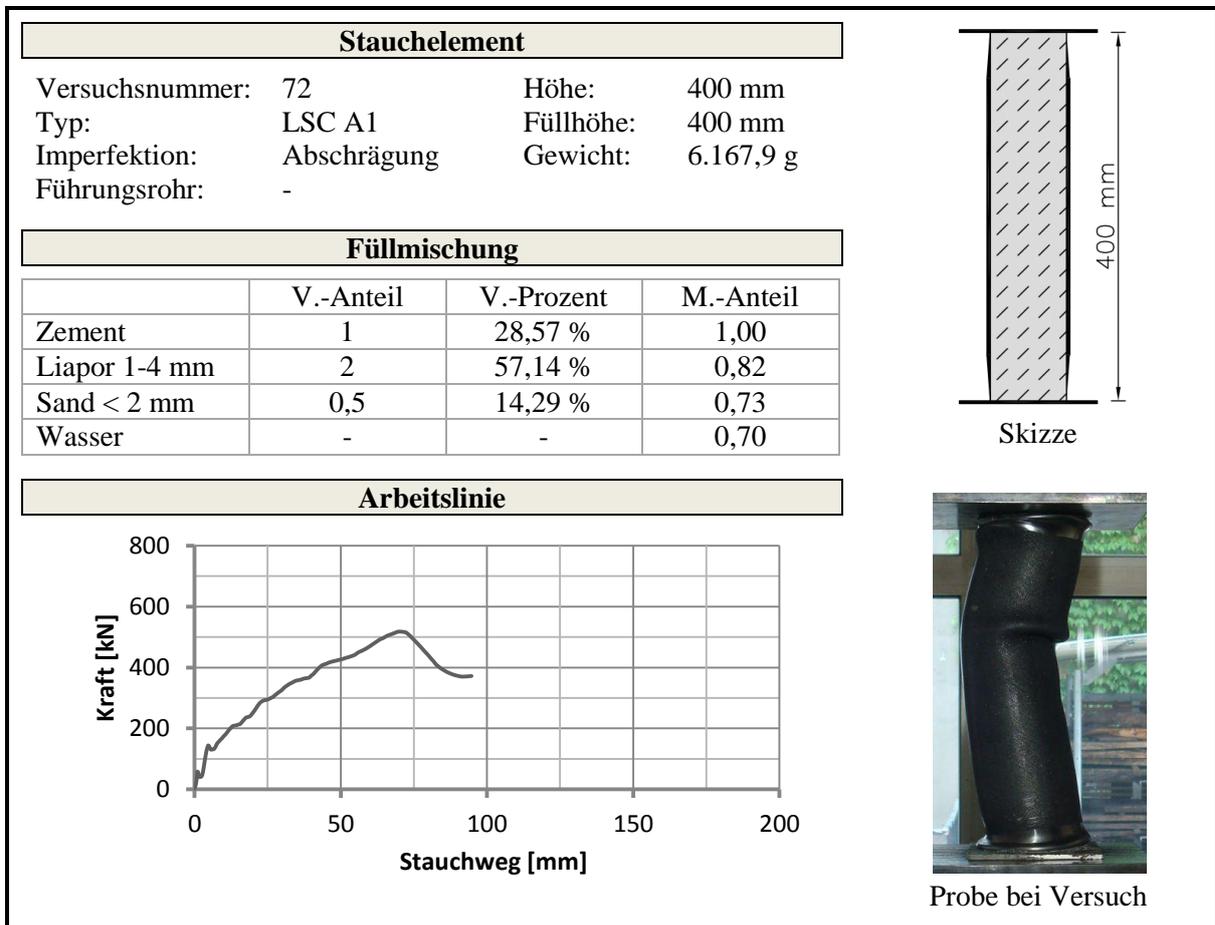
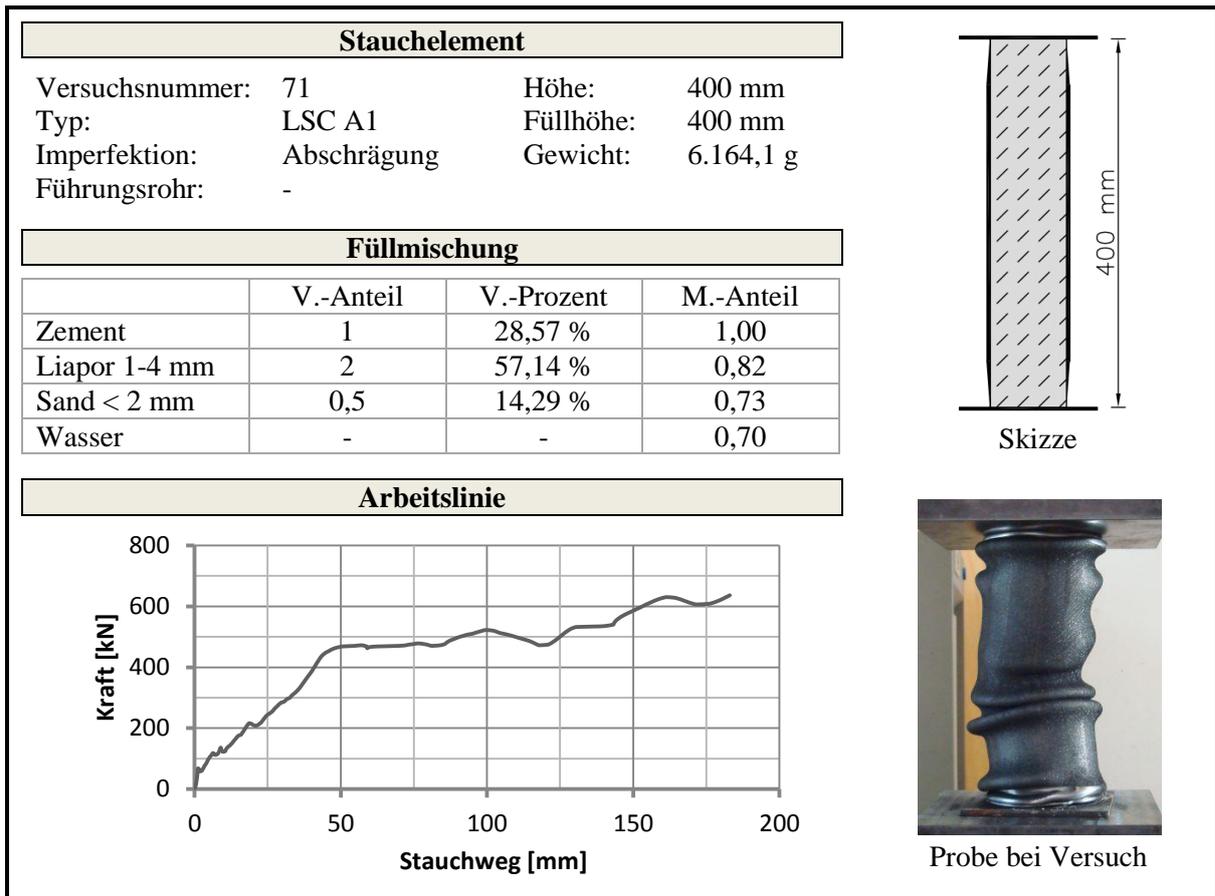










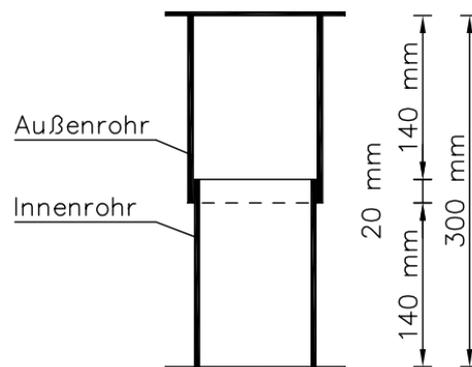


Teleskopstauchrohr

Abmessungen

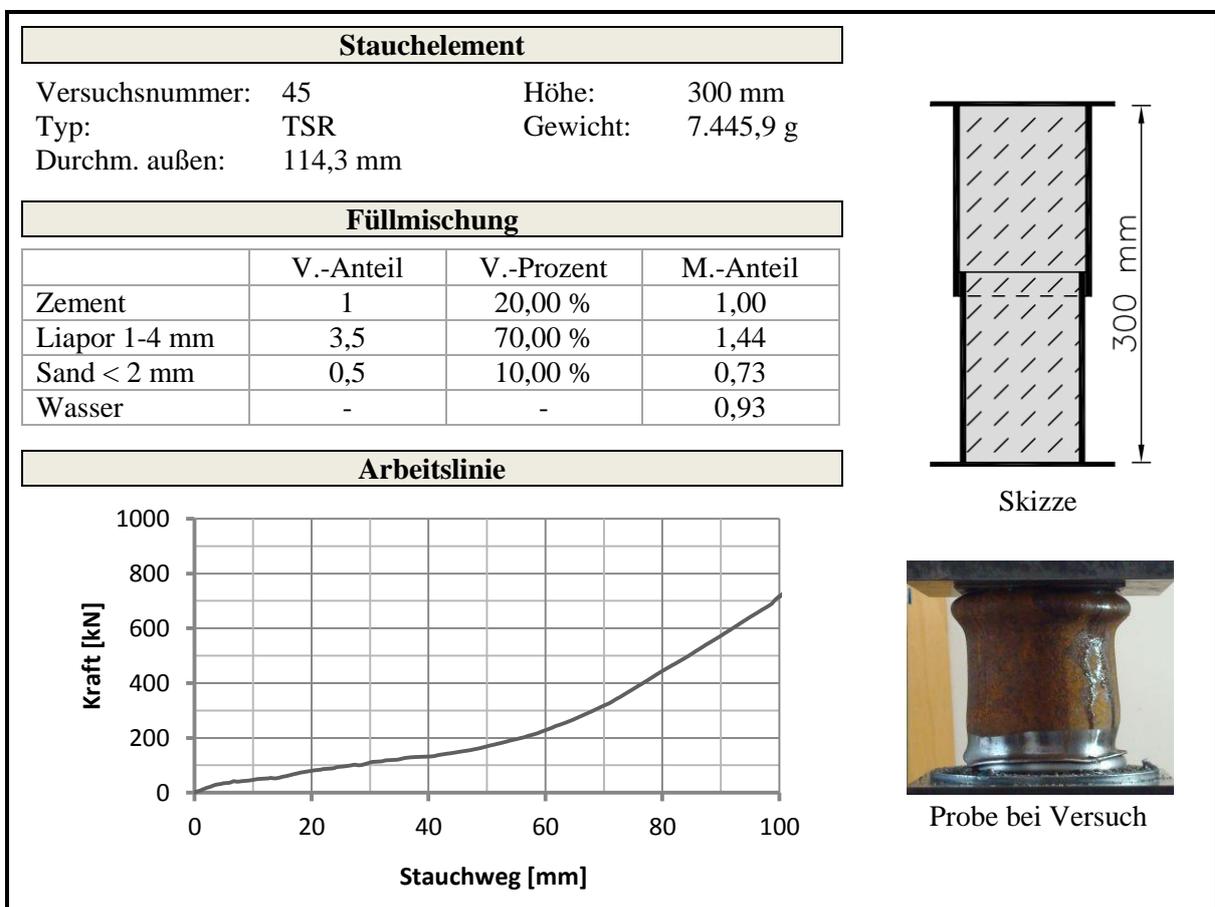
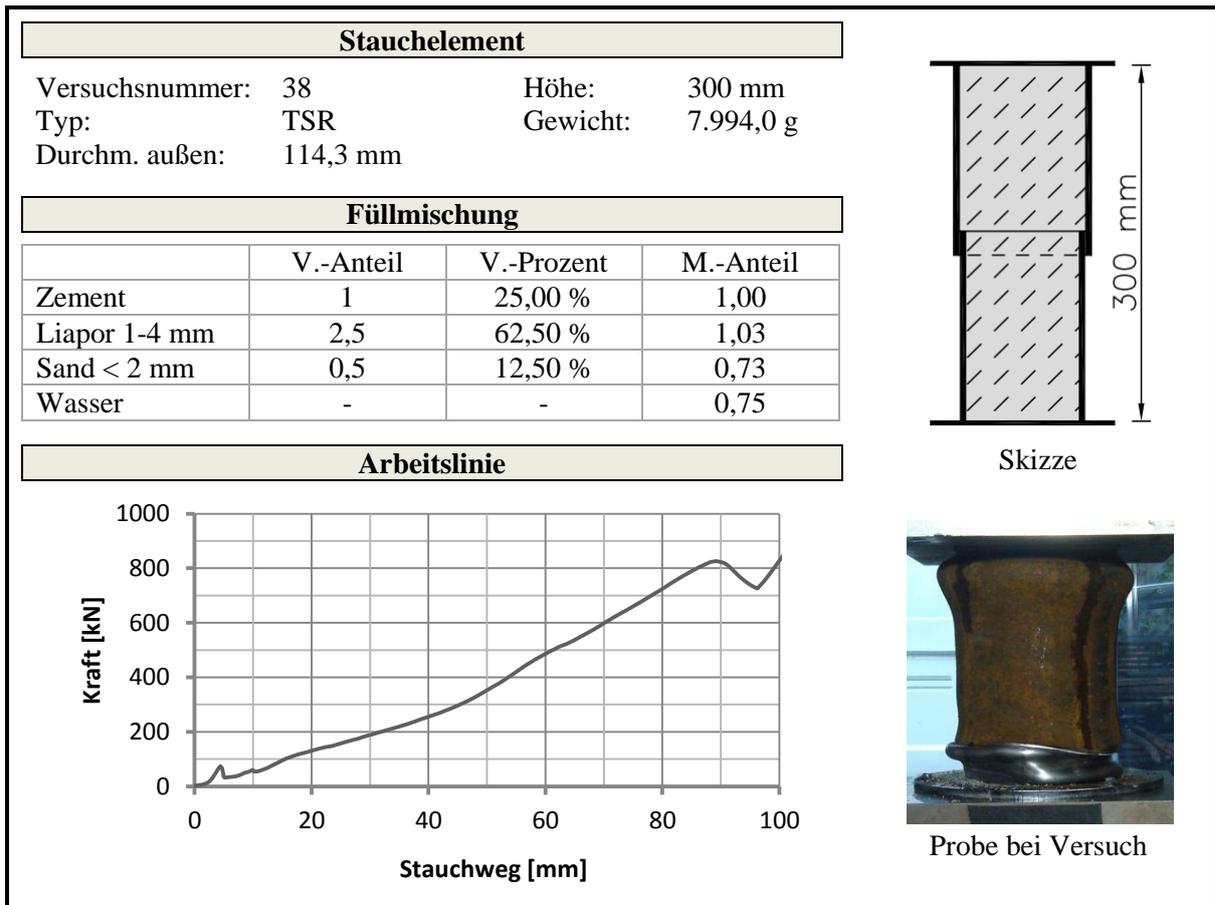
	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Außenrohr	114,3	105,3	4,5	160
Innenrohr	103,0	95,0	4,0	160
Gesamt	-	-	-	300

Skizze



Fotos

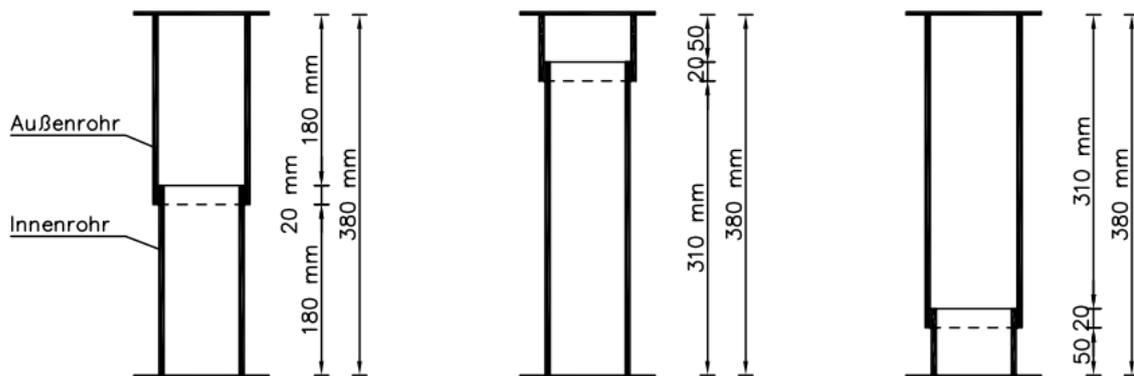




Abmessungen

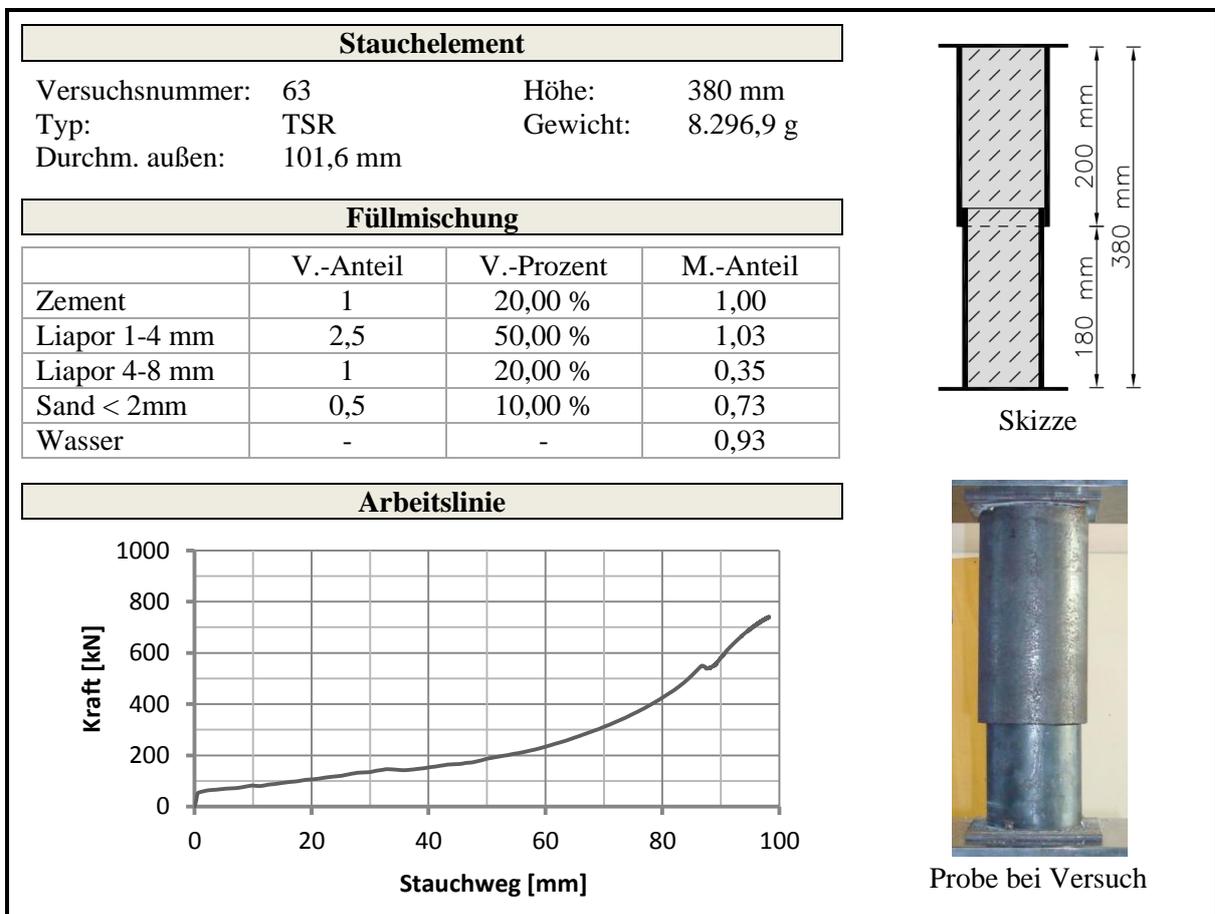
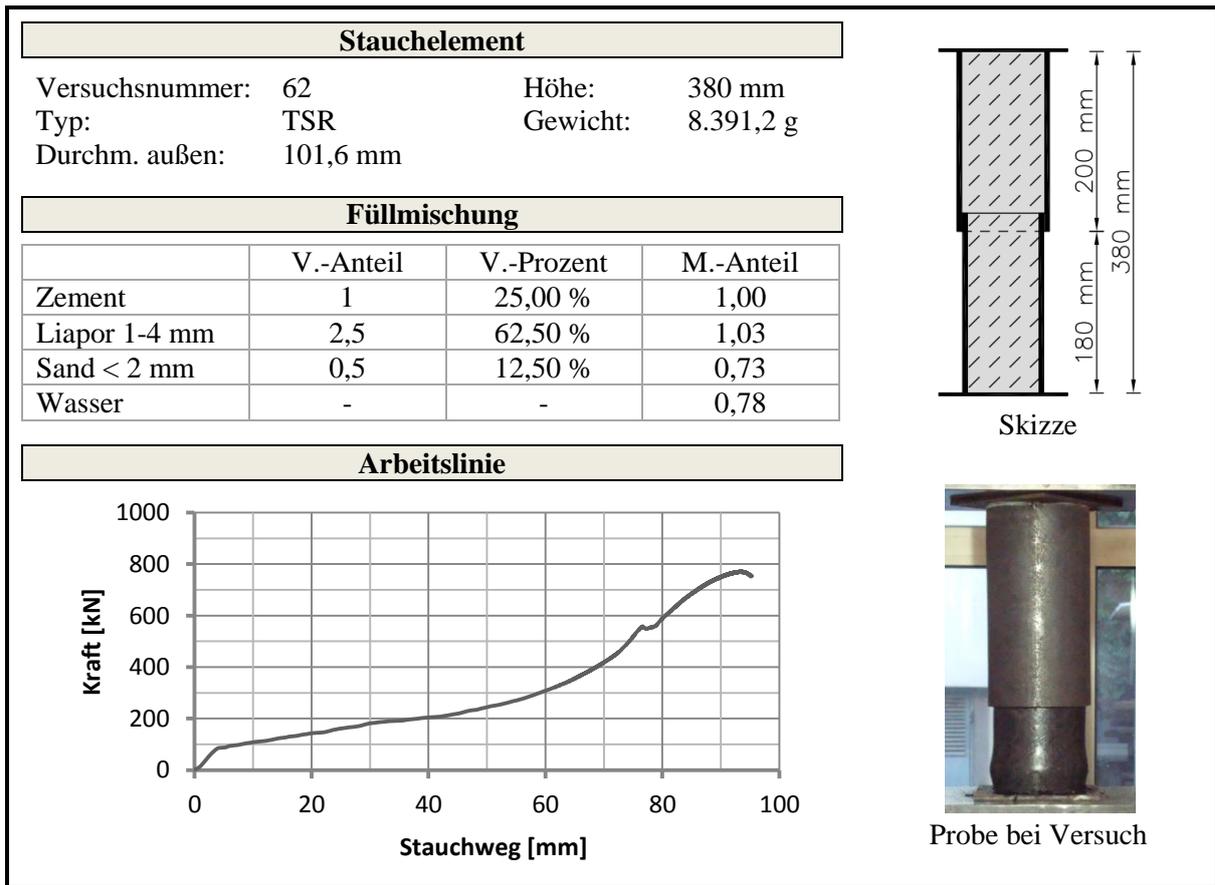
	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Außenrohr	101,6	91,6	5,0	70 / 200 / 300
Innenrohr	88,9	78,9	5,0	330 / 200 / 70
Gesamt	-	-	-	380

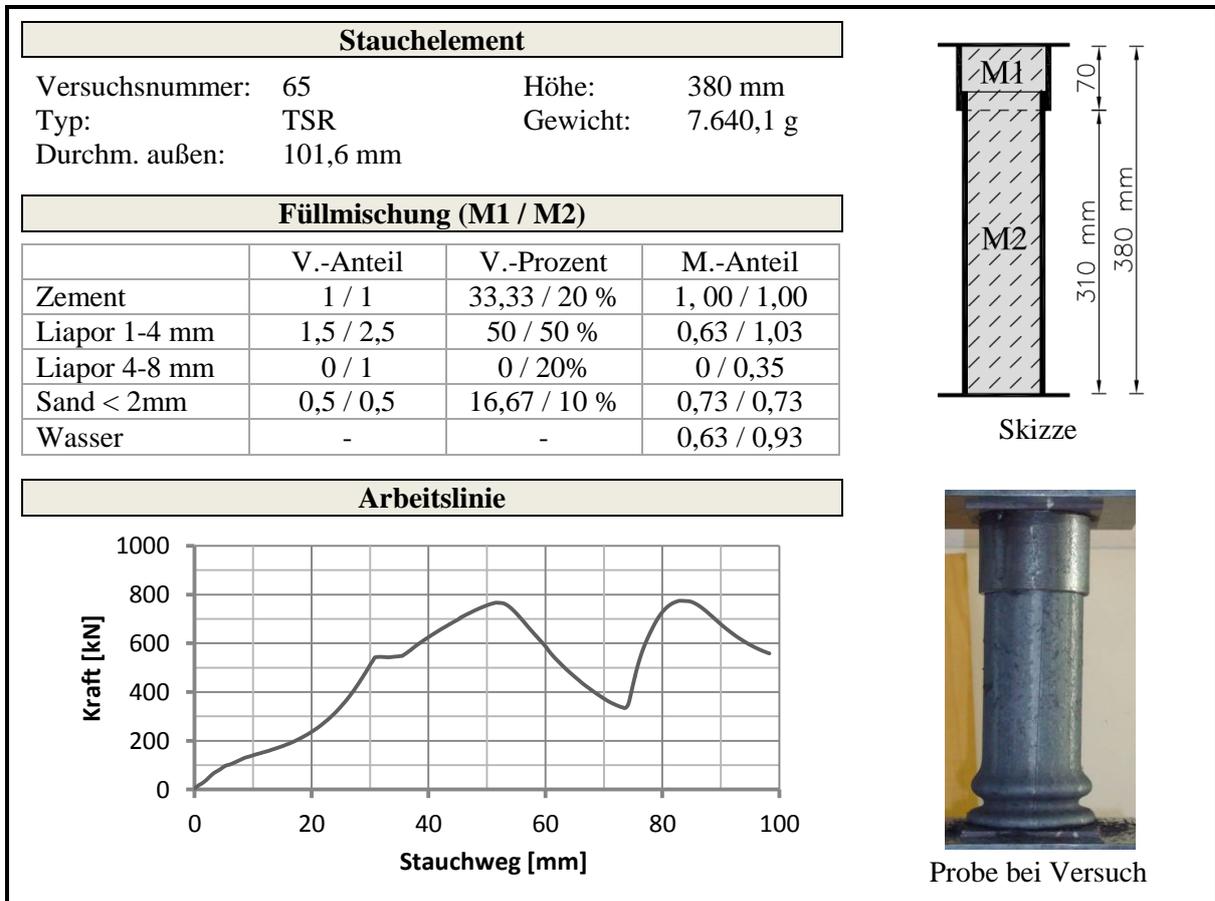
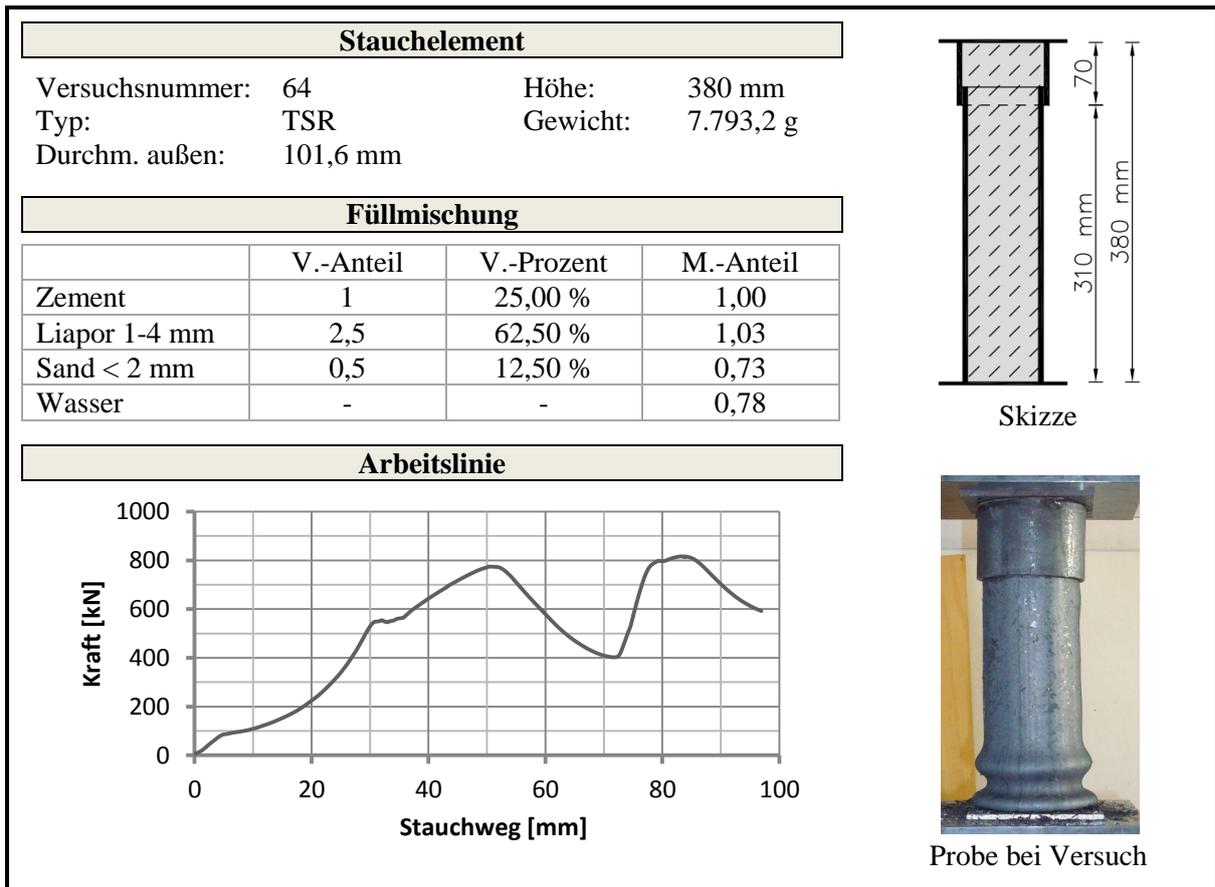
Skizze

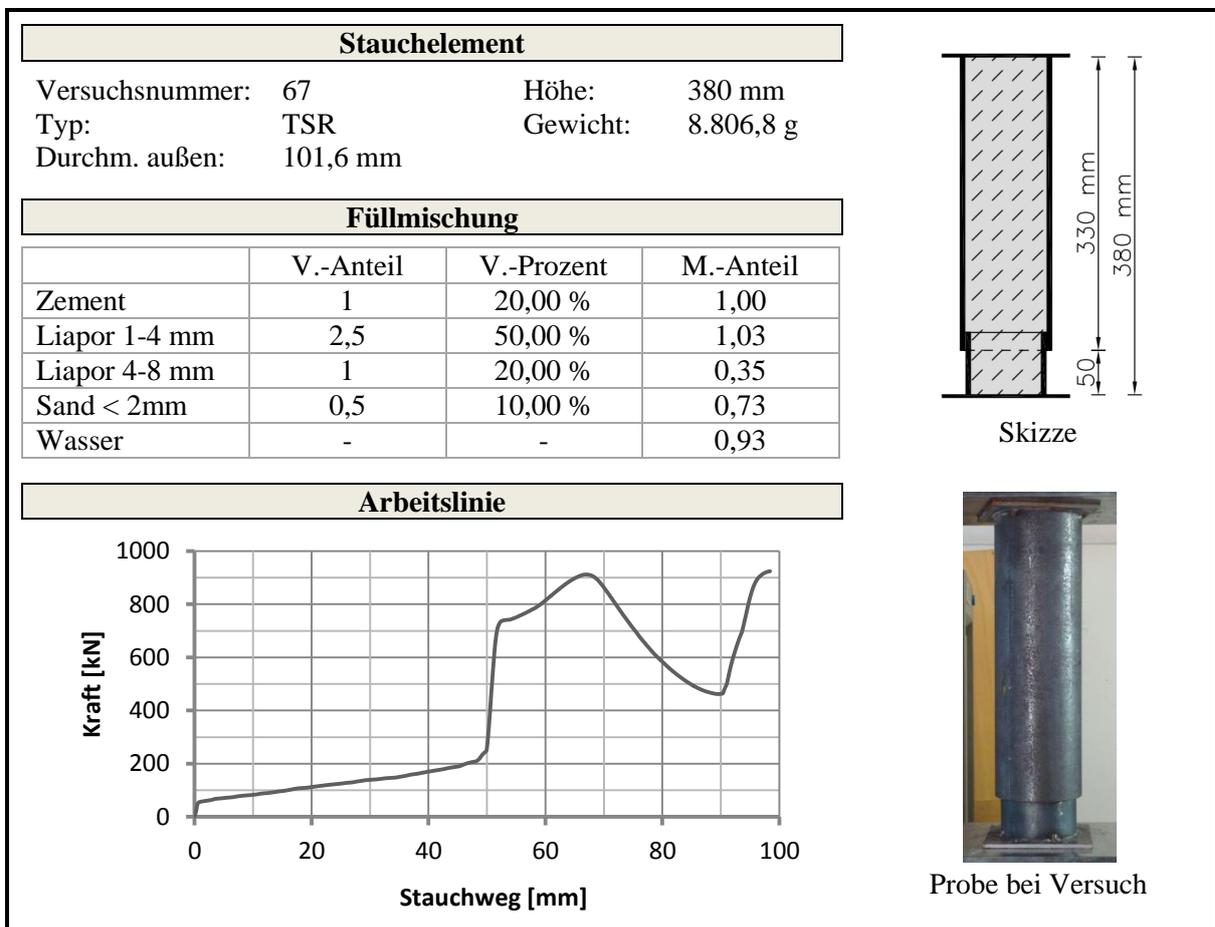
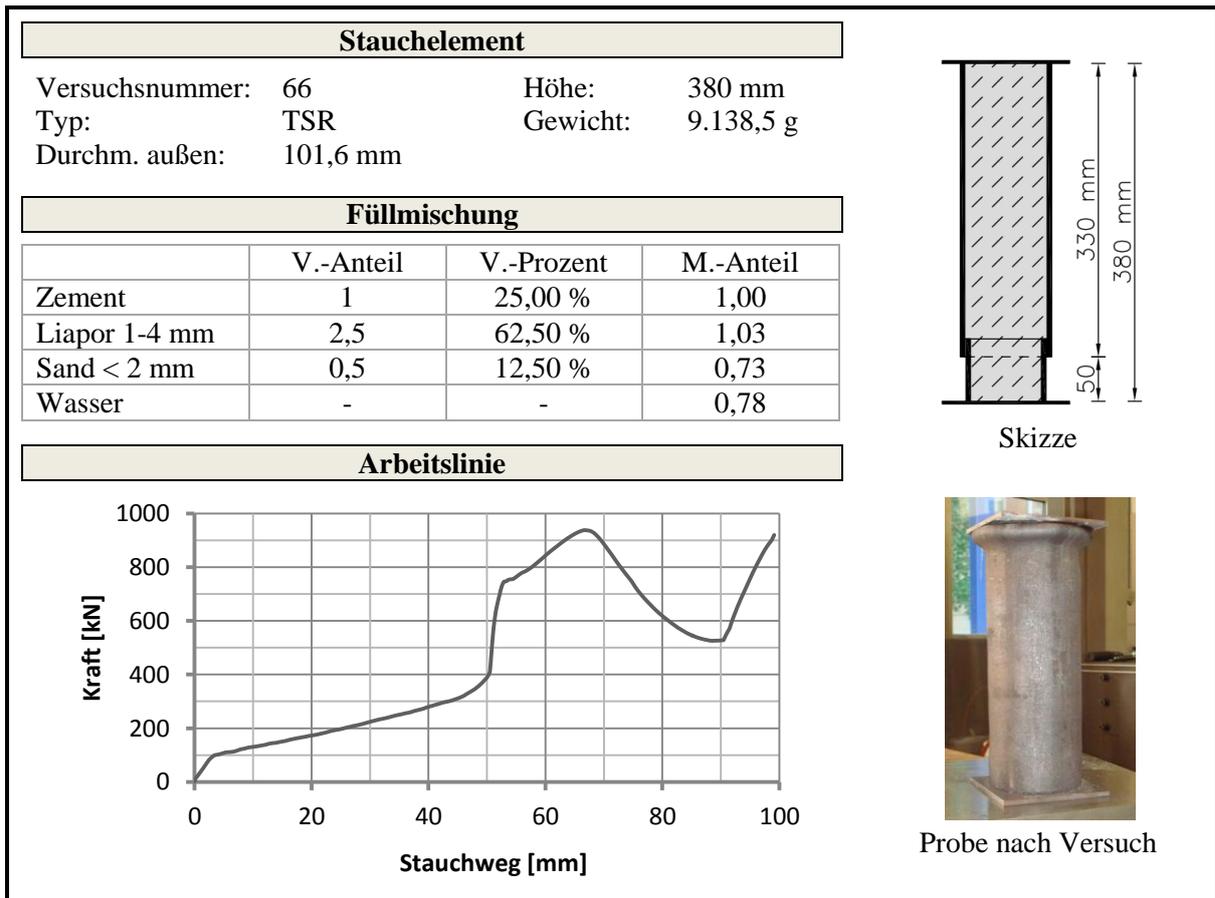


Fotos





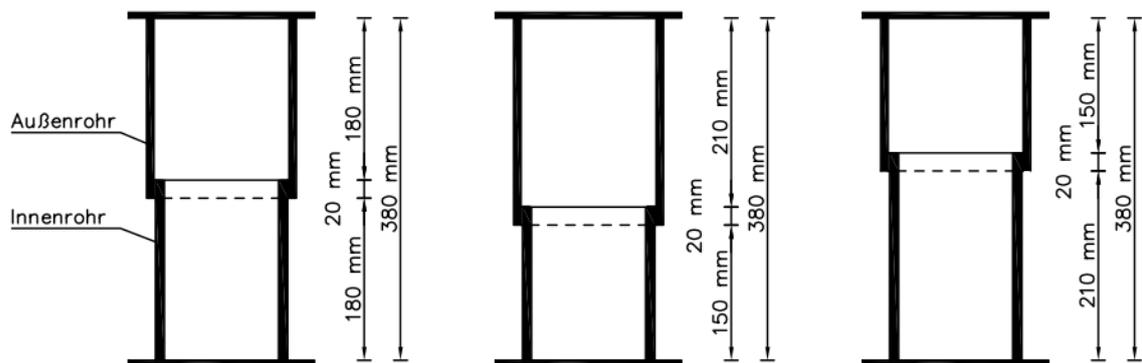




Abmessungen

	Durchmesser außen [mm]	Durchmesser innen [mm]	Wanddicke [mm]	Höhe [mm]
Außenrohr	165,1	149,1	8,0	170 / 200 / 230
Innenrohr	146,0	126,0	10,0	170 / 200 / 230
Gesamt	-	-	-	380

Skizze



Foto



