

# **Masterarbeit**

zum Erwerb  
des akademischen Grades Diplomingenieur  
der Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen - Bauingenieurwissenschaften

von

**Ing. Steirer Bernhard, BSc**

eingereicht am  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau  
der Technischen Universität Graz  
Vorstand: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Thema der Masterarbeit

**Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial  
für Fernwärmeleitungen unter Aufrechterhaltung der  
Wärmedämmeigenschaften**

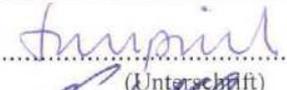
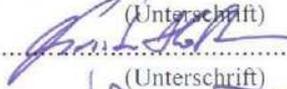
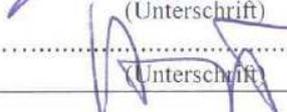
Betreuer:  
O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

2.Betreuer:  
Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christan Hofstadler

mit betreuender Assistent:  
Oberrat Dipl.-Ing. Otto Henögl

Graz, März 2010

**MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL**  
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: Bernhard STEIRER, BSc. (Name)	0030 690 / F 066 469 (Mat.Nr.)/(Studierrichtung)
 ..... (Unterschrift)	
<p>THEMA der Diplomarbeit/Masterarbeit: <b>Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen unter Aufrechterhaltung der Wärmedämmeigenschaften</b></p> <p>ZIELSETZUNG (stichwortartig):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Literatursuche und -studium, Formulierung der Anforderungen</li><li>- Durchführung von Laborversuchsreihen mit mindestens 8 Rezepturen und Langzeitversuchen bis zu 3 Monaten: Entwicklung einer labortechnisch, herstellungstechnisch, thermisch und wirtschaftlich optimierten Rezeptur (Mischungsva-riation von Thermosand unterschiedlichen Wassergehaltes mit Fließmittel, Luftporenbildner und Zement)</li><li>- Erfüllung der Anforderungen, Parameterstudie,</li><li>- Kostenermittlung für Lagerung, Mischung und Einbau der optimierten stabilisierten Thermosandmischung für Fernwärmestrecken in Wien in Zusammenarbeit mit ortsansässigen Baufirmen</li></ul>	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET: Baubetrieb und Bauwirtschaft	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. Stephan Semprich (Name)	 ..... (Unterschrift)
ggf. 2. BETREUER: Univ.-Doz. Dr. DI Christian Hofstadler (Name)	 ..... (Unterschrift)
mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Henögl (Name)	 ..... (Unterschrift)
AUSGABEDATUM: 14.04.2009	
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 14.09.2009	

**Beurteilung:**

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

6.5.2009 .....  
Datum und Unterschrift des Studiendekans

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## Danksagung

In erster Linie bedanke ich mich bei meinen Eltern, Hermann und Annemarie Steirer, die mir dieses Studium ermöglichten und mir vor allem durch ihre jahrelange Geduld und durch Ihre Erfahrung eine große Unterstützung darstellten.

Auch möchte ich mich bei O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Semprich bedanken, dass er mir die Möglichkeit gab, am Institut für Bodenmechanik und Grundbau an der TU Graz diese Masterarbeit zu schreiben.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Hr. Oberrat Dipl.-Ing. Otto Henögl und bei Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler für ihre permanente Unterstützung und fachliche Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Dank gebührt auch meiner Freundin Heidi, die mir durch ihr rücksichtsvolles Verhalten sehr viel Kraft zur Vollendung meines Studiums und Erstellung dieser Masterarbeit gab.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Geschwistern Marianne, Hermann, Gabriele und Stefanie sowie bei meinen Freunden, die mich während meines ganzen Studiums begleitet haben.

Abschließend möchte ich mich noch bei den Mitgliedern des Verkehrswesenzeichensaales der TU Graz für viele unterstützende und beratende Gespräche bedanken.

Graz, März 2010

## Kurzfassung

Im Zuge der vorliegenden Masterarbeit wurden Thermosandmischungen als stabilisierte Verfüll- und Bettungsmaterialien (SVM) in Rohrgräben bei der Verlegung von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren unter der Ausnutzung der guten Wärmedämmeigenschaften des Thermosandes untersucht.

In den ersten beiden Kapiteln werden die speziellen Materialeigenschaften des sogenannten Thermosandes behandelt sowie Grundsätzliches über stabilisierte Bettungsmaterialien und den Aufbau von Fernwärmeleitungen erklärt.

Das 3. Kapitel definiert die Anforderungen an die neuartige Materialmischung. Zudem werden Laborversuche festgelegt, die zur Überprüfung der Eignung von Thermosandmischungen als stabilisierte Verfüllmaterialien für erdverlegte Fernwärmerohre notwendig sind. Weiters soll durch die Ergebnisse dieser Untersuchungen ihre Verwendbarkeit definiert werden.

Im Kapitel 4 sind die durchgeführten Laborversuchsreihen erklärt. Es wurden 18 verschiedene Rezepturen hergestellt und untersucht, um die einsatztechnisch, thermisch und wirtschaftlich optimale Mischung herauszufinden.

Kapitel 5 beschreibt die Durchführung und Auswertung von Versuchen an einer Versuchsstrecke der Fernwärme Wien mit eingebrachten Thermosandmischungen unterschiedlicher Zusammensetzung.

Die Ermittlung der Wärmedämmeigenschaften des Thermosandes als stabilisiertes Bettungsmaterial erfolgt im Kapitel 6 mit der Bestimmung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes der Thermosandmischungen.

Das Kapitel 7 enthält die Interpretation und Auswertung aller Ergebnisse der Labor- und Feldversuche sowie die Definition der optimalen Thermosandmischung inklusive ihrer Resultate.

Im Kapitel 8 wird eine Kostenberechnung durchgeführt, um in weiterer Folge den Einbaupreis der fertig eingebrachten fließfähigen Thermosandmischung zu erhalten.

Kapitel 9 beinhaltet eine Zusammenfassung der Masterarbeit und das Datenblatt der optimalen Mischung.

# Thermal sand mixtures as a stabilizing bedding material for district heating pipes, utilizing the thermal insulation of thermal sand

## Abstract

This master thesis investigates the use of thermal sand mixtures as stabilizing, filling and bedding material in pipe trenches of district heating pipes. The sand mixtures were used as a thermal insulation material.

The first two chapters, deal with the special characteristics of thermal sand as well as with stabilizing bedding materials and the structure of district heating pipes in general.

The 3<sup>rd</sup> chapter determines the conditions of the newly developed mixture. Further, it contains results of laboratory experiments, which serve to explain the suitability of thermal sand mixtures as stabilizing filling materials for buried district heating pipes. In further consequence, the results of the experiments shall serve to determine the usability of the new mixture.

Chapter 4 contains explanations about the test series carried out. In order to find out the optimal mixture, eighteen different formulas were produced and analysed.

Chapter 5 describes the process and analysis of experiments with brought in thermal sand mixtures of diverse compositions, taken place at a trial track of ‚Fernwärme Wien‘.

The thermal insulation characteristics of thermal sand as a stabilizing bedding material are explained in chapter 6. The heat conductivity coefficient of the thermal sand mixture is determined here.

Chapter 7 contains interpretations and evaluations of all the results of laboratory and field experiments, as well as the formula of the optimal thermal sand mixture, including its results.

Chapter 8 contains a calculation of costs, in order to obtain the price of installation regarding a readily usable and flowable mixture of thermal sand.

Chapter 9 contains a summary of the master thesis, as well as the data sheet of the optimal mixture.

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	<b>Was ist Thermosand?</b>	2
2.1.1	Laboruntersuchungen am Thermosand	3
2.2	<b>Verfüllmaterialien</b>	4
2.2.1	Übersicht über die Verfüllmaterialien (nach ONR 23131, 2005)	4
2.2.2	Stabilisierte Verfüllmaterialien (SVM, nach ONR 23131, 2005)	4
2.2.3	Eigenschaften der SVM (nach ONR 23131)	6
2.2.4	Bezeichnung von SVM (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)	8
2.3	<b>Fernwärmeleitungen</b>	9
2.3.1	SVM für den Einbau von Fernwärme-Kunststoff- verbundmantelrohren	10
<b>3</b>	<b>Anforderungen</b>	<b>11</b>
3.1	<b>Anforderungen von SVM an die Leitungszone (nach ONR 23131, 2005, und ONR FW 110A, 1999)</b>	11
3.1.1	Konsistenzklassen von Betonen (nach ÖNORM B 4710-1, 2007)	13
3.1.2	Absetzverhalten (nach ONR 23131, 2005)	14
3.1.3	Wiederaufgrabbarkeit	15
3.2	<b>Allgemeine Anforderungen (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)</b>	18
3.2.1	Überwachung von SVM	18
3.2.2	Vorgaben für den Einbau von SVM	18
<b>4</b>	<b>Laboruntersuchungen</b>	<b>20</b>
4.1	<b>Verwendete Mischungsparameter</b>	20
4.2	<b>Herstellung der Proben</b>	21
4.2.1	Herstelldaten der Mischungen	22
4.3	<b>Bestimmung des Ausbreitmaßes (nach ÖNORM 12350-5, 2009)</b>	23
4.3.1	Versuchsgeräte	23
4.3.2	Durchführung	24
4.3.3	Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche	26

<b>4.4</b>	<b>Bestimmung des Absetzmaßes (nach ONR 23131, 2005)</b>	<b>29</b>
4.4.1	Versuchsgeräte	29
4.4.2	Durchführung	29
4.4.3	Ergebnisse der Absetzmaßversuche	31
<b>4.5</b>	<b>Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (nach ÖNORM B 4415, 2010)</b>	<b>34</b>
4.5.1	Versuchsgeräte	34
4.5.2	Durchführung	35
4.5.3	Ergebnisse der Einaxialversuche	37
4.5.4	Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung (nach ÖNORM B 4410, 1974)	38
4.5.5	Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung	39
4.5.6	Ergebnisse der Trockendichtebestimmung	40
<b>5</b>	<b>Datenauswertung Versuchsstrecke Fischhofgasse</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Situierung, Aufbau und Darstellung der Versuchsstrecke</b>	<b>41</b>
5.1.1	Geographische Lage	41
5.1.2	Einbau der Thermosandmischungen	42
5.1.3	Ausbau der Bodenproben	43
<b>5.2</b>	<b>InSitu-Versuche und Laborversuche</b>	<b>44</b>
5.2.1	Rammsondierung nach Beletz	44
5.2.2	Durchführung der Rammsondierung	45
5.2.3	Entnahme von Stechzylindern zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (nach Ö-NORM B4401-1, 1980 und Ö-NORM B4415, 2010)	46
5.2.4	Ergebnisse der Laborversuchsreihe Fischhofgasse	48
<b>6</b>	<b>Ermittlung der Wärmedämmeigenschaften</b>	<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>Wärmeleitung im Boden</b>	<b>57</b>
6.1.1	Grundlagen der Wärmeleitung	57
6.1.2	Der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda$ bei Messungen an Bettungsmaterialien	57
<b>6.2</b>	<b>Die Bestimmung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes <math>\lambda</math> von Bettungsmaterialien</b>	<b>58</b>
6.2.1	Erklärung des Messprinzips	58
<b>6.3</b>	<b>Durchführung der Wärmemessungen</b>	<b>59</b>
6.3.1	Vorbereitung	59
6.3.2	Messung mit der Halbraumsonde	60

6.3.3	Messung mit der Vollraumsonde	61
<b>6.4</b>	<b>Auswertung der Messungen</b>	<b>62</b>
6.4.1	Das $\lambda$ -Diagramm	62
6.4.2	Das $\lambda$ -Diagramm als Normalverteilung nach Gauß	63
6.4.3	Ergebnisse der $\lambda$ -Messungen bei den Probenreihen 9,12 und 17	63
6.4.4	Zusammenhang zwischen Wassergehalt und $\lambda$ -Werten	65
<b>7</b>	<b>Auswertung</b>	<b>66</b>
7.1	<b>Vorgehensweise zur Festlegung der empfohlenen Mischung</b>	66
7.2	<b>Eigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit der 3 besten Mischungen</b>	67
7.3	<b>Ergebnisse der Probenreihe 17</b>	71
7.3.1	Einaxiale Druckfestigkeit nach 3 Tagen	73
7.3.2	Einaxiale Druckfestigkeit nach 7 Tagen	74
7.3.3	Einaxiale Druckfestigkeit nach 14 Tagen	75
7.3.4	Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen	76
7.3.5	Wärmeleitfähigkeitbeiwert $\lambda$ der SVM-Probenreihe 17 nach 28 Tagen	77
<b>8</b>	<b>Kostenberechnung</b>	<b>79</b>
8.1	<b>Kalkulation nach ÖNORM B 2061</b>	79
8.1.1	Österreichische Baugeräteliste	80
8.1.2	Geräteleistung und Gerätekosten	80
8.2	<b>Baubetrieblicher Ablauf mit dazugehörigen Einheitspreisen</b>	81
8.2.1	Baustelle einrichten	81
8.2.2	Asphalt aufschneiden	81
8.2.3	Rohrgrubenaushub	82
8.2.4	Verfuhr	82
8.2.5	Pölzen	82
8.2.6	Montage der Fernwärmerohre	82
8.2.7	Antransport des Thermosandes	82
8.2.8	Abmischen des Thermosandes	83
8.2.9	Hinterfüllen der Leitungszone	83
8.2.10	Hinterfüllen der Auffüllungszone	83
8.2.11	Asphalt aufbringen	83
8.3	<b>Herstellpreis des fertig eingebauten Thermosandes als SVM</b>	84

<b>9 Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
<b>10 Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Anlagen</b>	<b>92</b>
Anlage 1: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 7 Tagen	92
Anlage 2: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 14 Tagen	93
Anlage 3: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 28 Tagen	94
Anlage 4: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 7 Tagen	95
Anlage 5: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 14 Tagen	96
Anlage 6: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 28 Tagen	97
Anlage 7: Einaxialversuche der Probenreihe 2	99
Anlage 8: Einaxialversuche der Probenreihe 3	100
Anlage 9: Einaxialversuche der Probenreihe 4	102
Anlage 10: Einaxialversuche der Probenreihe 5	103
Anlage 11: Einaxialversuche der Probenreihe 13	105
Anlage 12: Einaxialversuche der Probenreihe 13	106
Anlage 13: Einaxialversuche der Probenreihe 14	107
Anlage 14: Einaxialversuche der Probenreihe 16	107
Anlage 15: Einaxialversuche der Probenreihe 18	108
Anlage 16: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410: Proben 1-18	112
Anlage 17: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410: Proben Fischhofgasse	116
Anlage 18: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410 nach der Wärmeleitfähigkeitsmessung der Proben 9,12,17:	117
Anlage 19: Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte Probenreihe 9	118
Anlage 22: Formblatt K6E-Mobilbagger	126
Anlage 23: Formblatt K6E-LKW mit Kran	127
Anlage 24: Formblatt K6E-Vibrationsplatte	128
Anlage 25: Formblatt K6E-Kleindumper	129
Anlage 26: Formblatt K6E-Fugenfräse	130
Anlage 27: Formblatt K6E-Straßenfertiger	131
Anlage 28: Formblatt K6E-LKW	132
Anlage 29: Formblatt K7-Einrichten Baustelle	133

Anlage 30: Formblatt K7-Asphalt schneiden	134
Anlage 31: Formblatt K7-Aushub	135
Anlage 32: Formblatt K7-Verfuhr	136
Anlage 33: Formblatt K7-Pölzen	137
Anlage 34: Formblatt K7-Antransport	138
Anlage 35: Formblatt K7-Abmischen des Thermosandes	139
Anlage 36: Formblatt K7-Hinterfüllen Leitungszone	140
Anlage 37: Formblatt K7-Hinterfüllen Auffüllungszone	141
Anlage 38: Formblatt K7-Asphaltieren	142
Anlage 39: Ausführungsplan Fischhofgasse	143
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>144</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>147</b>

## Symbole und Einheiten

### Große Buchstaben

A	Fläche [m <sup>2</sup> ]
D <sub>Pr</sub>	Verdichtungsgrad [%]
S <sub>r</sub>	Wassersättigungsgrad [%]
V	Volumen [m <sup>3</sup> ]

### Kleine Buchstaben

c'	Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]
d	Durchmesser [m]
m	Masse [kg]
n	Porenanteil [%]
p	Druck [Pa]
t	Zeit [s]
w	gravimetrischer Wassergehalt [%]
w <sub>opt</sub>	optimaler Wassergehalt [%]

### Griechische Buchstaben

φ'	effektiver Reibungswinkel [°]
λ	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert [W/mK]
π	Kreiszahl π, Mathematische Konstante 3,14159
ρ	Feuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>d</sub>	Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>Pr</sub>	Proctordichte [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]
σ	Spannung [kN/m <sup>2</sup> ]

## Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle

## 1 Einleitung

Die Nutzung von Fernwärme hat in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein großer Nachteil besteht jedoch darin, dass nach wie vor ein beträchtlicher Anteil der transportierten Wärme trotz der immer besser werdenden Dämmmaterialien der Fernwärmeleitungen in den Untergrund verloren geht. Eine Möglichkeit, diese Wärmeverluste zu reduzieren, besteht in der Erhöhung der Dämmstärke um das Fernwärmerohr. Diese Variante ist jedoch kostenintensiv. Um die Wärmeverluste zu verringern, ist die Verwendung von wärmedämmenden Bettungsmaterialien, wie zum Beispiel Thermosand, günstiger. Der Nachweis der niedrigen Wärmeleitfähigkeit, also der guten Wärmedämmung des sogenannten Thermosandes, wurde bereits in einer früheren Diplomarbeit (Axnix, 2008) erbracht. Unter Thermosand versteht man ein rötliches Material, welches in seinem natürlichen Zustand gebranntem Klinker ähnlich ist. Herkömmliche Bettungsmaterialien, wie Kabel-, Quarz oder Recyclingsand, besitzen im Unterschied zum Thermosand nicht so gute Wärmedämmeigenschaften. Aus diesem Grund ist der Thermosand als Bettungsmaterial zu favorisieren.

Ein weiteres Kriterium zur Differenzierung von Bettungsmaterialien ist die Art der Einbringung des Sandes. Lose Schüttungen oder Eingüsse sind hier denkbar. Heutzutage werden oft stabilisierte Verfüllmaterialien im fließfähigen Zustand eingebaut, um den Arbeitsaufwand beim Einbetten der Fernwärmeröhre zu reduzieren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung des Thermosandes als stabilisiertes Bettungsmaterial bei der Verlegung von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren. Da mit lose eingebautem Thermosand keine zufriedenstellende Bettung erzeugt werden kann, ist das Hinzufügen von Fließmitteln erforderlich.

Um die Eignung von Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen zu erforschen, wurden mittels Labor- und Feldversuchen Mischungen verschiedener Zusammensetzung untersucht. Dem Thermosand werden dabei Wasser, unterschiedliche Mengen an Fließ- und Bindemitteln, sowie Stabilisatoren beigemischt.

Weiters wurde in dieser Masterarbeit auch ein Fokus auf den Einbaupreis der Thermosandmischungen als Bettungsmaterial gerichtet, um die Konkurrenzfähigkeit am Fernwärmesektor zu prüfen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Was ist Thermosand?

Unter dem Begriff Thermosand versteht man das Abraummateriale aus stillgelegten Kohlefördergebieten rund um Fohnsdorf in der Steiermark. Als Abraummateriale wird im Bergbau jenes Material bezeichnet, das gefördert wird, um Rohstoffe wie Kohle, abzubauen. Jedoch enthält der Abraum nicht ausreichend verwertbare Materialien. Er wird deshalb auf Halden gelagert oder zur Verfüllung von stillgelegten Abbaufeldern herangezogen. Das gelagerte Abraummateriale der Fohnsdorfer Halde (Abb. 2.1) enthält einen geringen Anteil an Kohle. Durch thermische Umwandlung der Kohlereste im Laufe der Jahre hat sich das in der Halde gelagerte Material so verwandelt, dass es in seinem natürlichen Zustand einem hoch gebrannten Ton (Klinker) ähnlich ist. Durch Brechen, Sieben und Klassieren auf Korngröße 0 bis 4 mm entsteht dann aus diesem rötlichen Taubmateriale der sogenannte „Thermosand“. Dieses neue Material besitzt in Bezug auf seine Zusammensetzung und Wärmeleitfähigkeit besondere Eigenschaften. Vor allem durch seinen hohen Porenanteil weist der Thermosand eine gute Wärmedämmung auf, wodurch das Material nach dem Mahlen zu einer Alternative für Bettungsmaterialien wird. Weiters ist der Thermosand durch seine günstige Kornverteilung gut verdichtbar, was einen erheblichen Vorteil für eine gute Bettung von Fernwärmerohren darstellt (Semprich, Henögl, 2003).



Abbildung 2.1: Die Halde in Fohnsdorf in der Steiermark, Österreich

### 2.1.1 Laboruntersuchungen am Thermosand

Die bodenmechanische Eignung des Thermosandes wurde durch umfassende Prüfungen am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz ermittelt (Semprich, Henögl, 2003).

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung am gegenständlichen Bettungsmaterial werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Bodenmechanisch wird der Thermosand als gering kiesiger, schluffiger Sand bezeichnet. Die Kornverteilungsanalyse nach ÖNORM B 4412 (1979) ergab beim Thermosand einen Schluff-Tonanteil von 22,8 Massenprozent (M-%), einen Sandanteil von 74,3 M-% und einen Kiesanteil von 2,9 M-%, wobei das Größtkorn 4 mm betrug. Zur Bestimmung der Kornverteilung erfolgte zunächst eine Nasssiebung mittels einer Siebmaschine mit komplettem Siebsatz. Nachfolgend wurden die übrig gebliebenen Feinteile einer Schlämmanalyse unterzogen. Die Bestimmung der Korndichte gemäß der ÖNORM B 4413 (1975) ergab einen Mittelwert von  $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$  und die Trockendichte nach ÖNORM B 4414 (1979) einen durchschnittlichen Wert von  $\rho_d = 1,44 \text{ g/cm}^3$ . Die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens wurde nach dem Standard-Proctor Verfahren gemäß ÖNORM B 4418 (1981) durchgeführt. Mit dem Proctorversuch kann festgestellt werden, bei welchem Wassergehalt sich das Material unter definierten Versuchsbedingungen am besten verdichten lässt. Der optimale Wassergehalt zur Erreichung der höchsten bodenmechanischen Festigkeiten liegt bei 25,6 %. Weiters weist der Thermosand einen sehr hohen Porenanteil von circa 48 % (Anteil des Hohlraumvolumens bezogen auf das Gesamtvolumen) auf. Dieser Porenraum erreicht in Bezug auf Standard-Proctor bei einem Verdichtungsgrad von mindestens  $D_{Pr} = 97 \%$  einen Wassersättigungsgrad von  $S_r = 61 \%$  bis 84%. Der Wassersättigungsgrad gibt dabei das Verhältnis des Wasservolumens zum Hohlraumvolumen an. Dies ist mit herkömmlichen Verdichtungsmethoden erreichbar. Die verbleibenden Hohlräume sind mit Luft gefüllt und bewirken die guten Dämmeigenschaften.

Der mittlere Reibungswinkel des Thermosandes am glatten, neuen Polyethylen-Rohr (PE-Rohr) beträgt  $28,5^\circ$ . Somit ist die Reibung zwischen der Aussenumhüllung des Fernwärmerohres (PE-Rohr) und dem Thermosand geringer als die innere Reibung des Sandes ( $34,0^\circ$ ). Zur Erreichung der nötigen Kohäsion (=Haftfestigkeit in bindigen Böden), der Gleitreibung zwischen dem Sandgefüge und dem Fernwärmerohr, ist ein Einbau mit einem Verdichtungsgrad  $D_{Pr} > 95 \%$  erforderlich, was einem Wassergehalt von  $w = 25 \%$  und einem Sättigungsgrad  $S_r > 60 \%$  entspricht.

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse ist der Thermosand aus bodenmechanischer Sicht als lose eingebautes Bettungsmaterial für Fernwärmerohre geeignet (Semprich, Henögl, 2003).

## 2.2 Verfüllmaterialien

### 2.2.1 Übersicht über die Verfüllmaterialien (nach ONR 23131, 2005)

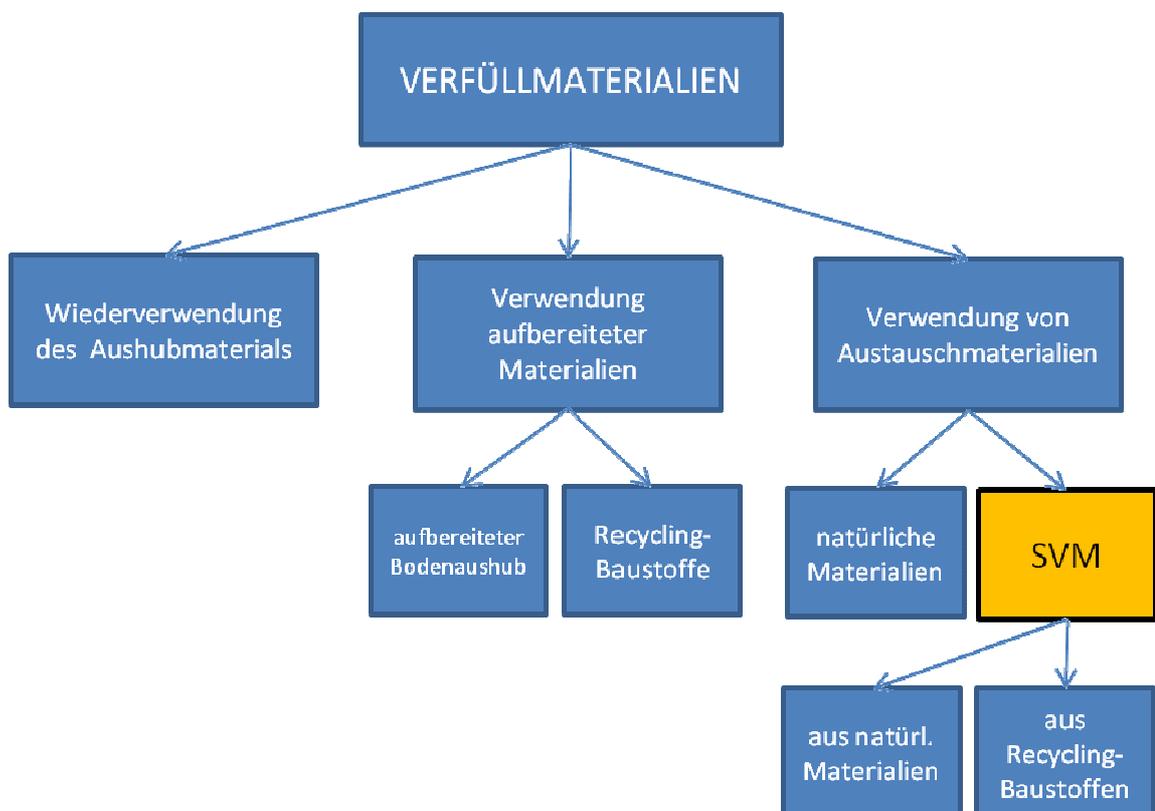


Abbildung 2.2: Übersicht über Verfüllmaterialien (nach ONR 23131, 2005)

### 2.2.2 Stabilisierte Verfüllmaterialien (SVM, nach ONR 23131, 2005)

Stabilisierte Verfüllmaterialien (SVM) werden entweder aus natürlichen Gesteinskörnungen oder aus Recyclingbaustoffen (Recycelte Füllmaterialien, RFM) hergestellt. In speziellen Fällen kann auch eine Kombination aus natürlichen und

recyclen Baustoffen produziert werden. Die hier untersuchten Thermosandmischungen sind den natürlichen Gesteinskörnungen zuzuordnen.

SVM besteht aus schluffigen Sanden (ähnlich dem Kabel- oder Recyclingsand) mit Füllstoffen von Ziegelmehl bis zum Polystyrol-Leichtzuschlag, sowie aus Bindemitteln, Additiven und Wasser (Henögl, 2006).

Diese Verfüllmaterialien werden dann im fließfähigen Zustand in die Rohr- oder Leitungsgräben eingebracht. Alle SVM-Produkte müssen pumpbar sein. Beim Verfüllen wird im Unterschied zu den herkömmlichen, nicht fließfähigen Bettungsmaterialien gänzlich auf künstliche Verdichtungsenergie (meistens mittels Flaschenrüttler) verzichtet, um eine ausreichende Bettung und eine geforderte Festigkeit entsprechend der nachfolgenden Überbauung und Nutzung zu erreichen. Der Begriff Stabilisierung kann sich dabei auf eine mechanische Stabilisierung (beispielsweise durch entsprechende Abstufung der Sieblinie des Zuschlagstoffes) oder eine Stabilisierung mit geringen Mengen an Bindemitteln beziehen. Der Anteil des Bindematerials, wie zum Beispiel Zement, darf höchstens  $50 \text{ kg/m}^3$  des fertig abgemischten Verfüllmaterials betragen. Ob die Zugabe von Bindemitteln beim Thermosand erforderlich ist, wird in dieser Arbeit untersucht.

Im Vergleich zum Thermosand zeigt die Kornverteilungsanalyse (Abb. 2.3) beim Quarzsand einen Schluff-Tonanteil von 7,3 M-%, einen Sandanteil von 87,8 M-% und einen Kiesanteil von 4,9 M-%. Bei der Analyse des Recyclingsandes betrug die Schluff-Tonmasse 17,6 M-%, der Sandanteil 64,0 M-% und der Kiesanteil 18,4 M-%. Im Gegensatz zum Quarzsand ist die Körnungslinie des Thermosandes dem Recyclingsand ähnlich und durch eine weitgestufte Kornverteilung gekennzeichnet. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Thermosand mehr Feinteile aufweist als die herkömmlichen Bettungssande und dadurch die besseren Verdichtungseigenschaften hat.

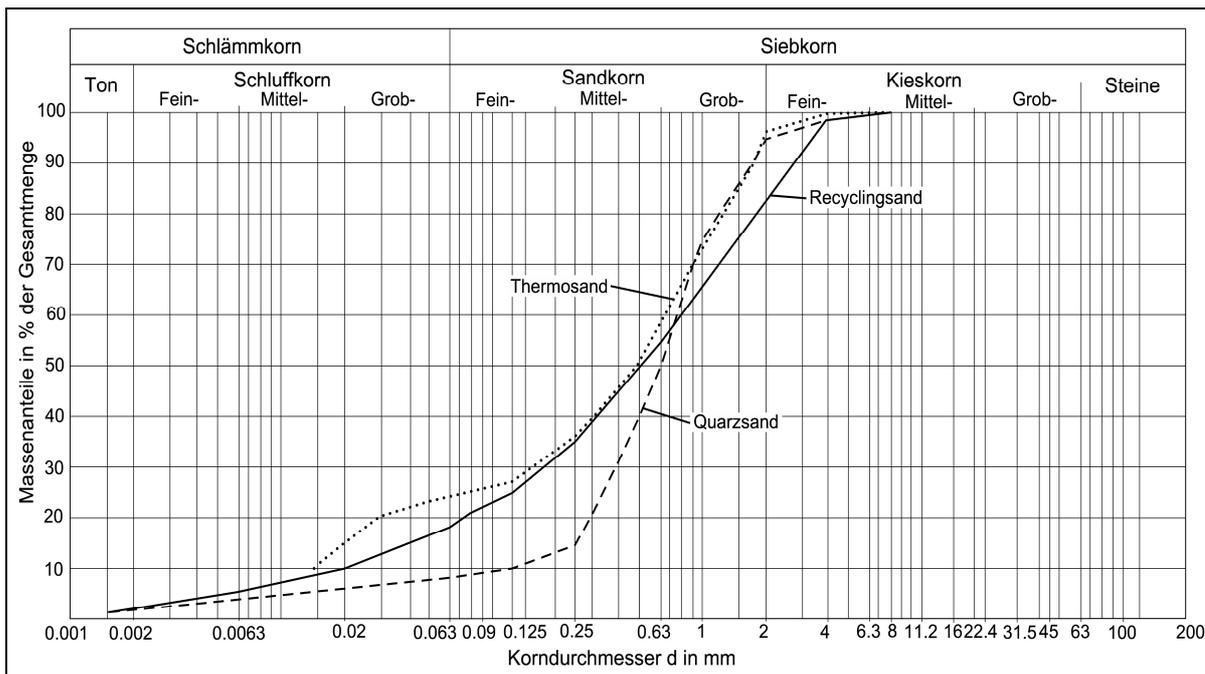


Abbildung 2.3: Vergleichende Darstellung der Kornverteilungen der Bettungsmaterialien Thermo- sand, Quarzsand und Recyclingsand (Henögl, 2006)

### 2.2.3 Eigenschaften der SVM (nach ONR 23131)

Die zur Verwendung freigegebenen stabilisierten Verfüllmaterialien haben den Vorteil, dass sie selbstverdichtend sind. Darüber hinaus ist auch eine hohlraum- freie Verfüllung gegeben.

Weiters sollen sie während der gesamten Nutzungsdauer händisch aufgrabbar bleiben. Mit händisch werden in diesem Fall Arbeiten bezeichnet, die man mit der Schaufel oder dem Krampen verrichten kann. Der Einsatz von Schremmhämmern ist nicht vorgesehen. Die Wiederaufgrabbarkeit ist von großer Bedeutung, da sich vor allem in den Künetten des städtischen Bereichs häufig viele Fernwärmeleitun- gen befinden. Bei etwaigen Reparaturen an den Rohren wäre eine zu hohe Fes- tigkeit des Bettungsmaterials problematisch.

SVM bieten bei der Verfüllung von Künetten eine Vielzahl von technischen, ökolo- gischen und wirtschaftlichen Vorteilen. Voraussetzung dafür sind aber entspre- chende Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung und der Verarbeitung von SVM. Nachfolgend sind die Vorzüge von stabilisierten Bettungsmaterialien im Vergleich zu den nicht fließfähigen Verfüll- und Bettungsmaterialien kurz aufgelistet:

- Es sind keine Verdichtungsgeräte erforderlich, was bei schmalen Rohrgräben sehr nützlich ist. Durch das vibrationsfreie Verfüllen von SVM wird auch das Arbeiten direkt neben denkmalgeschützten Gebäuden und bei Rohrgräben in Gehwegen neben Gebäuden möglich.
- Vor allem in Ballungszentren macht ein lärmarmes Verfüllen das Arbeiten bei Nacht für Anrainer und Arbeiter angenehmer.
- Bei sehr schwierig zu hinterfüllenden Bereichen, zum Beispiel wenn Rohrabzweigungen übereinander angeordnet sind oder bei Schiebergruppen und Rohrwickeln, ermöglicht dieses Verfüllmaterial trotzdem eine hohlraumfreie Verfüllung.
- SVM garantieren auch eine setzungsfreie Verfüllung, eine gleichmäßige Bettung der Rohre in Rohrlängsrichtung sowie eine gleichmäßige Einbettung der Rohre über den Rohrumfang.

### **2.2.3.1 Einteilung der SVM nach Anwendungsbereichen (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)**

Da sich aus den Einsatzbereichen die Anforderungen an das Material ergeben, hat die ONR 23131 eine Einteilung in vier Anwendungsbereiche erstellt. Dies erscheint sinnvoll, da sich die Anforderungen sehr stark voneinander unterscheiden. Nachfolgend sind die vier Zonen einer Rohrkünette angeführt.

- SVM für die Instandsetzungszone
- SVM für die Verfüllzone
- SVM für die Leitungszone
- SVM für Minierungen und kavernenartige Hohlräume

Die Verfüllung von Rohrgräben für Fernwärmeleitungen ist grundsätzlich nur in zwei Bereiche, nämlich in die Leitungs- und in die Wiederverfüllzone (Abb. 2.4), zu unterteilen. Die Leitungszone ist so definiert, dass sie nur in unmittelbarer Umge-

bung des Rohres auftritt, die Wiederverfüllzone reicht hingegen von der Leitungszone bis zum Unterbau der Fahrbahn.

Für die Verfüllung der Leitungszone sind vor allem die Anforderungen an die Wärmedämmung sowie jene an die Bettung zu beachten.

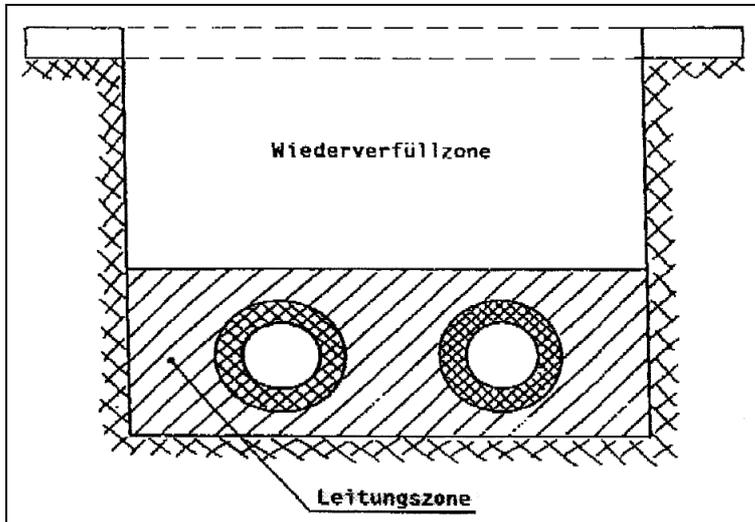


Abbildung 2.4: Aufbau einer Fernwärme-Rohrkünette

### 2.2.4 Bezeichnung von SVM

(nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)

Die Bezeichnung von SVM erfolgt nach dem Größtkorn (GK) und dem Konsistenzbereich (F). Zum besseren Verständnis dient folgendes Beispiel: SVM GK4, F59. Hierbei handelt es sich um ein stabilisiertes Verfüllmaterial mit einem Größtkorn von 4 mm und einer Konsistenzklasse von F59 (wird im Kapitel 3.1.1 beschrieben). Weiters müssen Angaben hinsichtlich der spezifischen Eigenschaften sowie in Bezug auf mengenmäßige Anteile gemacht werden. Diese sind folgendermaßen beschrieben:

- Angaben über das verwendete Grundmaterial, wie zum Beispiel Quarzsand, Recyclingsand oder wie in der vorliegenden Arbeit Thermosand
- Angabe der Sieblinie des Grundmaterials (wie in Punkt 2.2.2 beschrieben)
- Angabe über die Zuschlagstoffe, wie zum Beispiel Zement
- Angabe über chemische Zusätze, wie Stabilisatoren oder Frostschutzmittel
- Angaben über den Wassergehalt zu den relevanten Zeitpunkten, wie Anlieferung oder Verfüllung
- Angaben über die Aufbereitung der Mischung

## 2.3 Fernwärmeleitungen

Heutzutage werden Fernwärmeleitungen häufig durch das direkt erdverlegte Kunststoffverbundmantelrohr (KVM-Rohr) ausgeführt. Dieses Leitungssystem hat sich als sehr zuverlässig erwiesen. Die Verlegung der vorisolierten Kunststoffverbundmantelrohre (Abb. 2.5) geschieht in offener Bauweise. Man unterscheidet erdverlegte KVM-Rohre unter befestigten oder unbefestigten Oberflächen. Die Überdeckungshöhe beträgt mindestens 80 cm. Üblicherweise werden zwei Leitungen (Vorlauf und Rücklauf) nebeneinander verlegt. In der Vorlaufleitung wird Wasser unter Druck mit Temperaturen bis ca. 130° C zum Endverbraucher transportiert. In den Rücklaufleitungen fließt der abgekühlte Wärmeträger mit einer Temperatur von ca. 70° C zum Heizwerk zurück. Kunststoffverbundmantelrohre bestehen aus einem so genannten Mediumrohr (Stahlinnenrohr mit einer Mindeststahlgüte von St 37), einer Kunststoffmanteldämmung aus Polyurethan-Hartschaumstoff (PUR-Schaum), sowie einem Mantelrohr aus Polyethylen (PE). Das Medium- und das Mantelrohr sind durch den Dämmstoff miteinander verbunden. Die äußere Schicht aus Polyethylen schützt das Mediumrohr und den PUR-Schaum vor Grundwasser, Feuchte und mechanischer Beschädigung.



Abbildung 2.5: Querschnitte von verschiedenen Kunststoffverbundmantelrohren

Mediumrohre haben einen Nenndurchmesser von DN 15 bis DN 1200 mm. Die Stahlwanddicken betragen 2 bis 12,5 mm. Bei den Mantelrohren gibt es Nennaußendurchmesser von DN 75 bis DN 1400 mm. Die Dämmstärke ergibt sich aus der Differenz des Innendurchmessers des Mantelrohres und des Außendurchmessers des Mediumrohres. Eine gängige Dimension ist ein Stahlmediumrohr DN 100 mm mit einer Mindestwanddicke von 3,6 mm. Das dazugehörige Mantelrohr

aus PE mit DN 200 mm hat eine Mindestwanddicke von 3,2 mm (ÖNORM EN 253, 2009).

Mit der Verwendung des erdfeuchten Thermosandes als Bettungsmaterial erspart man sich höhere Dämmstärken. Allerdings verbraucht das Einbauen des herkömmlichen Thermosandes wie auch der anderen losen Bettungssande relativ viel Zeit. Ein weiteres Problem ist die schwierige Verdichtung. Deshalb erscheint die Variante, Thermosand als stabilisiertes Bettungsmaterial einzubauen, sehr sinnvoll.

### **2.3.1 SVM für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffverbundmantelrohren**

Stabilisierte Verfüllmaterialien haben in Österreich in den letzten Jahren für die Verlegung von Fernwärmerohren (KVM) stark an Bedeutung gewonnen. Hier ist vor allem die stabilisierte Sandmischung (SSM-F) der Firma Schwarzl in Graz hervorzuheben. Mit diesem Material haben Fernwärmeversorgungsunternehmen vorwiegend positive Erfahrungen gemacht. Hingegen wurden mit anderen stabilisierten Verfüllmaterialien teilweise keine guten Ergebnisse erzielt. Wie die Erfahrungen gezeigt haben, unterscheiden sich die SVM wesentlich in ihren Eigenschaften. Deshalb gibt es eine Reihe von Einbauvorschriften für die Herstellung von Fernwärmeleitungen. Für erdverlegte Fernwärmenetze sind die Anforderungen und Prüfmethode für gerade, werkmäßig gedämmte Mantelrohre festgelegt, die aus einem Stahlrohr als Mediumrohr, einer Polyurethan-Hartschaumdämmung und einem Mantelrohr aus Polyethylen bestehen. Diese einschlägigen Regelwerke sind nachfolgend kurz angeführt. Die ÖNORM EN 253 (2009) ist für werkmäßig vorgedämmte KVM-Systeme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze anzuwenden. Für die Verbundformstücke und Verbundmantelabsperrarmaturen (beide auch werkmäßig gedämmt) ist die ÖNORM EN 488 (2009) heranzuziehen. Rohrverbindungen werden nach ÖNORM EN 489 (2009) eingebaut.

Weiters sind bei der Errichtung von Hausanschlußleitungen die Fernwärmerichtlinien (ONR FW) des Fachverbandes der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen Österreichs zu beachten. Bei der Verlegung und der Statik von KVM-Rohren für Fernwärmenetze ist die ONR FW401 von Bedeutung. Die ONR FW7 und die ONR FW11 beinhalten Qualitätssicherungsmaßnahmen für vorisolierte Fernwärmerohre.

### 3 Anforderungen

#### 3.1 Anforderungen von SVM an die Leitungszone (nach ONR 23131, 2005, und ONR FW 110A, 1999)

In der vorliegenden Arbeit wird eine Reihe von Anforderungen für Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial konzipiert. Dabei wird zwischen allgemeinen, mechanischen, chemischen und thermischen Anforderungen wie folgt unterschieden:

- **Allgemeine Anforderungen**
  - Eine ausreichende Fließfähigkeit in die Rohrkünette soll gegeben sein, damit eine leichte baustellenspezifische Verarbeitung realisierbar ist.
  - Die kurzfristige Verfestigung des eingebauten Materials in der Leitungszone darf aufgrund der Weiterverfüllung des Rohrgrabens maximal drei Tage ausmachen.
  - Es soll eine bleibende Abbaubarkeit des Verfüllmaterials mit Schaufel und Krampen während der gesamten Nutzungsdauer der KVM-Rohre erhalten bleiben. Damit dies gegeben ist, darf die einaxiale Druckfestigkeit (wird in Punkt 3.1.3.1 erklärt) der eingebrachten SVM-Mischungen einen Wert von 60 N/cm<sup>2</sup> nicht übersteigen.
  - Der Absetzvorgang der frischen SVM sollte 24 Stunden nach der Verfüllung im Wesentlichen abgeschlossen sein.
  - Eine ausreichende Tragfähigkeit (eine einaxiale Druckfestigkeit von mindestens 5 N/cm<sup>2</sup> nach 28 Tagen) der Leitungszone für die Verfüllung und die Verdichtung der Wiederverfüllzone des Rohrgrabens ist zu gewährleisten.
  - Die Einbettung der KVM-Rohre muss ausreichend und gleichmäßig sein.
  - Es soll eine Verträglichkeit zum anstehenden Boden gegeben sein (Filter- und Trennstabilität)..
  - Die Außenoberfläche des PE-Mantelrohres darf durch die Verfüllung mit SVM nicht beeinträchtigt werden. Vereinzelt Kratzer und Kerben am PE-Mantelrohr dürfen nicht tiefer als 0,5 mm sein.

- Laut Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Litscher, 2004) ist eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren anzustreben, also eine dauerhafte Langzeit-Verträglichkeit mit dem KVM und insbesondere mit den Muffensystemen.
- Ein SVM-Material für die Bettung von KVM muss vom Rohrhersteller genehmigt werden.
- Eine Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser muss gegeben sein.

- **Thermische Anforderungen**

- Die Wärmeverluste des KVM-Rohres in den anstehenden Böden sind zu reduzieren. Weiters muss die Wärmeleitfähigkeit des SVM mindestens einem normalen Sand oder Kies (nichtbindige Rohrgrabenverfüllmaterialien) entsprechen.
- Das Bettungsmaterial muss in einem Temperaturbereich von -10 °C bis +50 °C beständig sein.

- **Mechanische Anforderungen**

- Der Wandreibungswinkel zwischen dem PE-Mantelrohr und dem SVM soll zwischen 8,5° und 33° liegen. Die Ermittlung des Wandreibungswinkels erfolgt mittels Rahmenscherversuchen in Anlehnung an die ÖNORM B 4416 (1978).
- Die Scherfestigkeit zwischen PE-Mantelrohr und SVM darf nach ONR FW 110A einen Wert von 4 N/cm<sup>2</sup> nicht überschreiten. Die Scherfestigkeit ist von der Normalspannung abhängig und wird aus bodenmechanischer Sicht mit dem Bruchkriterium nach Mohr/Colomb beurteilt. Die Kennwerte dieses Kriteriums sind die Kohäsion (Haftfestigkeit) und der Reibungswinkel (das ist der Winkel, unter dem der Thermosand belastet werden kann, ohne zu versagen oder abzurutschen).

- **Chemische Anforderungen**

- Das SVM darf das PE-Mantelrohr sowie die PE-Muffen einschließlich der Abdichtungsbänder während der gesamten Nutzungsdauer chemisch nicht angreifen.

- Der umgebende Boden darf auch unter der Einwirkung von Oberflächen- und Grundwasser nicht zur Destabilisierung bzw. zur Änderung der geforderten Eigenschaften von SVM führen.

Von diesen Anforderungen sind die thermischen (Axnix, 2008), mechanischen (Litscher, 2004), und chemischen Eigenschaften (Ofi, 2002) bereits untersucht und erfüllt worden. Zurzeit wird bei der Bettung von Fernwärmerohren der Thermosand für Versuchszwecke im erdfeuchten Zustand verwendet. Doch als stabilisiertes Verfüllmaterial wurde der Thermosand bislang nicht eingesetzt. Um das Material dahingehend einer Prüfung zu unterziehen, haben sich folgende zusätzliche Anforderungen herauskristallisiert.

Die Mischung muss beim Einbringen in die Künette eine bestimmte Konsistenz aufweisen, welche mit der Konsistenzklasseneinteilung für Beton nach Ö-NORM 4710-1 (2007) zuordbar ist. Auch der Absetzvorgang einer frischen SVM-Mischung nach Ö-NORM B 3303 (2002) ist ein weiteres Kriterium, weil sich das Bettungsmaterial nur wenig und gleichmäßig absetzen darf. Nachweisbar muss auch, wie in den allgemeinen Anforderungen beschrieben, die permanente Wiederaufgrabbarkeit nach Ö-NORM B 4415 (2010) sein.

Weiterhin ist auch der wirtschaftliche Nutzen von Bedeutung, weil durch den Einsatz einer Thermosandmischung als stabilisiertes Verfüllmaterial der Gesamtwärmeverlust um die Rohrzone vermindert wird. Dies kann durch die Messung der Wärmeleitfähigkeit nachgewiesen werden. Auf die genannten Anforderungen, die Konsistenz, das Absetzverhalten, die Wiederaufgrabbarkeit, die Tragfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit, wird nachfolgend eingegangen.

### **3.1.1 Konsistenzklassen von Betonen (nach ÖNORM B 4710-1, 2007)**

Für SVM wird in der vorliegenden Arbeit die Konsistenzklasseneinteilung für Betone herangezogen.

Die ÖNORM B4710-1 unterscheidet Verdichtungs- und Ausbreitmaß. Steife Konsistenzen werden mit dem Verdichtungsmaß und weiche Konsistenzen, wie die in dieser Arbeit untersuchten Thermosandmischungen, mit dem Ausbreitmaß klassifiziert.

Das stabilisierte Verfüllmaterial muss beim Einbringen in die Leitungszone fließfähig sein. Dies bedeutet, dass die Thermosandmischungen eine Konsistenzklasse von F59 (Tab. 3.1) aufweisen müssen, um eine baustellentechnisch leichte Verarbeitbarkeit zu gewährleisten.

Klasse	Klassenbezeichnung in Österreich	Ausbreitmaß (Durchmesser)	Beschreibung
		mm	
F1 <sup>a</sup>	–	≤ 340	–
F2	F38	350 bis 410	plastisch
F3	F45	420 bis 480	weich
F4	F52	490 bis 550	sehr weich
F5	F59	560 bis 620	fließfähig
F6 <sup>a</sup>	–	≥ 630	–
	F66	630 bis 690	sehr fließfähig
	F73	700 bis 760	extrem fließfähig

<sup>a</sup> in Österreich nicht relevant

Tabelle 3.1: Ausbreitmaßklassen (ÖNORM B 4710-1, 2007)

### 3.1.1.1 Ausbreitmaß (nach ÖNORM EN 12350-5, 2009)

Die Konsistenz vom frisch abgemischtem SVM wird durch die Messung des Ausbreitmaßes auf einem Ausbreittisch (siehe Kapitel 4.3) ermittelt. Wie in Tab. 3.1 ersichtlich, soll der Durchmesser der ausgebreiteten Masse nicht kleiner als 56 cm und größer als 62 cm sein, damit die Anforderung an die Konsistenzklasse F59 erfüllt wird.

Der Ausbreittisch hat die Abmessungen von 70 x 70 cm. Diese Prüfung ist nur für Materialmischungen geeignet, bei denen sich die Konsistenzklassen in einem Bereich von F38 und F59 befinden. Eine noch fließfähigere Mischung würde örtlich begrenzt über die Platte hinaus laufen.

### 3.1.2 Absetzverhalten (nach ONR 23131, 2005)

Der Absetzvorgang der frischen SVM-Mischung sollte 24 h nach dem Einbringen im Wesentlichen abgeschlossen sein. In diesem Zeitraum darf das Absetzmaß maximal 2 % der Gesamthöhe der Leitungszone aufweisen. Innerhalb der folgenden 28 Tage darf der Zuwachs des Absetzmaßes höchstens 10 % des Zuwachses nach dem ersten Tag betragen. Zum Beispiel: Beträgt das Absetzmaß bezogen auf die Einbringhöhe nach 24 Stunden 1,0 %, so darf es nach 28 Tagen bei maximal 1,10 % liegen.

### 3.1.3 Wiederaufgrabbarkeit

Unter Wiederaufgrabbarkeit versteht man das händische Aufgraben des SVM mit einer Schaufel oder einem Krampen. Sie muss über die gesamte Verwendungsdauer des stabilisierten Bettungsmaterials gegeben sein. Der Nachweis, ob das eingebrachte Material noch händisch aufgrabbar ist, erfolgt über die einaxiale Druckfestigkeit einer SVM-Probe. Unter einaxialer Druckfestigkeit versteht man die maximale Vertikalspannung, die ein Körper bei unbehinderter Seitendehnung aushalten kann. Sie darf nach 28 Tagen einen Wert von 60 N/cm<sup>2</sup> nicht übersteigen und wird an den im Labor hergestellten Proben mittels einer Prüfpresse gemessen. Laut ONR 23131 (2005) kann die Wiederaufgrabbarkeit durch die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit einer Rückstellprobe nachgewiesen werden.

#### 3.1.3.1 Einaxiale Druckfestigkeit (nach ÖNORM B 4415, 2010)

Die einaxiale Druckfestigkeit ist der Quotient aus der Bruchlast und der Querschnittsfläche eines Probekörpers. Angegeben ist die Druckfestigkeit als Kraft pro Fläche. Ist die aufgebrachte Druckspannung größer als die Druckfestigkeit des Körpers, so wird der Körper zerstört. Die Druckfestigkeit wird nach der Art der Durchführung von Druckversuchen unterschieden. Es gibt die einaxiale, zweiachsigle und dreiachsigle Druckfestigkeit. Bei der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit kann der Prüfkörper in seitliche Richtungen ausweichen (ungehinderte Seitendehnung).

Nach ÖNORM B 4415 (2010) ist die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$ , entweder die maximale Vertikalspannung, die eine Probe bis zur Zerstörung aufnehmen kann, oder die Vertikalspannung bei einer Vertikalstauchung von 15 %. Der Wert, welcher bei der Prüfung als erster eintritt, ist maßgebend. Das heißt, wenn bei einer Stauchung von  $\varepsilon = 15\%$  kein Extremwert erreicht wird, also kein Bruch der Probe auftritt, so wird die einaxiale Druckspannung bei  $\varepsilon = 15\%$  als einaxiale Druckfestigkeit festgelegt. Die Stauchungsgeschwindigkeit muss dabei konstant gehalten werden.

$$q_u = \max \sigma \quad \text{oder} \quad q_u = \sigma_{0,15} \quad (1)$$

$q_u$  = Höchstwert der einaxialen Druckspannung

$\sigma_{0,15}$  = einaxiale Druckfestigkeit bei einer Stauchung  $\varepsilon = 15\%$

Mathematisch betrachtet ist die einaxiale Druckspannung  $\sigma$  der Quotient der jeweiligen axialen Prüfkraft  $F$  und dem zugeordneten maßgeblichen Querschnitt  $A$  (Gleichung 2). Der maßgebliche Querschnitt  $A$  (Gleichung 3) errechnet sich aus dem Anfangsvolumen  $V_a$  des Probekörpers, dividiert durch die dazugehörige Höhe  $h$  der Probe bei der jeweiligen Prüfkraft  $F$ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$A = \frac{V_2}{h} \quad (3)$$

$$V_2 = h \times \frac{d^2 \times \pi}{4} \quad (4)$$

$F$  = axiale Prüfkraft [N]

$A$  = zugeordneter Querschnitt [cm<sup>2</sup>]

$\sigma$  = jeweilige einaxiale Druckspannung bei der Prüfkraft  $F$  [N/cm<sup>2</sup>]

$V_2$  = Anfangsvolumen [cm<sup>3</sup>]

$h$  = Höhe des Probekörpers [cm]

$d$  = Anfangsdurchmesser des Probekörpers [cm]

In Gleichung 5 ist  $A_2$  der Querschnitt bei Versuchsbeginn und  $\varepsilon$  die Stauchung.

$$A = \frac{A_2}{1 - \varepsilon} \quad (5)$$

$A_2$  = der Querschnitt bei Versuchsbeginn [cm<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  = die Stauchung

Die Stauchung  $\varepsilon$  ist der Quotient aus der Änderung der Höhe des Probekörpers  $\Delta h$  und der Anfangshöhe des Probekörpers  $h_2$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_2} \quad (6)$$

$\Delta h$  = Änderung der Probenhöhe

Die Wertepaare  $\sigma$  und  $\varepsilon$  werden als Druck-Stauchungsdiagramm dargestellt.

### 3.1.3.2 Spezifische Anforderungen für den einaxialen Druckfestigkeitsversuch (nach ÖNORM B 4415, 2010)

Die Querschnittsfläche des Probekörpers soll entweder kreisförmig oder quadratisch sein und muss mindestens 10 cm<sup>2</sup> betragen. Die hergestellten Proben für den Einaxialversuch haben einen Durchmesser von 10 cm und eine daraus resultierende Querschnittsfläche von 78,54 cm<sup>2</sup>. Bei zylindrischen Probekörpern soll das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser zwischen 1,8 und 2,5 liegen. Da eine Herstellung so hoher Proben bei SVM-Mischungen generell nicht möglich ist, wurden Proben mit einer Höhe von 14 cm angefertigt. Dies ist aber nur das 1,4-fache des Durchmessers. Daher wurde in der vorliegenden Untersuchung die Druckfestigkeit der Proben korrigiert (siehe Abbildung 3.1). Zu Vergleichszwecken entsprechender Festigkeiten wurde aus der Literatur (Meseck, 1987) die Höhenkorrekturtabelle für Dichtwandmassen herangezogen.

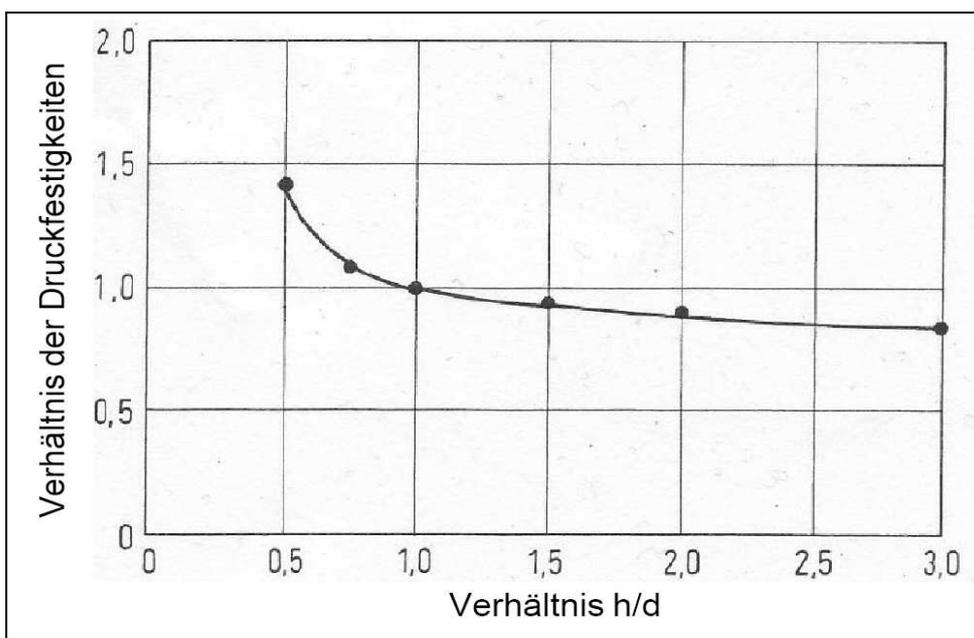


Abbildung 3.1: Einfluss der Probekörperschlankheit auf die einaxiale Druckfestigkeit von Dichtwandmassen (Meseck, 1987)

Aus der Abbildung 3.1 ist zu entnehmen, dass bei einem Verhältnis von Höhe zu Breite von 1,4 die einaxialen Druckfestigkeiten nur um 10 % abzumindern sind. Eine weitere Anforderung nach ÖNORM B 4415 (2010) für die Gültigkeit des einaxialen Druckversuches besteht darin, dass das Größtkorn ein Sechstel des Durchmessers des zylindrischen Probekörpers nicht überschreiten darf. Dies wäre

bei einem Durchmesser von 10 cm ein Größtkorn von 16 mm. Der Thermosand hat ein Größtkorn von 4 mm und ein Überkorn von 8 mm, was bedeutet, dass diese Anforderung erfüllt ist.

### **3.2 Allgemeine Anforderungen (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)**

Für die Herstellung von SVM sind nach nur natürliche Gesteinsmischungen oder Recycling-Baustoffe eines gütegeschützten Betriebes zugelassen. Verboten sind Recycling Baustoffe, die einen Asphaltanteil von mehr als 20% aufweisen.

#### **3.2.1 Überwachung von SVM**

Die stabilisierten Verfüllmaterialien müssen einer Eigenüberwachung und einer regelmäßigen Fremdüberwachung unterliegen.

##### **3.2.1.1 Eigenüberwachung**

Die Kontrolle der Konsistenz und des Absetzmaßes hat alle 1000 m<sup>3</sup>/pro Produkt bzw. mindestens einmal pro Halbjahr zu erfolgen. Auch die Kontrolle der Wiederaufgrabbarkeit muss alle 1000 m<sup>3</sup>/pro Produkt bzw. mindestens einmal pro Halbjahr durchgeführt werden.

##### **3.2.1.2 Fremdüberwachung**

Die einmal jährlich durchzuführende Fremdüberwachung umfasst die Überprüfung der Unterlagen, die von der firmenintern durchgeführten Eigenüberwachung erstellt wurden. Diese Prüfung ist von einer akkreditierten Prüfstelle vorzunehmen und beinhaltet die stichprobenartige Kontrolle von Lieferscheinen der Roh- bzw. Ausgangsstoffe sowie der gelieferten SVM.

#### **3.2.2 Vorgaben für den Einbau von SVM**

- Das SVM soll beim Einbringen vom Fahrmischer in die Künette eine Temperatur von mindestens 10°C aufweisen.
- Das angelieferte SVM ist im Mischwagen mindestens fünf Minuten durchzumischen, bevor es in den Rohrgraben verfüllt wird.

- Die Verfüllung der Künette mit SVM hat gegen den gewachsenen Boden zu erfolgen. Bei wenig standsicheren Künetten, wo eine Grabenverbauung notwendig ist, muss man den Grabenverbau während der Verfüllung stufenweise ziehen. Wichtig ist, dass die Verbauung noch im fließfähigen Zustand des SVM gezogen wird. Der genaue Zeitpunkt ist von den Untergrundverhältnissen abhängig und von der Bauleitung der ausführenden Baufirma festzulegen.
- Bei jeder Anlieferung von SVM auf die Baustelle ist dem Auftraggeber ein Lieferschein auszuhändigen. Dieser hat die Liefermenge, die Zeitangaben und alle in Punkt 2.2.4 beschriebenen Angaben zu enthalten.
- Das Einbringen des Auswaschwassers des Fahrmischers nach dem Einbau des SVM in die Künette ist verboten, da das Wasser die Konsistenz des Verfüllmaterials verändern würde.

## 4 Laboruntersuchungen

Bei den durchgeführten Laboruntersuchungen handelt es sich um Langzeitversuche, welche in einer Zeitspanne von vier Monaten untersucht, analysiert und ausgewertet wurden. Das Ziel dieser Laborversuchsreihen ist die Entwicklung einer labortechnisch, herstellungstechnisch, thermisch und wirtschaftlich optimierten Rezeptur. Insgesamt wurden 18 unterschiedliche Rezepturen entwickelt und danach die verschiedenen Mischungen hergestellt.

### 4.1 Verwendete Mischungsparameter

Die hergestellten Mischungen für die Laborversuche bestehen aus den Materialien Thermosand, Wasser, Fließmittel, Zement, sowie einem Stabilisator. Im Folgenden werden diese Komponenten kurz beschrieben: Der Thermosand mit einem Größtkorn von 4 mm wurde von der Firma Kekelit GmbH aus Fohnsdorf bezogen. Das Fließmittel und der Stabilisator stammen aus dem Sortiment der Betontechnik GmbH aus Langenwang. Insgesamt wurden mehrere Fließmittel getestet, wobei sich das Duriment LZF in Verbindung mit Thermosand gut bewährte. Dieses hat eine Dichte von  $1,10 \text{ g/cm}^3$  und ist eine auf Basis von Polycarboxylatether universell einsetzbare Substanz zur Wassereinsparung bei gleichzeitiger Konsistenzhaltung. Der eingesetzte Stabilisator mit dem Produktnamen Duriment Stabilisator Strong ist ein Betonzusatzmittel zur Verbesserung der Pumpbarkeit des SVM sowie zur Erhöhung der Stabilität des Gefüges. Er wirkt nicht konsistenz erhöhend und beugt der Entmischung vor. Weiters bewirkt das Beimengen des Stabilisators eine erhöhte Luftporenbildung in der Thermosandmischung, welche eine bessere Wärmedämmung des Materials zur Folge hat. Dies ist besonders von Bedeutung, da sich bei der Zugabe von Bindemitteln die Wärmedämmung der Thermosandmischung verschlechtert. Die Dichte des Stabilisators beträgt  $1,05 \text{ g/cm}^3$ . Als Bindemittel wurde ein Portlandzement mit der Bezeichnung CEM III/B 32,5 N eingesetzt.

Mischkomponenten	Dichte $\rho_d$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	Mischkomponenten	Dichte $\rho_d$ [ $\text{g/cm}^3$ ]
Thermosand GK 4 mm	1,40	Zement CEM III/B 32.5	3,00
Wasser	1,00	Stabilisator Strong	1,05
Fließmittel LZF	1,10		

Tabelle 4.1: Dichten  $\rho_d$  der Mischungskomponenten

## 4.2 Herstellung der Proben



Abbildung 4.1: Varimixer



Abbildung 4.2: Rührstab

Alle Proben wurden mit einem Mischer der Marke Varimixer (Abbildung 4.1) im Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau hergestellt. Zum Durchmischen der Proben wurde ein breiter Rührstab (Abbildung 4.2) verwendet, damit keine Reste an den Rändern der Mischtrommel kleben bleiben.

Das anfängliche Ziel war es, die verschiedenen Mischgänge einer Rezeptur gleichwertig anzufertigen und somit repräsentativ für die späteren Untersuchungen zu gestalten. Hier spielten die Rührzeit, die Geschwindigkeit des Rührwerkes, sowie die Reihenfolge des Zugebens der verschiedenen Komponenten eine bedeutende Rolle. Nach einigen Versuchen stellte sich heraus, dass die optimale Mischzeit sieben Minuten betragen muss. Zudem sollte die Geschwindigkeit bei 50 Umdrehungen pro Minute liegen, um die passende Konsistenz der Proben zu erreichen.

Zu Beginn des Mischvorganges wurde dem Thermosand Wasser beigemischt. Allerdings wurde 10 Prozent der Wassermenge zurückgehalten, da diese später zum Einmischen des zähflüssigen Stabilisators benötigt wurde. Nach drei Minuten Mischzeit erfolgte dann das Hinzufügen des Fließmittels. Anschließend wurden der Zement sowie der Stabilisator mit dem übrig gebliebenen Wasser eingerührt. Zum Schluss wurden alle zugegebenen Komponenten noch einmal drei Minuten lang durchgemischt. Die 18 verschiedenen Mischungsvarianten sind in der Tabelle 4.1 dargestellt.

**4.2.1 Herstelldaten der Mischungen**

Mischungsvarianten			Proben 1-18			
Bezeichnung	Datum	Thermosand	Wasser	Fließmittel	Zement	Stabilisator
<b>1</b>	23.07.2009	100 %	16 %	-	-	-
		9000 g	1440 g	-	-	-
<b>2</b>	23.07.2009	100 %	16 %	3 %	1 %	0,05 %
		9000 g	1440 g	270 g	9 g	4,5 g
<b>3</b>	23.07.2009	100%	30 %	1 %	2 %	0,05 %
		9000 g	3000 g	90 g	180 g	4,5 %
<b>4</b>	30.07.2009	100 %	40 %	1 %	2%	0,1 %
		9000 g	3600 g	90 g	180 g	9,0 %
<b>5</b>	30.07.2009	100 %	40 %	0,5 %	3 %	0,15 %
		9000g	9000 g	45 g	270 g	135 g
<b>6</b>	03.08.2009	100 %	30 %	-	-	-
		9000 g	2700 g	-	-	-
<b>7</b>	03.08.2009	100 %	35 %	-	-	-
		9000 g	3150 g	-	-	-
<b>8</b>	08.03.2009	100 %	25 %	5 %	-	-
		9000 g	2250 g	450 g	-	-
<b>9</b>	08.08.2009	100 %	25 %	7 %	-	-
		9000 g	2250 g	630 g	-	-
<b>10</b>	10.08.2009	100 %	27 %	3 %	1 %	0,10 %
		9000 g	2430 g	270 g	90 g	9 g
<b>11</b>	11.08.2009	100 %	28 %	3 %	1,5 %	0,10 %
		9000 g	2520 g	270 g	135 g	9 g
<b>12</b>	18.08.2009	100 %	27 %	5 %	0,5 %	0,05 %
		9000 g	2430 g	450 g	45 g	4,5 g
<b>13</b>	23.08.2009	100 %	30 %	4 %	1,5 %	0,075 %
		9000 g	2700 g	360 g	-	-
<b>14</b>	23.08.2009	100 %	30 %	3 %	-	-
		9000 g	2700 g	270 g	-	-
<b>15</b>	23.08.2009	100 %	26,5 %	4,5 %	-	-
		9000 g	2385 g	405 g	-	-
<b>16</b>	25.08.2009	100 %	30 %	1,5 %	-	-
		9000 g	2700 g	135 g	-	-
<b>17</b>	30.08.2009	100 %	28 %	2 %	-	-
		9000 g	2520 g	180 g	-	-
<b>18</b>	09.09.2009	100 %	28 %	4 %	5 %	0,5 %
		9000 g	2520 g	360 g	450 g	45 g

Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Thermosandmischungen

### 4.3 Bestimmung des Ausbreitmaßes (nach ÖNORM 12350-5, 2009)

#### 4.3.1 Versuchsgeräte

Der Ausbreittisch (Abb. 4.3) besteht aus einem beweglichen Teil (Aufschlagplatte) und einem unbeweglichen Teil (Metallplatte) mit den Maßen  $700 (\pm 2)$  mm x  $700 (\pm 2)$  mm. Diese beiden Platten sind durch zwei Scharniere miteinander verbunden. Dadurch kann die Aufschlagplatte auf eine festgelegte Höhe bis zu einem Stopper angehoben und wieder fallengelassen werden. Weiters muss diese aus einer Metalloberfläche bestehen, die eine Mindestdicke von 2 mm sowie ein Gewicht von  $16 (\pm 0,5)$  kg aufweist. Die Aufschlagplatte muss zudem so konstruiert sein, dass die Oberseite nicht verformt werden kann, um die Prüfung nicht zu verfälschen. Die Fallhöhe der Platte, gemessen an der Mittellinie der Vorderkante, ist mit einem Stopper auf  $40 (\pm 1)$  mm zu begrenzen. Zum Anheben ist ein Handgriff montiert. Der genormte Trichter (Abb. 4.4) mit einer Höhe von 20 cm und einem Innendurchmesser von 13 bis 20 cm muss aus Metall sein, und eine Mindestdicke von 1,5 mm aufweisen. Der verwendete Holzstößel (Abb. 4.5) hat die Querschnittsmaße  $40 \times 40$  mm und eine Höhe von 350 mm.

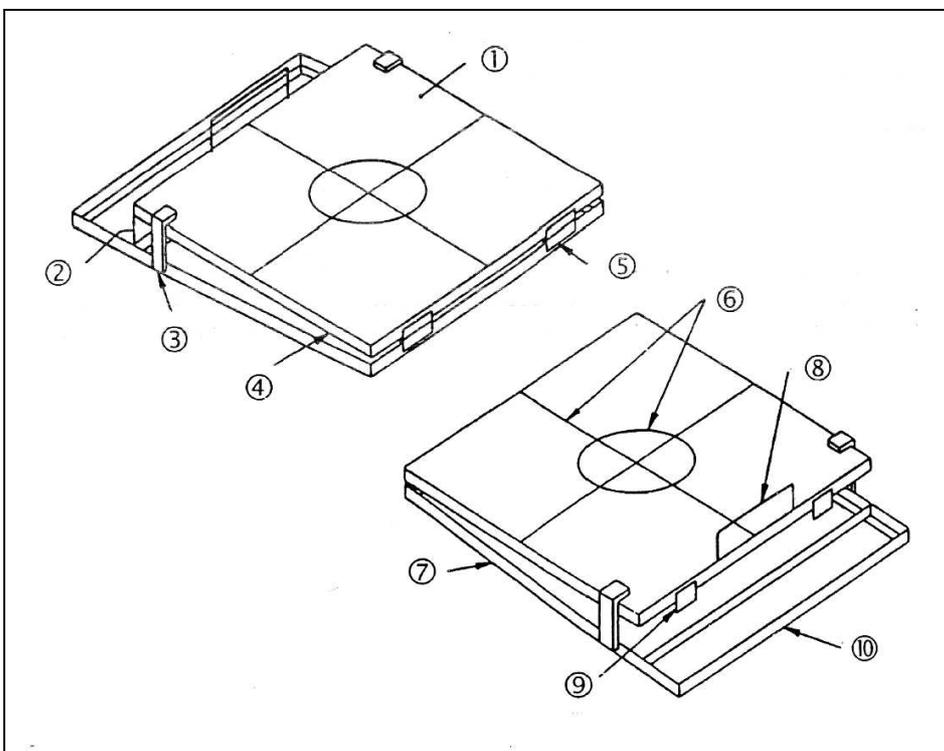


Abbildung 4.3: Ausbreittisch (nach ÖNORM EN12350-5, 2009)

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1) Metallplatte.....                      | 6) Markierung      |
| 2) Hubhöhe (begrenzt auf $40 (\pm 1)$ mm) | 7) Rahmen          |
| 3) Oberer Stopper.....                    | 8) Handgriff       |
| 4) Aufschlagplatte.....                   | 9) Unterer Stopper |
| 5) Scharniere (außen).....                | 10) Fußraste       |

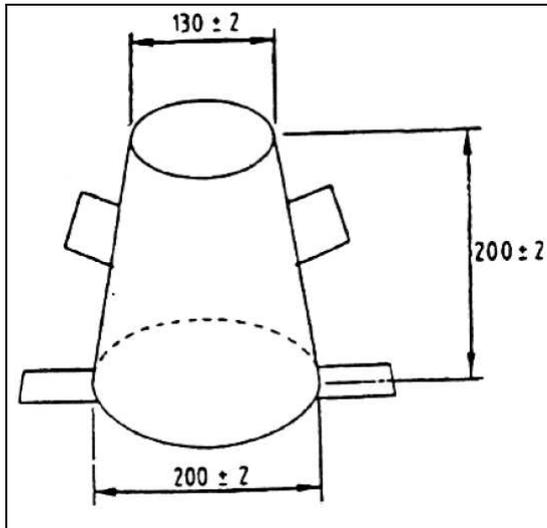


Abbildung 4.4: Trichter

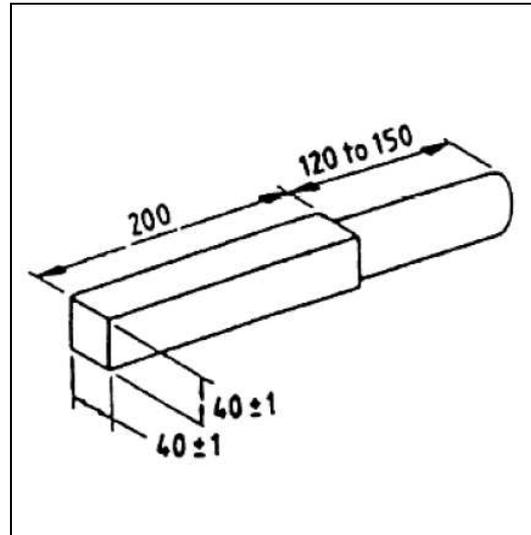


Abbildung 4.5: Holzstößel

### 4.3.2 Durchführung

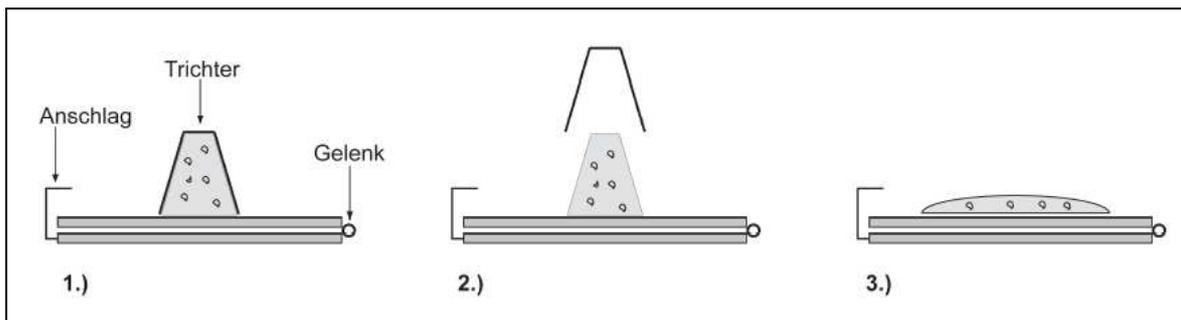


Abbildung 4.6: Ablauf des Ausbreitmaßversuches (nach ÖNORM EN 12350-5, 2009)

- 1.) Der Trichter wird mittig auf den Ausbreittisch gestellt und bis zur Hälfte mit der Thermosandmischung gefüllt. Um das Fallen der Thermosandmischung aus dem Fahrmischer in die Künette zu simulieren, wird anschließend die eingebrachte Lage durch viermaliges Auf- und Abbewegen eines Holzstößels händisch verdichtet. Um das Aufschwimmen des Trichters zu verhin-

dem, wird dieser an seinen beiden Standfüßen beschwert. Dann wird der Trichter vollgefüllt, mit dem Holzstößel verdichtet und bündig abgezogen (Abb. 4.6, 1.Bild und Abb. 4.7).

- 2.) Der Trichter wird langsam hochgezogen (Abb. 4.6, 2.Bild), damit sich die Thermosandmischung gleichmäßig ausbreiten kann.
- 3.) Der Ausbreittisch wird am Handgriff 15-mal bis an den Anschlag angehoben und wieder fallen gelassen. Ein Einzelvorgang darf dabei nicht weniger als zwei Sekunden und nicht mehr als fünf Sekunden dauern. Danach werden die beiden orthogonalen Durchmesser der ausgebreiteten Masse (Abb. 4.8) mit einer Genauigkeit von  $\pm 5$  mm gemessen. Das Ausbreitmaß errechnet sich dann aus der Addition der beiden Durchmesser geteilt durch zwei, und ist auf 10 mm genau anzugeben. Alle Proben werden in einem konstanten Zeitintervall geprüft, damit die Ergebnisse vergleichbar sind.



Abbildung 4.7: Der gefüllte Trichter



Abbildung 4.8: Die ausgebreitete Masse

Zur Bestimmung des Ausbreitmaßes erfolgten bei jeder der 18 Probenreihen mindestens zwei Versuche. Bei den Probenreihen 9, 12 und 17, welche bei weiteren Untersuchungen gute Resultate erzielten, wurden mindestens drei Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in den Tabellen 4.3 bis 4.5 angeführt.

4.3.3 Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche

Ausbreitmaßversuch			Probennummer 1-9	
Bezeichnung	Datum	Durchmesser	mittlerer Durch.	Klasse
<b>1/1</b>	23.07.2009	d1<340 mm d2<340 mm	d= <340 mm	<b>n.k.</b>
<b>1/2</b>	23.07.2009	d1<340 mm d2<340 mm	d= <340 mm	<b>n.k.</b>
<b>2/1</b>	23.07.2009	d1<340 mm d2<340 mm	d= <340 mm	<b>n.k.</b>
<b>2/2</b>	25.07.2009	d1<340 mm d2<340 mm	d= <340 mm	<b>n.k.</b>
<b>3/1</b>	30.07.2009	d1=495 mm d2=510 mm	d=500 mm	<b>F52</b>
<b>3/3</b>	30.07.2009	d1=490 mm d2=490 mm	d=490 mm	<b>F52</b>
<b>4/1</b>	30.07.2009	d1=650 mm d2=670 mm	d=660 mm	<b>F66</b>
<b>4/2</b>	02.08.2009	d1=675 mm d2=650 mm	d=670 mm	<b>F66</b>
<b>5/2</b>	30.07.2009	d1=645mm d2=660 mm	d=650 mm	<b>F66</b>
<b>5/4</b>	30.07.2009	d1=650 mm d2=645 mm	d=650 mm	<b>F66</b>
<b>6/1</b>	03.08.2009	d1=470 mm d2=490 mm	d=480 mm	<b>F45</b>
<b>6/2</b>	03.08.2009	d1=495 mm d2=485 mm	d=490 mm	<b>F52</b>
<b>7/1</b>	03.08.2009	d1=555 mm d2=570 mm	d=560 mm	<b>F59</b>
<b>7/2</b>	03.08.2009	d1=580 mm d2=560 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>8/1</b>	08.08.2009	d1=510 mm d2=500 mm	d=510 mm	<b>F52</b>
<b>8/2</b>	08.08.2009	d1=500 mm d2=505 mm	d=500 mm	<b>F52</b>
<b>9/1</b>	08.08.2009	d1=555 mm d2=545 mm	d=550 mm	<b>F52</b>
<b>9/2</b>	08.08.2009	d1=560 mm d2=550 mm	d=560 mm	<b>F59</b>

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche

Ausbreitmaßversuch			Probennummer 9-15	
Bezeichnung	Datum	Durchmesser	mittlerer Durch.	Klasse
<b>9/3</b>	09.08.2009	d1=565 mm d2=560 mm	d= 560 mm	<b>F59</b>
<b>9/4</b>	10.08.2009	d1=580 mm d2=570 mm	d= 580 mm	<b>F59</b>
<b>9/5</b>	30.08.2009	d1=585 mm d2=565 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>9/6</b>	09.09.2009	d1=570 mm d2=580 mm	d= 580 mm	<b>F59</b>
<b>10/1</b>	10.08.2009	d1=485 mm d2=480 mm	d=490 mm	<b>F52</b>
<b>10/2</b>	10.08.2009	d1=490 mm d2=470 mm	d=480 mm	<b>F52</b>
<b>11/1</b>	11.08.2009	d1=555 mm d2=560 mm	d=560 mm	<b>F59</b>
<b>11/2</b>	13.08.2009	d1=535 mm d2=550 mm	d=540 mm	<b>F52</b>
<b>11/3</b>	14.08.2009	d1=550 mm d2=560 mm	d=560 mm	<b>F59</b>
<b>12/1</b>	18.08.2009	d1=550 mm d2=565 mm	d=560 mm	<b>F59</b>
<b>12/2</b>	18.08.2009	d1=565 mm d2=565 mm	d=570mm	<b>F59</b>
<b>12/3</b>	19.08.2009	d1=550 mm d2=560 mm	d=560 mm	<b>F59</b>
<b>13/1</b>	23.08.2009	d1=555 mm d2=570 mm	d=640 mm	<b>F66</b>
<b>13/2</b>	23.08.2009	d1=600 mm d2=610 mm	d=630 mm	<b>F66</b>
<b>14/1</b>	23.08.2009	d1=645 mm d2=650 mm	d=650 mm	<b>F66</b>
<b>14/2</b>	24.08.2009	d1=620 mm d2=635 mm	d= 640 mm	<b>F66</b>
<b>15/1</b>	23.08.2009	d1=545 mm d2=530 mm	d=540 mm	<b>F52</b>
<b>15/2</b>	24.08.2009	d1=530 mm d2=525 mm	d=530 mm	<b>F52</b>

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche, Fortsetzung von Tab. 4.3

Ausbreitmaßversuch			Probennummer 16-18	
Bezeichnung	Datum	Durchmesser	mittlerer Durch.	Klasse
<b>16/1</b>	25.08.2009	d <sub>1</sub> =605 mm d <sub>2</sub> =600 mm	d=600 mm	<b>F59</b>
<b>16/2</b>	26.08.2009	d <sub>1</sub> =605 mm d <sub>2</sub> =585 mm	d=590 mm	<b>F59</b>
<b>17/1</b>	30.08.2009	d <sub>1</sub> =565 mm d <sub>2</sub> =570 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>17/2</b>	30.08.2009	d <sub>1</sub> =565 mm d <sub>2</sub> =575 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>17/3</b>	09.09.2009	d <sub>1</sub> =555 mm d <sub>2</sub> =560 mm	d= 560 mm	<b>F59</b>
<b>17/4</b>	18.11.2009	d <sub>1</sub> =565 mm d <sub>2</sub> =570 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>18/1</b>	09.09.2009	d <sub>1</sub> =605 mm d <sub>2</sub> =580 mm	d=590 mm	<b>F59</b>
<b>18/2</b>	09.09.2009	d <sub>1</sub> =555 mm d <sub>2</sub> =575 mm	d=560 mm	<b>F59</b>

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche, Fortsetzung von Tab. 4.4

Die Mischungen 1 und 2 können nicht klassifiziert (n.k.) werden, da ihre Ausbreitmaße unter 340 mm liegen. In Österreich beginnt die Einteilung der Konsistenzklassen nach ÖNORM B4710-1 (siehe Tab. 3.1) bei einem Ausbreitmaß größer gleich 340 mm.

Die Probenreihen (Mischungen) mit den Nummern 14 und 15 weisen eine Konsistenzklasse von F66 (sehr fließfähig) auf. Alle Mischungen der Probenreihe 7, 12, 16, 17 und 18 erfüllten bei jedem Versuch die Anforderungen an die Konsistenz. Diese sind der Klasse F59 zuzuordnen und gelten damit als fließfähig. Bei der Probenreihe 9 haben 4 von 5 durchgeführten Ausbreitmaßversuchen die erforderliche Fließfähigkeit erreicht. Von der Versuchsreihe 11 erfüllten 2 von 3 Mischungen das geforderte Ausbreitmaß. Die Ergebnisse jener Mischungen, welche die Anforderung hinsichtlich der Konsistenz bestanden haben, sind in den Tabellen 4.2 bis 4.4 mit grüner Farbe gekennzeichnet. Alle anderen Mischungen haben eine Konsistenzklasse von F45 (weich) oder F52 (sehr weich). Hier liegen die ermittelten Ausbreitmaße zwischen 420 mm und 550 mm.

## 4.4 Bestimmung des Absetzmaßes (nach ONR 23131, 2005)

### 4.4.1 Versuchsgeräte

Um den Absetzvorgang der Thermosandmischungen zu untersuchen, wurden Glaszylinder mit einem Fassungsvermögen von einem Liter verwendet. Diese eingesetzten Gläser werden als Messurzylinder (Abb. 4.9) bezeichnet. Diese haben einen Durchmesser von 62,5 mm und eine Höhe von 340 mm.



Abbildung 4.9: 1-Liter-Mensurzylinder mit den Innenabmessungen 340 x 62,5 mm

### 4.4.2 Durchführung

Der Messurzylinder wurde bis zur Oberkante mit der frisch angefertigten Thermosandmischung gefüllt. Danach wurde das Material mit einem dünnen Metallstab, der dreimal auf und ab bewegt wird, vorsichtig händisch verdichtet. Anschließend erfolgte das restliche Auffüllen des Messurzylinders bis zur oberen Kante, sowie das Abziehen mit einer Glättkelle (Abb. 4.10). Zum Schluss wurde die Probe mit einem Gummideckel verschlossen (Abb. 4.11). Der Verschluss muss dicht sein, damit kein Wasser entweichen kann und die Ergebnisse nicht verfälscht werden.

Während der Prüfung war eine Temperatur von  $20 (\pm 2)^\circ\text{C}$  gegeben. Der gefüllte Behälter war auf einer ebenen Platte und frei von Erschütterungen aufgestellt.

24 Stunden nach dem Einbringen der Mischung wurde das erste Absetzmaß ermittelt. Das abge sonderte Wasser wurde volumetrisch bestimmt. Eine weitere Untersuchung des Absetzmaßes erfolgte nach 28 Tagen.

Bei jeder Mischung wurden mindestens zwei Versuche (Tabellen 4.6 bis 4.8) durchgeführt. Bei den Mischungen 9, 12 und 17 erfolgten mindestens 3 Absetzversuche.



Abbildung 4.10: Mensurzylinder gefüllt mit Thermosandmischung



Abbildung 4.11: Mensurzylinder gefüllt mit Thermosandmischung, verschlossen

**4.4.3 Ergebnisse der Absetzmaßversuche**

Absetzmaßversuch			Probennummer 1-9	
Bezeichnung	Herstelldatum	Zeitraum	Absetzung in mm	Absetzung in %
<b>1/1</b>	23.07.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>0,5</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,6</b>
<b>1/2</b>	23.07.2009	nach 24 Stunden	1,5	<b>0,5</b>
		nach 28 Tagen	1,5	<b>0,7</b>
<b>2/1</b>	23.07.2009	nach 24 Stunden	1,0	<b>0,8</b>
		nach 28 Tagen	1,0	<b>0,9</b>
<b>2/1</b>	24.07.2009	nach 24 Stunden	1,0	<b>0,8</b>
		nach 28 Tagen	1,0	<b>0,9</b>
<b>3/1</b>	23.07.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>1,5</b>
<b>3/2</b>	25.07.2009	nach 24 Stunden	2,5	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	3,0	<b>1,5</b>
<b>4/1</b>	30.07.2009	nach 24 Stunden	3,0	<b>1,1,</b>
		nach 28 Tagen	3,5	<b>1,8</b>
<b>4/2</b>	30.07.2009	nach 24 Stunden	3,0	<b>0,9</b>
		nach 28 Tagen	4,0	<b>1,3</b>
<b>5/1</b>	30.07.2009	nach 24 Stunden	9,0	<b>2,7</b>
		nach 28 Tagen	12,0	<b>3,5</b>
<b>5/2</b>	30.07.2009	nach 24 Stunden	9,5	<b>2,8</b>
		nach 28 Tagen	12,0	<b>3,5</b>
<b>6/1</b>	03.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	8,0	<b>2,4</b>
<b>6/2</b>	07.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	8,0	<b>2,4</b>
<b>7/1</b>	03.08.2009	nach 24 Stunden	9,0	<b>2,7</b>
		nach 28 Tagen	11,0	<b>3,2</b>
<b>7/2</b>	07.08.2009	nach 24 Stunden	9,0	<b>2,7</b>
		nach 28 Tagen	11,5	<b>3,4</b>
<b>8/1</b>	08.008.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>0,6</b>
		nach 28 Tagen	3,0	<b>0,9</b>
<b>8/2</b>	08.08.2009	nach 24 Stunden	1,5	<b>0,5</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,7</b>
<b>9/1</b>	08.08.2009	nach 24 Stunden	4,5	<b>1,3</b>
		nach 28 Tagen	5,0	<b>1,5</b>

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Absetzmaßversuche

Absetzmaßversuch			Probennummer 9-16	
Bezeichnung	Herstelldatum	Zeitraum	Absetzung in mm	Absetzung in %
<b>9/3</b>	10.08.2009	nach 24 Stunden	3,5	<b>1,3</b>
		nach 28 Tagen	5,0	<b>1,5</b>
<b>9/5</b>	30.08.2009	nach 24 Stunden	3,5	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,7</b>
<b>10/1</b>	11.08.2009	nach 24 Stunden	3,0	<b>0,9</b>
		nach 28 Tagen	4,0	<b>1,2</b>
<b>10/2</b>	12.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,3</b>
<b>11/1</b>	13.08.2009	nach 24 Stunden	1,00	<b>0,2</b>
		nach 28 Tagen	1,0	<b>0,4</b>
<b>11/2</b>	22.08.2009	nach 24 Stunden	1,0	<b>0,3</b>
		nach 28 Tagen	1,0	<b>0,5</b>
<b>12/1</b>	18.08.2009	nach 24 Stunden	2,5	<b>0,7</b>
		nach 28 Tagen	3,0	<b>0,9</b>
<b>12/2</b>	18.08.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>0,6</b>
		nach 28 Tagen	2,0	<b>0,6</b>
<b>12/3</b>	20.08.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>0,6</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,7</b>
<b>13/1</b>	23.08.2009	nach 24 Stunden	1,5	<b>0,4</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,7</b>
<b>13/2</b>	23.08.2009	nach 24 Stunden	2,5	<b>0,7</b>
		nach 28 Tagen	3,0	<b>0,9</b>
<b>14/1</b>	23.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	7,0	<b>2,1</b>
<b>14/2</b>	24.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	6,5	<b>1,9</b>
<b>15/1</b>	25.08.2009	nach 24 Stunden	1,5	<b>0,4</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,7</b>
<b>15/2</b>	25.08.2009	nach 24 Stunden	2,0	<b>0,6</b>
		nach 28 Tagen	2,5	<b>0,7</b>
<b>16/1</b>	25.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	6,0	<b>1,7</b>
<b>16/2</b>	26.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	6,0	<b>1,7</b>

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Absetzmaßversuche, Fortsetzung Tab. 4.6

Absetzmaßversuch			Probennummer 17-18	
Bezeichnung	Herstelldatum	Zeitraum	Absetzung in mm	Absetzung in %
<b>17/1</b>	30.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,3</b>
<b>17/2</b>	30.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	5,5	<b>1,6</b>
<b>17/3</b>	07.09.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,3</b>
<b>17/4</b>	09.09.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	5,5	<b>1,6</b>
<b>18/1</b>	09.09.2009	nach 24 Stunden	7,0	<b>2,0</b>
		nach 28 Tagen	8,0	<b>2,2</b>
<b>18/2</b>	11.09.2009	nach 24 Stunden	6,0	<b>1,8</b>
		nach 28 Tagen	7,0	<b>2,0</b>

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Absetzmaßversuche, Fortsetzung der Tab. 4.7

Die Mischungen 2, 9, 12, 17 und 18 hatten nach 24 Stunden ein Absetzmaß von maximal 2 %. Auch nach 28 Tagen betrug das Absetzmaß dieser Mischungen weniger als 10 % des Absetzvorganges nach 24 Stunden. Dies bedeutet, dass die Anforderungen (siehe 3.1.2) erfüllt wurden. Die Mischungen sind in den Tabellen 4.5 bis 4.7 grün gekennzeichnet. Die Probenreihen 1, 10 und 15 haben die Anforderungen nach 24 Stunden erfüllt, da die Absetzung unter 2 % lag. Nach 28 Tagen wurde die 10 %- Grenze der Absetzung überschritten und somit ein negatives Ergebnis erzielt.

Die Probenreihen 5 und 7 erreichten bereits nach 24 Stunden ein Absetzmaß > 2 %. Bei den restlichen Mischungen lag das geforderte Absatzmaß nach 28 Tagen über der geforderten Grenze.

Die Probenreihen 9, 12, 17 und 18 haben somit die Anforderungen des Absetzmaßes und jene des Ausbreitmaßes (siehe Kapitel 4.3.3) erfüllt.

## 4.5 Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (nach ÖNORM B 4415, 2010)

### 4.5.1 Versuchsgeräte

Zur Herstellung der Proben wurde eine Styroporschalung (Abb. 4.12) mit einer zylindrischen Form verwendet. Der Innendurchmesser der Schalung betrug 10, die Höhe 14 und die Wandstärke 1,5 cm. Die Schalung aus Styropor ist deshalb zu bevorzugen, da auch weiche Proben problemlos aus der Schalung geschnitten werden können. Bei Metallschalungen wäre das nicht möglich.



Abbildung 4.12: gelagerte SVM-Proben in Styroporschalungen

Zur Durchführung des einaxialen Druckfestigkeitsversuches wurde eine Prüfpresse der Marke Pero (Abb. 4.13) mit einer maximalen Druckkraft von 50 kN verwendet. Diese Presse ist im Labor für Bodenmechanik und Grundbau an der TU Graz aufgebaut. Die Presse ist speziell für einaxiale Druckversuche und für CBR-Versuche konstruiert. Mit dem California Bearing Ratio-Versuch (CBR-Versuch) kann ebenfalls die Tragfähigkeit von Böden untersucht werden.

Um die aufgebrachten Druckkräfte auf die zu prüfende Probe steuern zu können, besitzt die Prüfpresse einen integrierten Kraftaufnehmer. Die Daten werden mithilfe eines Dataloggers zum PC weitergeleitet. Insgesamt sind Probenhöhen bis zu 250 mm möglich, die Hubhöhe ist auf 100 mm begrenzt. Die Geschwindigkeiten des Vorschubes können von 0,002 bis 20,0 mm/min eingestellt werden.

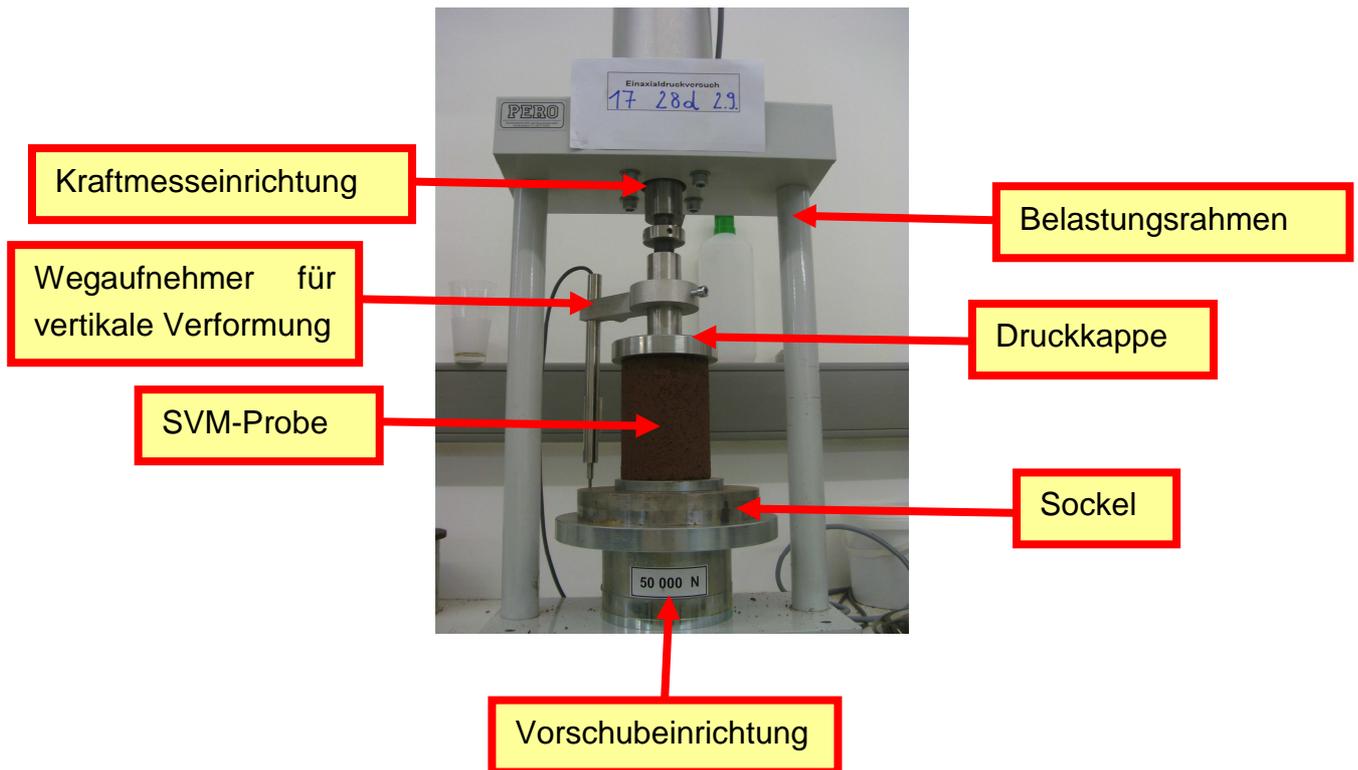


Abbildung 4.13: Presse zur Durchführung der einaxialen Druckprüfung

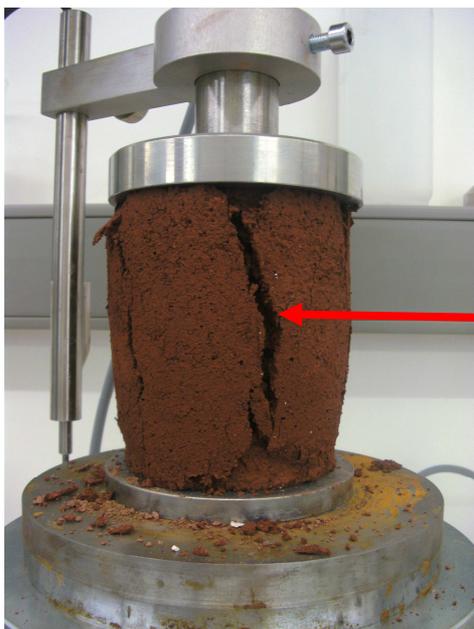
#### 4.5.2 Durchführung

Zuerst wurden die Proben vorsichtig aus der zylindrischen Styroporschalung herausgeschnitten. Die Endflächen sollten dabei planparallel und normal zur Längsachse liegen. Riefen und Löcher in den Endflächen, die größer als ein Zehntel des Probedurchmessers von 10 cm waren, wurden durch weiteres Zuschneiden entfernt. Danach erfolgte die Bestimmung der Abmessungen, des Gewichts sowie des Volumens der SVM-Proben. Anschließend wurde der Probekörper zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut und mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,2 % der Anfangshöhe pro Minute zusammengepresst. Dies entspricht einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,028 mm pro Minute.

Nach der ÖNORM B4415 wird eine Probe mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 % der Anfangshöhe in der Minute abgedrückt. Bei stabilisierten Böden wäre das jedoch zu schnell, da hier eine Bruchstauchung von weniger als 4 % zu erwarten ist. Aus diesem Grund wurde eine Geschwindigkeit von 0,2 % der Anfangshöhe pro Minute festgelegt. Der Datalogger, welcher das Verbindungsglied zwischen Presse und PC ist, übermittelt die Ergebnisse an ein am PC installiertes Software-

programm der Firma Pero. Mit diesem Programm wird der Ablauf gesteuert und aufgezeichnet.

Die Bewegung der Presse musste gleichmäßig ohne Änderungen oder Erschütterungen ablaufen. Die Belastung der SVM-Probe wurde mit einer Messunsicherheit  $F \leq \pm 1$  Newton erfasst. Die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Stauchung muss dabei  $\leq 0,20$  % der Ausgangsprobenhöhe sein. Weiters ist zu erwähnen, dass ein Messweg von mindestens 20 % der ursprünglichen Probenhöhe gegeben sein soll. Dies bedeutet, dass bei einer Probenhöhe von 14 cm ein vorhandener Messweg von mindestens 2,8 cm eingestellt werden muss. Der Einaxialversuch wird beendet, wenn ein Bruch eintritt (Abb. 4.14), oder die vertikale Stauchung des Probekörpers über 15 % liegt (siehe Kapitel 3.1.3.1). Bei allen Proben kam es zum Bruch. Anschließend wurde die ganze Probe oder das größte noch übrig gebliebene Stück erneut gewogen und sofort in den Trockenofen gestellt (siehe Kapitel 4.5.3). Das Versuchsergebnis ist sehr stark vom Wassergehalt der Probe abhängig. Bei allen relevanten Rezepturen, die beim Ausbreit- und Absetzmaß den angeführten Anforderungen nach Kapitel drei entsprochen haben (Mischungen 9, 12, 17 und 18) wurden mindestens neun Einaxialversuche durchgeführt. Dies geschah nach 7, 14 und 28 Tagen mit jeweils drei Versuchen. Bei der Mischung 17 wurden auch nach 3 Tagen einaxiale Druckfestigkeitsversuche durchgeführt. Mit den Messwerten wurden Kurven erstellt, um die Spannungs-Stauchungsbeziehung (siehe Kapitel 3.1.3.1) der SVM-Proben darzustellen. Die Kurven sind im Kapitel 7 und in den Anlagen 1 bis 15 abgebildet.



Bruchverlauf bei Überschreitung der von der Probe aufnehmbaren Kraft

Abbildung 4.14: Zerstörte SVM-Probe beim Einaxialversuch

## 4.5.3 Ergebnisse der Einaxialversuche

Einaxialversuch n. ÖNORM B 4415, 2010			Probennummer 1-18 hergestellt im Labor		
Probe	Probenalter in Tagen	Druckfestigkeit in N m / cm <sup>2</sup>	Probe	Probenalter in Tagen	Druckfestigkeit in N/cm <sup>2</sup>
<b>2/2-2</b>	28	9,88	<b>12/2-4</b>	28	9,05
<b>3/1-1</b>	28	15,80	<b>13/1-3</b>	28	9,83
<b>3/5-1</b>	28	13,60	<b>13/2-1</b>	14	8,06
<b>4/2-1</b>	233	20,07	<b>14/1-4</b>	28	6,92
<b>5/2-1</b>	233	26,40	<b>16/1-4</b>	28	7,87
<b>5/4-4</b>	28	22,72	<b>17/2-4</b>	3	0,98
<b>9/3-2</b>	7	1,47	<b>17/3-1</b>	3	1,23
<b>9/4-2</b>	7	1,38	<b>17/4 1</b>	3	1,26
<b>9/1-4</b>	14	2,04	<b>17/3-4</b>	7	2,10
<b>9/4-1</b>	14	2,52	<b>17/4-3</b>	7	2,59
<b>9/3-1</b>	14	2,04	<b>17/4-4</b>	7	2,22
<b>9/5-4</b>	28	5,0	<b>17/2-3</b>	14	2,85
<b>9/2-1</b>	28	6,18	<b>17/4-2</b>	14	3,13
<b>9/3-1</b>	28	6,32	<b>17/1-4</b>	14	3,11
<b>11/1-1</b>	28	12,15	<b>17/1-1</b>	28	6,52
<b>11/1-3</b>	28	12,93	<b>17/1-2</b>	28	6,23
<b>12/2-2</b>	7	2,97	<b>17/2-1</b>	28	7,40
<b>12/5-4</b>	7	2,45	<b>18/1-1</b>	14	25,89
<b>12/3-1</b>	14	4,03	<b>18/1-2</b>	14	34,71
<b>12/3-4</b>	14	4,11	<b>18/1-3</b>	28	44,26
<b>12/1-1</b>	28	9,36	<b>18/1-4</b>	28	40,75
<b>12/2-3</b>	28	8,43			

Tabelle 4.9: Ergebnisse der Einaxialversuche

Die einaxiale Druckfestigkeit der geprüften Probenreihen lag nach 28 Tagen jeweils unter dem geforderten Maximalwert von 60 N/cm<sup>2</sup>, sowie über dem Minimalwert von 5 N/cm<sup>2</sup>. Die Mischung 18 erreichte dabei mit über 40 N/cm<sup>2</sup> die höchsten einaxialen Druckfestigkeiten. Bei den Mischungen 9,12 und 17 wurde jeweils nach 7, 14 und 28 Tagen die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt.

#### 4.5.4 Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung (nach ÖNORM B 4410, 1974)

Der Wassergehalt  $w$  einer Probe ist das Verhältnis der Masse des in der Probe vorhandenen Wassers  $m_w$  zur Masse der trockenen Probe  $m_d$ . Er wird in Massenprozent angegeben. Mithilfe der Werte des Wassergehaltes können aus den Feuchtdichten  $\rho$  die jeweiligen Trockendichten  $\rho_d$  der Proben berechnet werden.

Um den Wassergehalt eines Materials zu ermitteln, müssen die Proben in einem Ofen getrocknet werden. Dies geschieht bei einer Temperatur von 105 °C. Dabei verdampfen vor allem das frei in den Poren zirkulierende Wasser und das Kapillarwasser. Das adsorptiv an die Mineralien gebundene, sowie das chemisch gebundene Wasser werden bei diesem Trocknungsprozess nicht erfasst. Nach der Abwägung der feuchten Probe wird diese bis zur Massenkonstanz getrocknet, anschließend abgekühlt und nochmals gewogen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde jeweils nach den durchgeführten Einaxialversuchen der Wassergehalt der Thermosandmischungen bestimmt. Die feuchten Proben wurden nach dem Abwiegen bei einer gleichmäßigen Temperatur von 105 °C einen Tag lang im Ofen getrocknet.

In den folgenden Abbildungen ist der verwendete Ofen dargestellt.



Abbildung 4.15: Geschlossener und geöffneter Trockenofen

## 4.5.5 Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung

Wassergehalt nach ÖNORM B4410, 1974			Probennummer 1-18 hergestellt im Labor		
Probe	Probenalter in Tagen	Wassergehalt in %	Probe	Probenalter in Tagen	Wassergehalt in %
1/2	233	7,0	12/2-4	28	20,2
2/1	233	3,5	12/3-3	28	21,9
2/2	28	13,0	12/3-5	28	21,9
3/1	28	20,0	13/1-1	28	22,5
3/2	233	3,1	13/2-1	14	28,5
3/3	233	2,3	14/1-2	28	23,8
3/5	28	28,7	14/1-3	14	30,2
4/2	233	3,3	14/1-4	28	23,2
4/4	28	30,7	16/1-2	28	22,3
5/2	233	14,0	16/1-3	28	19,7
5/4-4	28	27,9	16/1-4	28	23,0
6/1	28	22,7	17/2-4	3	27,8
7/1	28	21,5	17/3-1	3	28,0
9/3-2	7	29,3	17/4 1	3	27,9
9/4-2	7	29,1	17/3-4	7	27,2
9/1-4	14	26,0	17/4-3	7	27,2
9/4-1	14	26,5	17/4-4	7	26,8
9/3-1	28	20,0	17/2-3	14	23,2
9/5-4	28	20,8	17/4-2	14	23,1
9/2-1	28	21,5	17/1-4	14	23,3
9/6-2	28	22,5	17/1-1	28	21,8
9/6-3	28	22,0	17/1-2	28	20,7
9/6-5	28	21,2	17/2-1	28	20,9
11/1-1	28	22,5	17/3-3	28	21,2
11/1-3	28	23,3	17/3-5	28	21,9
12/2-2	7	27,2	17/3-2	14	21,9
12/5-4	7	27,9	18/1-1	14	23,3
12/3-1	14	26,3	18/1-2	28	22,3
12/3-4	14	26,4	18/1-3	28	19,7
12/2-3	28	22,0	18/1-4	14	23,0

Tabelle 4.10: Ergebnisse der Ofentrocknung

#### 4.5.6 Ergebnisse der Trockendichtebestimmung

Die Trockendichte  $\rho_d$  der Thermosandmischungen 9, 12 und 17 nach ÖNORM B 4414-2 (1979) wird nachfolgend ermittelt:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad \text{mit } \rho = \frac{m}{V}$$

$\rho$  = Dichte der Probe  $\left[ \frac{g}{cm^3} \right]$

w = Wassergehalt der Probe gemäß ÖNORM B 4410 (siehe Kapitel 4.5.5)

m = Masse der feuchten Probe  $[g]$

V = Volumen der Probe einschließlich der mit Wasser und Gas gefüllten Poren.....  $[cm^3]$

Trockendichte $\rho_d$ nach ÖNORM B4414-2, 1979			Probennummer 9,12 und 17, hergestellt im Labor		
Probe	Probenalter in Tagen	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Probe	Probenalter in Tagen	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>9/3-2</b>	7	1,40	<b>12/3-5</b>	28	1,39
<b>9/4-2</b>	7	1,39	<b>17/2-4</b>	3	1,39
<b>9/1-4</b>	14	1,39	<b>17/3-1</b>	3	1,39
<b>9/4-1</b>	14	1,38	<b>17/4 1</b>	3	1,40
<b>9/3-1</b>	28	1,41	<b>17/3-4</b>	7	1,40
<b>9/5-4</b>	28	1,41	<b>17/4-3</b>	7	1,40
<b>9/2-1</b>	28	1,40	<b>17/4-4</b>	7	1,42
<b>9/6-2</b>	28	1,38	<b>17/2-3</b>	14	1,38
<b>9/6-3</b>	28	1,39	<b>17/4-2</b>	14	1,39
<b>9/6-5</b>	28	1,42	<b>17/1-4</b>	14	1,39
<b>12/2-2</b>	7	1,40	<b>17/1-1</b>	28	1,41
<b>12/5-4</b>	7	1,38	<b>17/1-2</b>	28	1,41
<b>12/3-1</b>	14	1,39	<b>17/2-1</b>	28	1,39
<b>12/3-4</b>	14	1,41	<b>17/3-3</b>	28	1,42
<b>12/2-3</b>	28	1,40	<b>17/3-5</b>	28	1,40
<b>12/2-4</b>	28	1,40	<b>17/3-2</b>	14	1,39
<b>12/3-3</b>	28	1,42			

Tabelle 4.11: Trockendichten  $\rho_d$  der Mischungen 9, 12 und 17

## 5 Datenauswertung Versuchsstrecke Fischhofgasse

### 5.1 Situierung, Aufbau und Darstellung der Versuchsstrecke

#### 5.1.1 Geographische Lage

Die Versuchsstrecke ist Teil der in Betrieb befindlichen Fernwärmeleitung der Fernwärme Wien (FWW). Sie liegt im 10. Bezirk (Favoriten) direkt neben dem Horrstadion an der Kreuzung Fischhofgasse-Schwarzer Weg (Abb. 5.1). Die Leitungen wurden im November 2008 verlegt und sind Bestandteil des Wiener Wärmerings, der die Stadt Wien als geschlossenes Kreissystem mit Wärmeenergie versorgt.

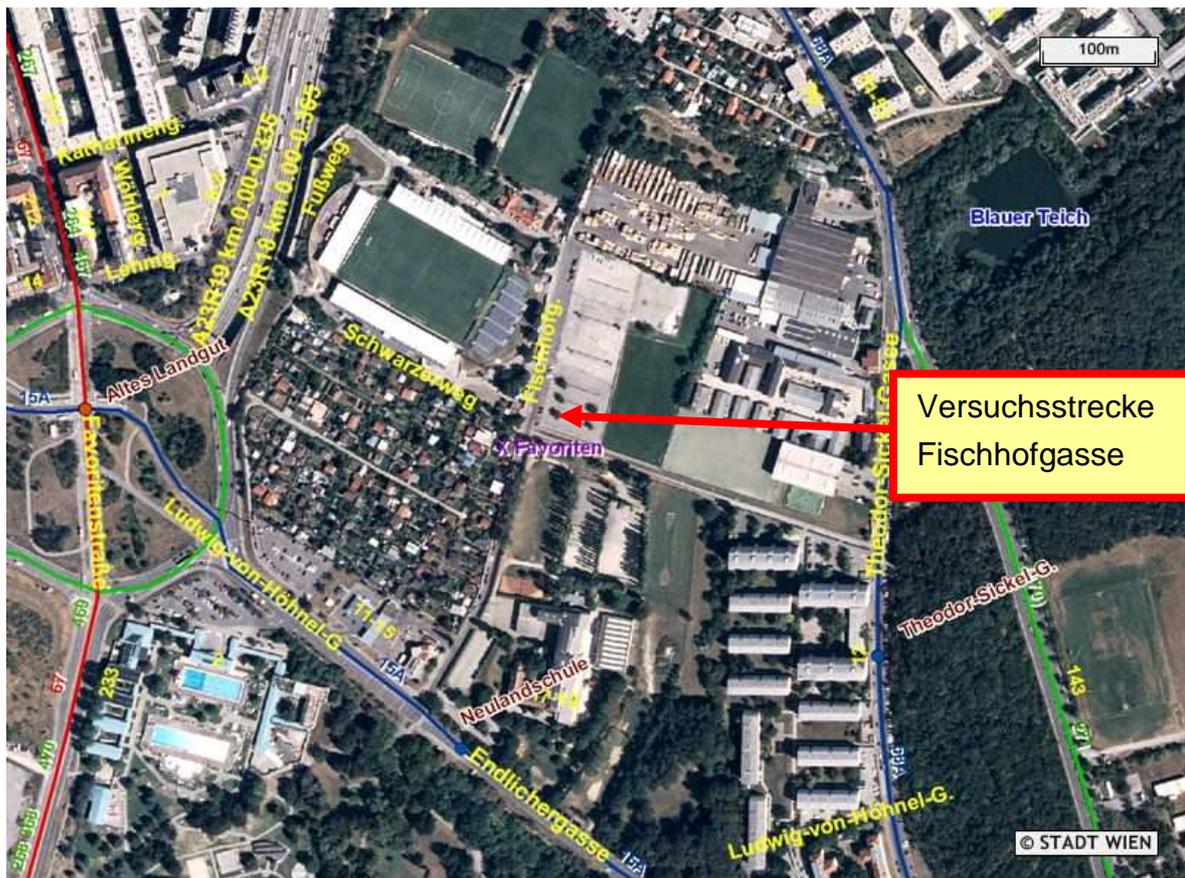


Abbildung 5.1: Lageplan der Versuchsstrecke in der Fischhofgasse

### 5.1.2 Einbau der Thermosandmischungen

Am 20.11.2008 wurde die Rohrzone der Künette mit vier verschiedenen Varianten von Thermosandmischungen verfüllt. Jeder Abschnitt ist circa 25 m lang. Es wurden mittig zwei Fernwärmerohre (Rück- und Vorlauf) der Dimension DN 150 mm in einem Mantelrohr DN 400 mm, sowie seitlich zwei Leerrohre DN 100 mm, verlegt (Abb. 5.2). Ein Ausführungsplan der verlegten Fernwärme- strecke ist im Anhang 39 beigelegt.

Die verschiedenen Thermosandmischungen werden nachfolgend beschrieben.

Im ersten Abschnitt wurde die Rohrzone der Künette mit einer Thermosand- Wassermischung verfüllt. Zur Verfüllung des zweiten Abschnittes diente eine Thermosand-Wasser-Fließmittel-Mischung. Im dritten Abschnitt wurden ein Luftporenbildner und Zement als Binder verwendet, die mit den Komponenten Thermo- sand und Wasser vermischt und eingebracht wurden. Auf der letzten Etappe wur- den wieder ein Fließmittel, ein Luftporenbildner und ein höherer Anteil Zement als Bindemittel eingesetzt.

Der Einbau erfolgte mithilfe eines Minidumpers, da der Weg mit dem Fahrmischer nicht befahrbar war. Nachfolgend werden die getätigten Einbauten tabellarisch erfasst. Die Tab. 5.1 zeigt die eingebrachten Massen in Kilogramm. In der Tab. 5.2 ist der Einbau in Gewichtsprozent, immer bezogen auf 100 % Thermosandtro- ckenmasse, angegeben.

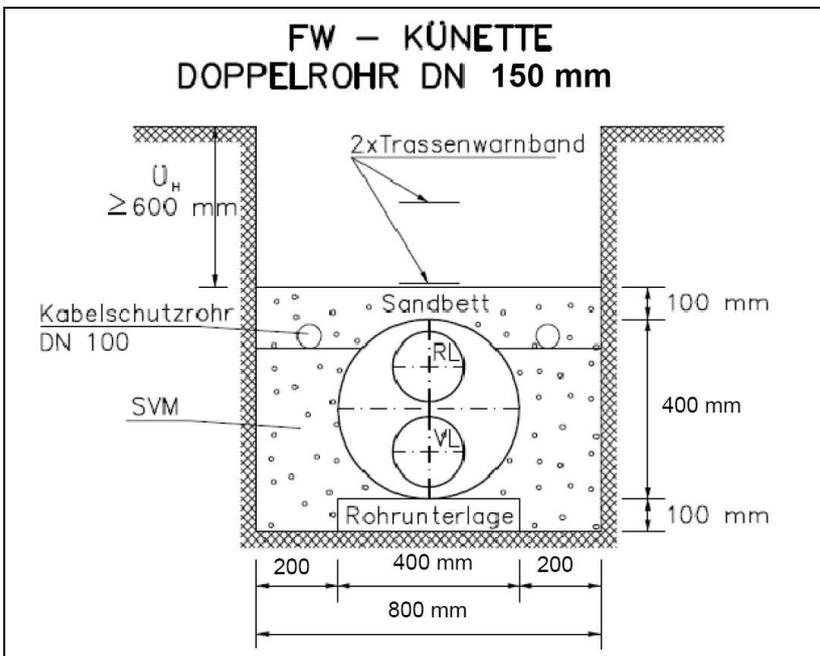


Abbildung 5.2: Querschnitt der Versuchsstrecke in der Fischhofgasse

	Abschnitt 1 (kg)	Abschnitt 2 (kg)	Abschnitt 3 (kg)	Abschnitt 4 (kg)
Thermosand	904	886	883	912
Wasser	354	359	363	338
Fließmittel		4,0		2,0
Zemen			19,7	27,5
Luftporenbildner			0,20	0,52

Tabelle 5.1: Zusammensetzung der Thermosandmischungen Fischhofgasse (kg/m<sup>3</sup>)

	Abschnitt 1 (in %)	Abschnitt 2 (in %)	Abschnitt 3 (in %)	Abschnitt 4 (in %)
Thermosand	100	100	100	100
Wasser	39	41	40	36
Fließmittel		3		2,4
Zement			2,2	3
Luftporenbildner			0,02	0,05

Tabelle 5.2: Zusammensetzung der Thermosandmischungen Fischhofgasse (Gew-%)

### 5.1.3 Ausbau der Bodenproben

Nach 43 Wochen Liegezeit wurde die Versuchsstrecke am 16.09.2009 freigelegt. Anschließend wurden Feldversuche durchgeführt. Insgesamt sind vier Schürfe vorgenommen worden, um alle eingebauten Varianten untersuchen zu können. Die Schürfe hatten bei einer Tiefe von ca. 1,3 m die Querschnittsabmessungen von etwa 1 m x 2 m. Der 1,5 Tonnen schwere Minibagger hob bis Oberfläche Rohrleitungszone aus.

Der weitere Aushub erfolgte händisch mit Schaufel und Krampen, um das Fernwärmerohr nicht zu beschädigen.



Abbildung 5.3: Herstellen der Schürfe

## 5.2 InSitu-Versuche und Laborversuche

### 5.2.1 Rammsondierung nach Beletz

Rammsondierungen werden zur Nachprüfung der Wirksamkeit von Verdichtungsmaßnahmen im Untergrund und in Anschüttungen verwendet. Weiters dienen sie zur Gewinnung von Hinweisen auf die Zustandsform bindiger Böden.

Durch die Sondierung können außerdem Informationen über bodenphysikalische Kennwerte gewonnen werden, die zur Beurteilung der Belastbarkeit des Bodens beitragen. Die Rammsonde nach Beletz gemäß ONR FW 110A (Abb. 5.4) ist die kleinste aller Rammsonden und nur für Fernwärmeleitungen konzipiert. Zudem hat sie den Vorteil, dass sie einfach zu bedienen und leicht zu transportieren ist. Sie wurde für die Untersuchung an den eingebrachten Thermosandmischungen verwendet.

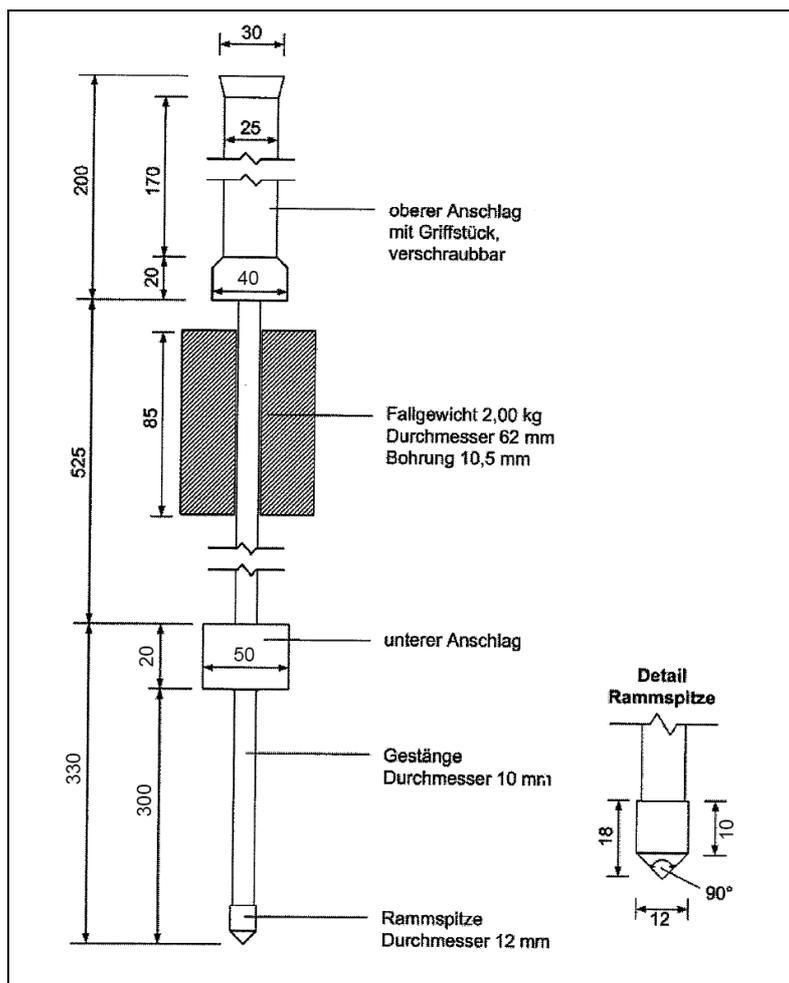


Abbildung 5.4: Rammsonde nach Beletz (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999)

### 5.2.2 Durchführung der Rammsondierung

Die Rammsonde wurde lotrecht über die freigelegten Thermosandmischungen gestellt (Abb. 5.5). Anschließend wurde das zwei Kilogramm schwere Fallgewicht bis zum oberen Anschlag hochgezogen und wieder fallen gelassen, so dass es auf dem unteren Anschlag aufschlägt. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis die Sonde 30 cm in den Boden eingedrungen ist. Die dafür notwendigen Schläge wurden gezählt. Pro Schurf wurden vier Rammsondierungen durchgeführt. Die Resultate der einzelnen Sondierungen sind in der Tab. 5.3 aufgelistet. Im ersten Abschnitt wurden durchschnittlich 9, im zweiten 14, im dritten 34 und im vierten Abschnitt 72 Schläge gezählt. Die Verhältnisse dieser Werte sind damit gut mit jenen der einaxialen Druckfestigkeiten des jeweiligen Abschnitts (siehe 5.2.4) vergleichbar.



Abbildung 5.5: Verwendete Rammsonde Fischhofgasse

Rammsondierung nach Beletz in Schlägen pro 30 cm Fallhöhe				
Anzahl der Schläge	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
	8	12	30	80
	9	10	37	62
	12	14	32	76
8	10	29	69	
Mittelwerte	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>34</b>	<b>72</b>

Tabelle 5.3: Rammsondierungswerte Fischhofgasse

### 5.2.3 Entnahme von Stechzylindern zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit (nach Ö-NORM B4401-1, 1980 und Ö-NORM B4415, 2010)

Von jedem Abschnitt wurden fünf Ausstechzylinder (Abb. 5.8), bestehend aus einem nahtlosen Präzisionsstahlrohr, entnommen, um später im Labor Einaxialversuche an den Proben durchführen zu können. Bei der Entnahme von Stechzylindern gibt es verschiedene Verfahren. Um ungestörte Proben aus feinkörnigen Böden zu entnehmen, ist der Ausstechzylinder mit Schlaghaube und Führungszylinder inklusive einer aufgeschweißten Grundplatte (Abb. 5.6) eine geeignete Methode. Die Stechzylinder sind 12 cm hoch, bei einem Innendurchmesser von 10 cm. Die Wanddicke der aus Metall bestehenden Zylinder beträgt 2 mm.



Abbildung 5.6: Stechzylinder (von links) mit Führungszylinder und Schlaghaube nach ÖNORM B 4401-1,1980

Der Ablauf von der Entnahme bis zum Laborversuch wird im Folgenden chronologisch beschrieben und bildlich (Abb. 5.7) dargestellt:

- 1.) Zuerst wurde der Führungszylinder horizontal auf die Oberfläche des zu prüfenden Bettungsmaterials (Leitungszone) gestellt. Der Stechzylinder, der an der Außenseite der Unterkante mit  $75^\circ$  zugespitzt ist, um besser eindringen zu können, wurde in den Führungszylinder eingelegt und die Schlaghaube auf den Ausstechzylinder gesetzt.
- 2.) Mit einem Hammer wurde mittels der Schlaghaube der Stechzylinder in die Thermosandmischung geschlagen.
- 3.) Der vollständig gefüllte Ausstechzylinder wurde vorsichtig ausgegraben.

- 4.) Der Stechzylinder wurde mit Kappen versehen und anschließend in Plastik verpackt, damit die Proben druck- und wasserdicht sind.
- 5.) Die Proben wurden mittels eines Hydraulikstempels, dessen Querschnittsfläche jener der Proben entspricht, gänzlich aus der Metallschalung herausgedrückt. Dann erfolgte die Bestimmung der Abmessungen und der Masse.
- 6.) Der Einaxialversuch kann dann an der SVM-Probe durchgeführt werden. Nach dem Versuch kommt die Probe in den Trockenofen, um den Wassergehalt zu ermitteln.
- 7.) Es wurden von jedem Abschnitt jeweils drei einaxiale Druckfestigkeiten ermittelt (siehe 5.2.4)

1.)



2.)



3.)



4.)



5.)



6.)



Abbildung 5.7: Ablauf mit Stechzylinder, Führungszylinder, Schlaghaube und Herausdrücken der Probe mit anschließendem Einaxialversuch

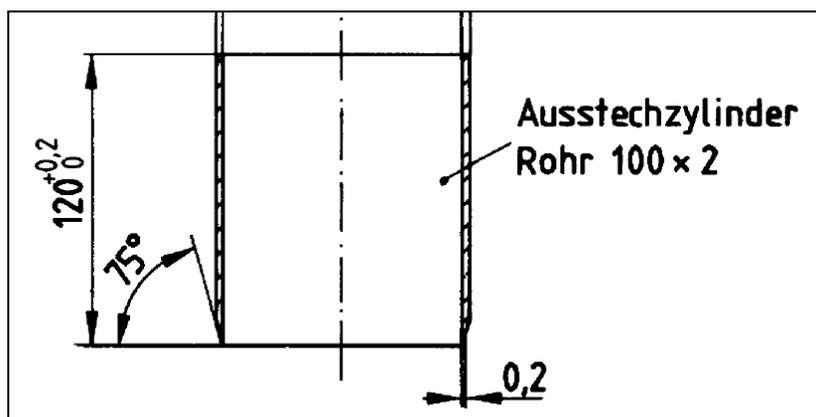


Abbildung 5.8: Ausstechzylinder nach ÖNORM B 4401-1, 1980

## 5.2.4 Ergebnisse der Laborversuchsreihe Fischhofgasse

Bei den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Fischhofgasse (Tab.5.4 bis 5.7) wurde auf eine Abminderung der Ergebnisse nach Kapitel 3.1.3.2 verzichtet. Es wurden Ausstechzylinder mit einer Höhe ( $h$ ) von 12 cm und einer Breite ( $b$ ) von 10 cm verwendet (Abb.5.8). Dies entspricht einem  $h/d$ -Verhältnis von 1,2. Hier würde eine Abminderung der Werte nur 5 % ausmachen (siehe Abb.3.1).

### 5.2.4.1 Abschnitt 1: Einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalt

Probenbezeichnung			1/1	1/2	1/3
Probenalter in Wochen			43	43	43
Durchmesser	$d_0$	cm	10,0	10,0	10,0
Höhe	$h_0$	cm	12,0	12,0	12,0
Masse	$m_0$	g	1623,1	1634,0	1617,3
Volumen	$V_0$	cm <sup>3</sup>	942,48	942,48	942,48
Feuchtdichte	$\rho$	g/ cm <sup>3</sup>	1,72	1,73	1,72
Kraft	$F_{\max}$	N	168	161	160
<b>Spannung</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>2,10</b>	<b>2,15</b>	<b>2,49</b>
Maximale Stauchung	$\varepsilon$	%	3,2	2,6	2,2
Fläche bei Bruch	$A_{\max}$	cm <sup>2</sup>	80,74	80,60	80,37
<b>Wassergehalt</b>	<b><math>w</math></b>	<b>Gew %</b>	<b>24,2</b>	<b>23,9</b>	<b>24,1</b>
Trockendichte	$\rho_d$	g/ cm <sup>3</sup>	1,39	1,40	1,39

Tabelle 5.4: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 1

Einaxiale Druckfestigkeiten graphisch dargestellt:

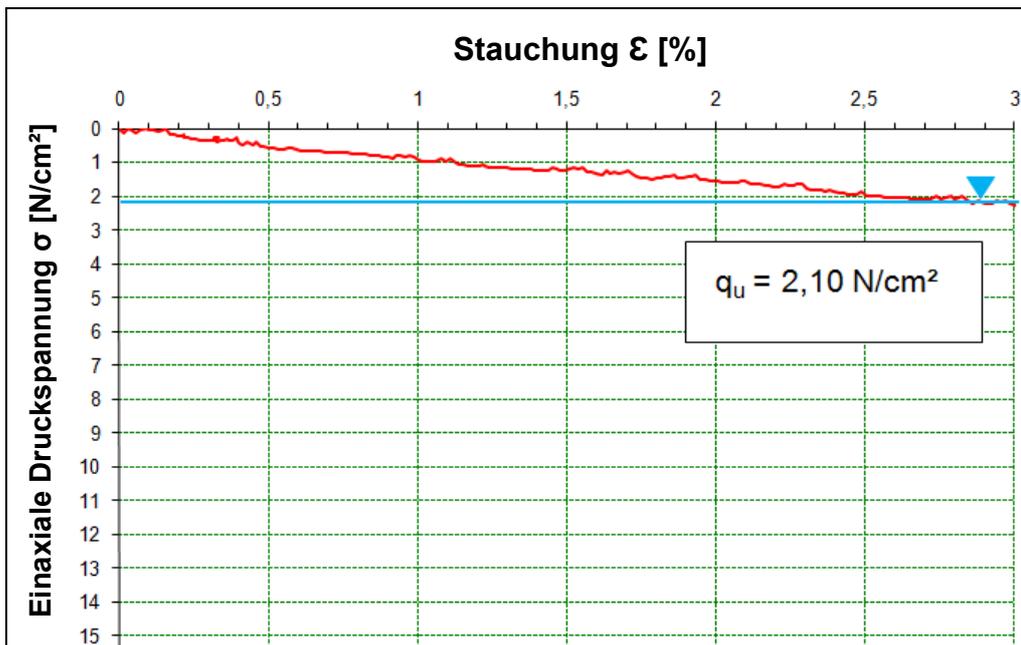


Abbildung 5.9: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/1

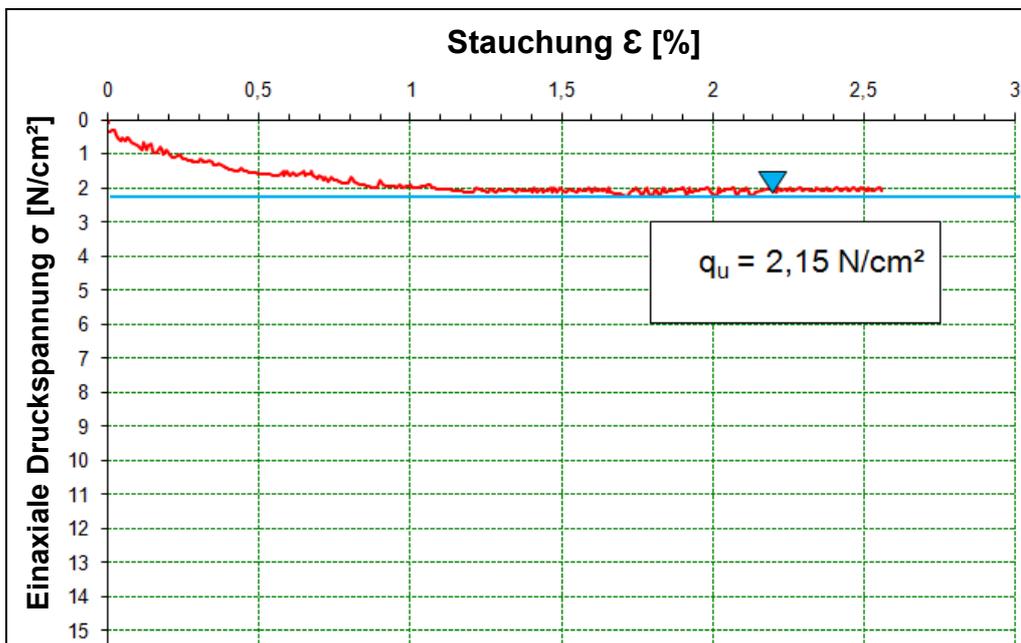


Abbildung 5.10: : Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/2

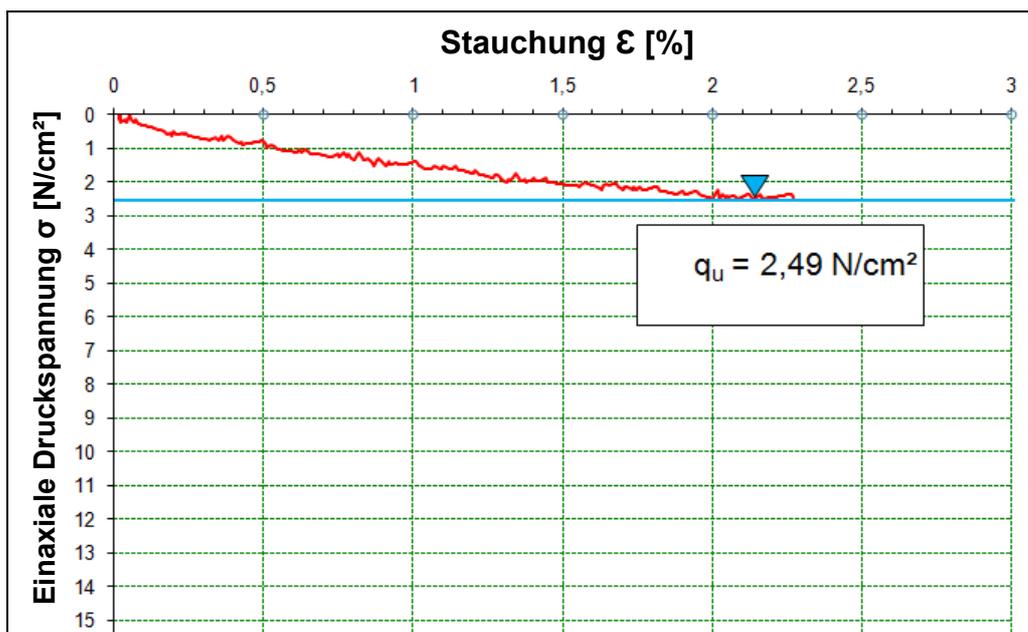


Abbildung 5.11: : Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/3

#### 5.2.4.2 Abschnitt 2: Einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalt

Probenbezeichnung			2/1	2/2	2/3
Probenalter in Wochen			43	43	43
Durchmesser	d <sub>0</sub>	cm	10,0	10,0	10,0
Höhe	h <sub>0</sub>	cm	12,0	12,0	12,0
Masse	m <sub>0</sub>	g	1623,0	1614,6	1594,9
Volumen	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	942,48	942,48	942,48
Feuchtdichte	ρ	g/ cm <sup>3</sup>	1,72	1,71	1,69
Kraft	F <sub>max</sub>	N	430	371	433
<b>Spannung</b>	<b>σ</b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>5,39</b>	<b>4,59</b>	<b>5,44</b>
Maximale Stauchung	ε	%	1,8	2,8	2,7
Fläche	A <sub>max</sub>	cm <sup>2</sup>	80,2	80,7	80,3
<b>Wassergehalt</b>	<b>w</b>	<b>w</b>	<b>23,8</b>	<b>24,0</b>	<b>24,2</b>
Trockendichte	ρ <sub>d</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,39	1,38	1,36

Tabelle 5.5: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 2

Einaxiale Druckfestigkeiten graphisch dargestellt:

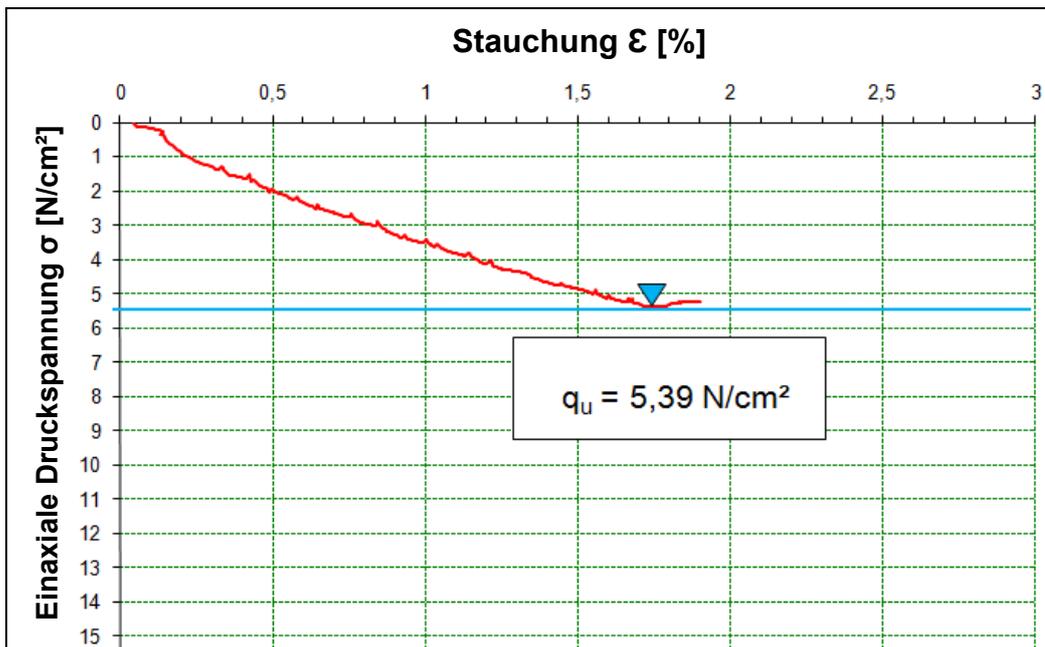


Abbildung 5.12: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/1  $\text{g/cm}^3$

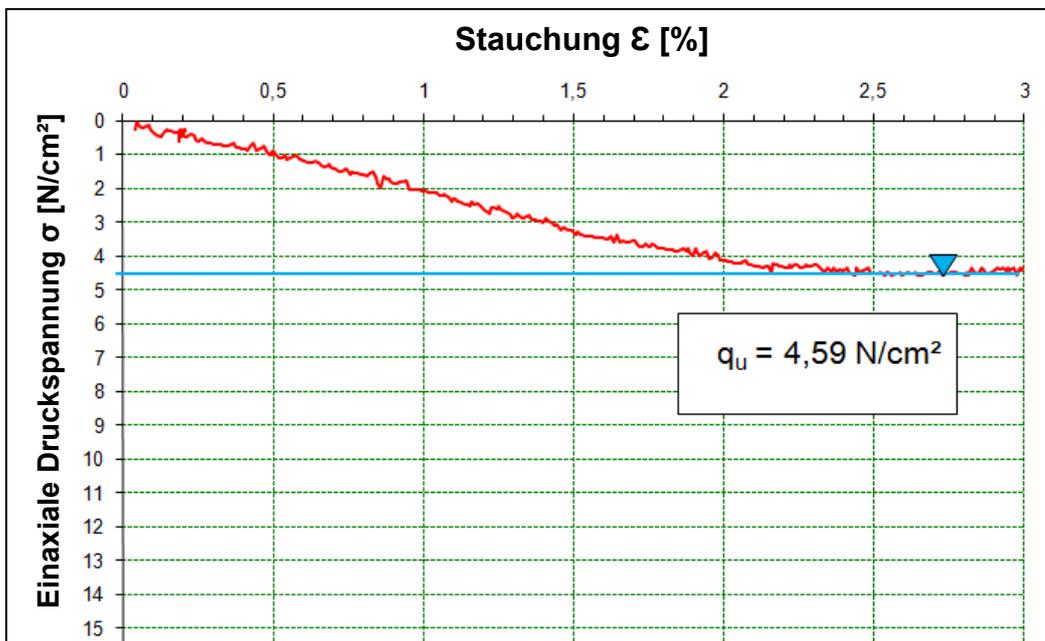


Abbildung 5.13: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/2

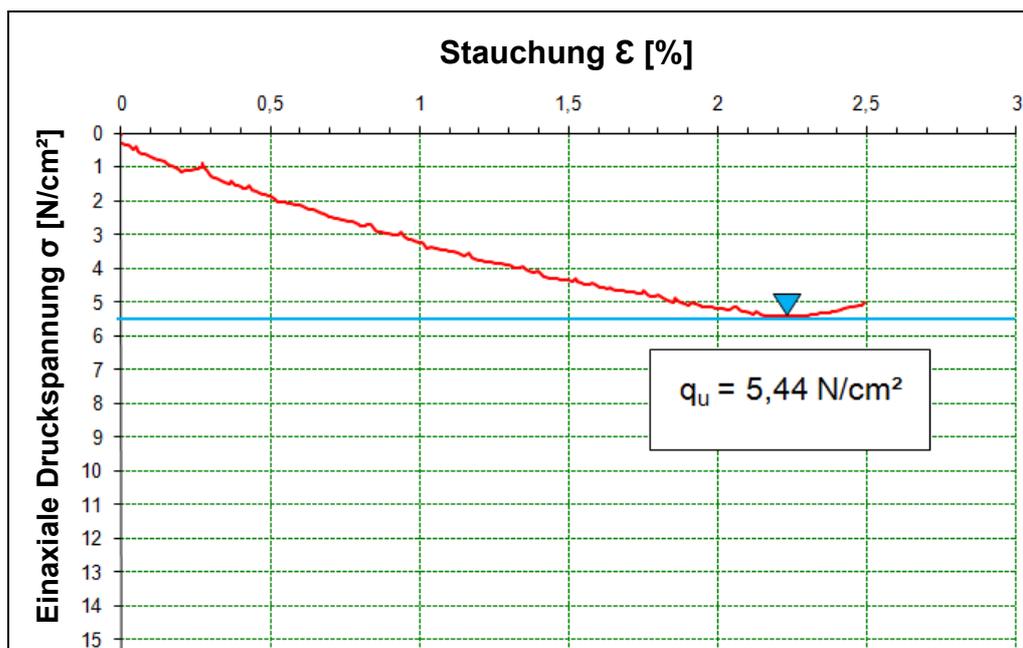


Abbildung 5.14: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/3

### 5.2.4.3 Abschnitt 3: Einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalt

Probenbezeichnung			3/1	3/2	3/3
Probenalter in Wochen			43	43	43
Durchmesser	d <sub>0</sub>	cm	10	10	10
Höhe	h <sub>0</sub>	cm	12	12	12
Masse	m <sub>0</sub>	g	1725,8	1750,0	1782,6
Volumen	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	942,48	942,48	942,48
Feuchtdichte	ρ	g/cm <sup>3</sup>	1,83	1,86	1,89
Kraft	F <sub>max</sub>	N	729	822	934
<b>Spannung</b>	<b>σ</b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>8,98</b>	<b>10,68</b>	<b>11,43</b>
Änderung der Höhe des Probekörpers	ε	%	3,6	3,9	4,4
Fläche	A <sub>max</sub>	cm <sup>2</sup>	81,37	81,80	82,21
<b>Wassergehalt</b>	<b>w</b>	<b>%</b>	<b>36,0</b>	<b>37,9</b>	<b>37,6</b>
Trockendichte	ρ <sub>d</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,35	1,35	1,37

Tabelle 5.6: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 3

Einaxiale Druckfestigkeiten graphisch dargestellt:

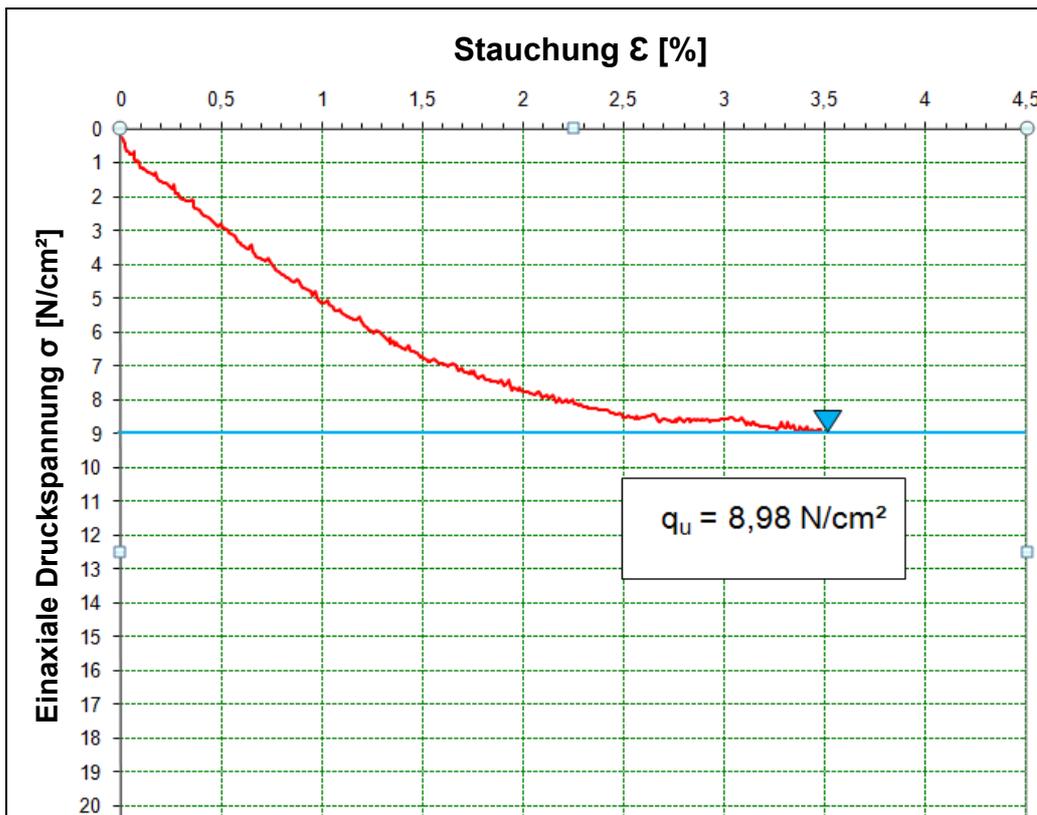


Abbildung 5.15: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/1

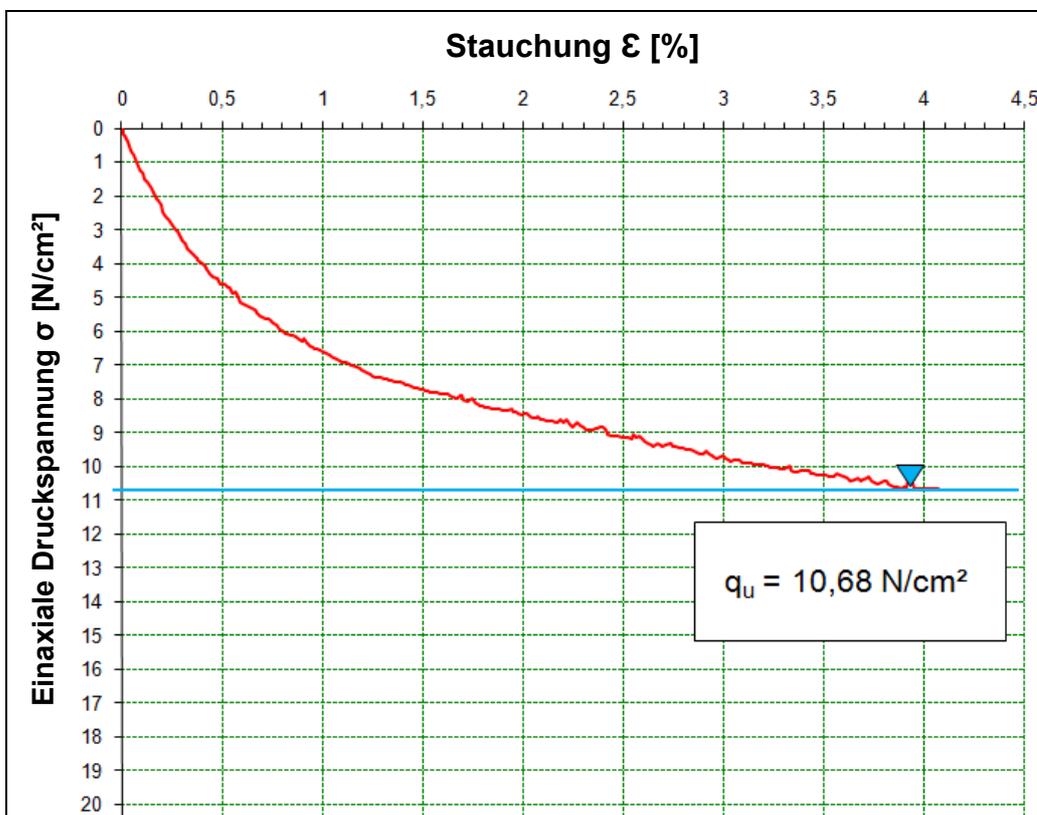


Abbildung 5.16: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/2

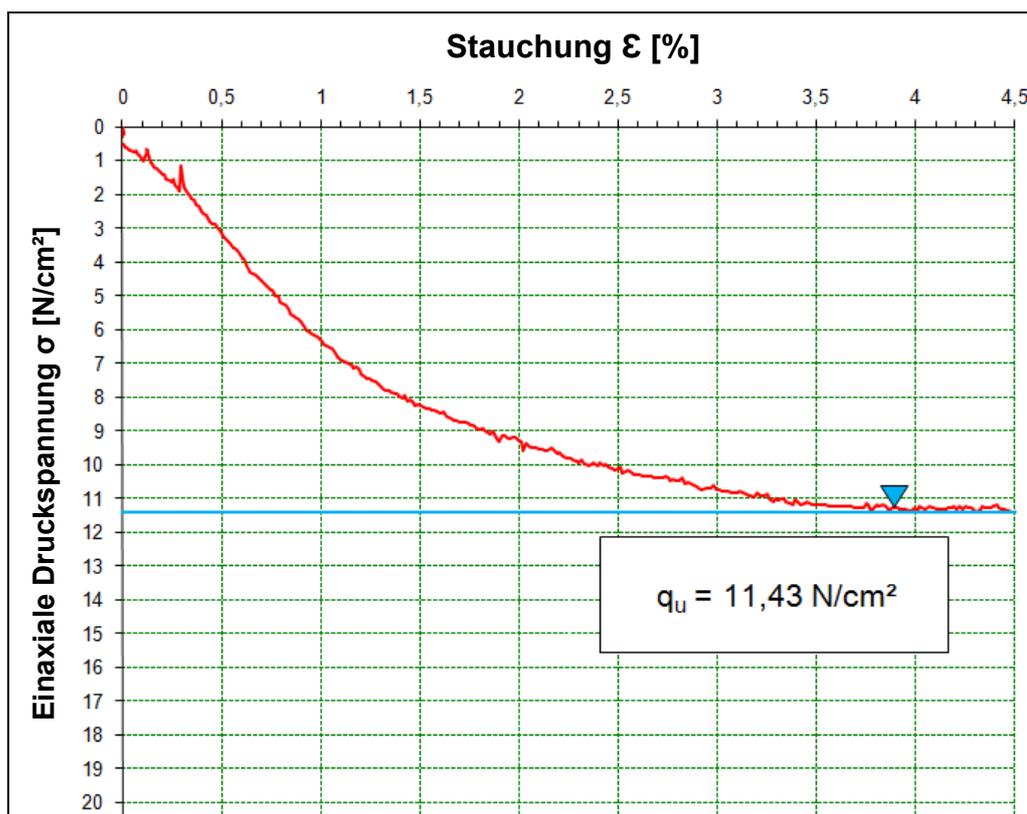


Abbildung 5.17: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/3

#### 5.2.4.4 Abschnitt 4: Einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalt

Probenbezeichnung			4/1	4/2	4/3
Probenalter in Wochen			43	43	43
Durchmesser	$d_0$	cm	10,0	10,0	10,0
Höhe	$h_0$	cm	12,0	12,0	12,0
Masse	$m_0$	g	1775,8	1770,0	1695,2
Volumen	$V_0$	$\text{cm}^3$	942,48	942,48	942,48
Feuchtdichte	$\rho$	$\text{g/cm}^3$	1,88	1,88	1,80
Kraft	$F_{\max}$	N	1410,0	1550,0	1338,0
<b>Spannung</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>\text{N/cm}^2</math></b>	<b>17,43</b>	<b>19,32</b>	<b>16,50</b>
Maximale Stauchung	$\epsilon$	%	2,7	2,4	3,2
Fläche	$A_{\max}$	$\text{cm}^2$	81,57	81,63	81,0
<b>Wassergehalt</b>	<b>w</b>	<b>%</b>	<b>36,4</b>	<b>35,5</b>	<b>37,8</b>
Trockendichte	$\rho_d$	$\text{g/cm}^3$	1,38	1,39	1,37

Tabelle 5.7: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 4

Einaxiale Druckfestigkeiten graphisch dargestellt:

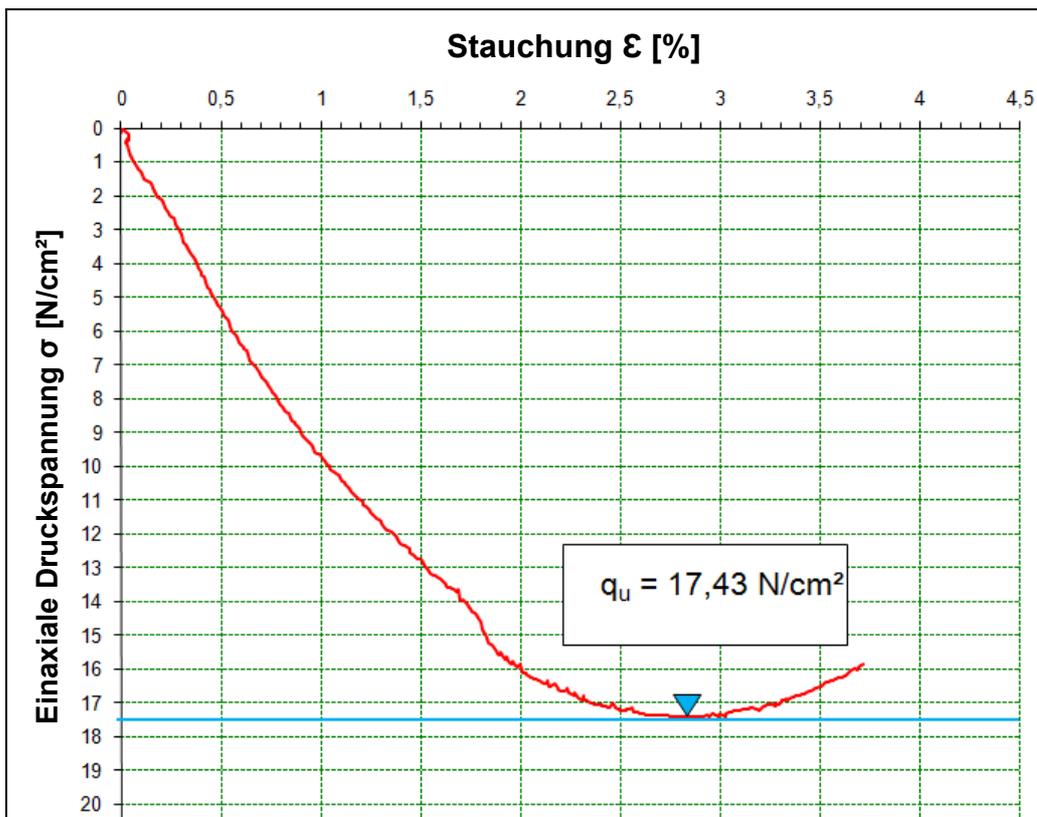


Abbildung 5.18: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/1

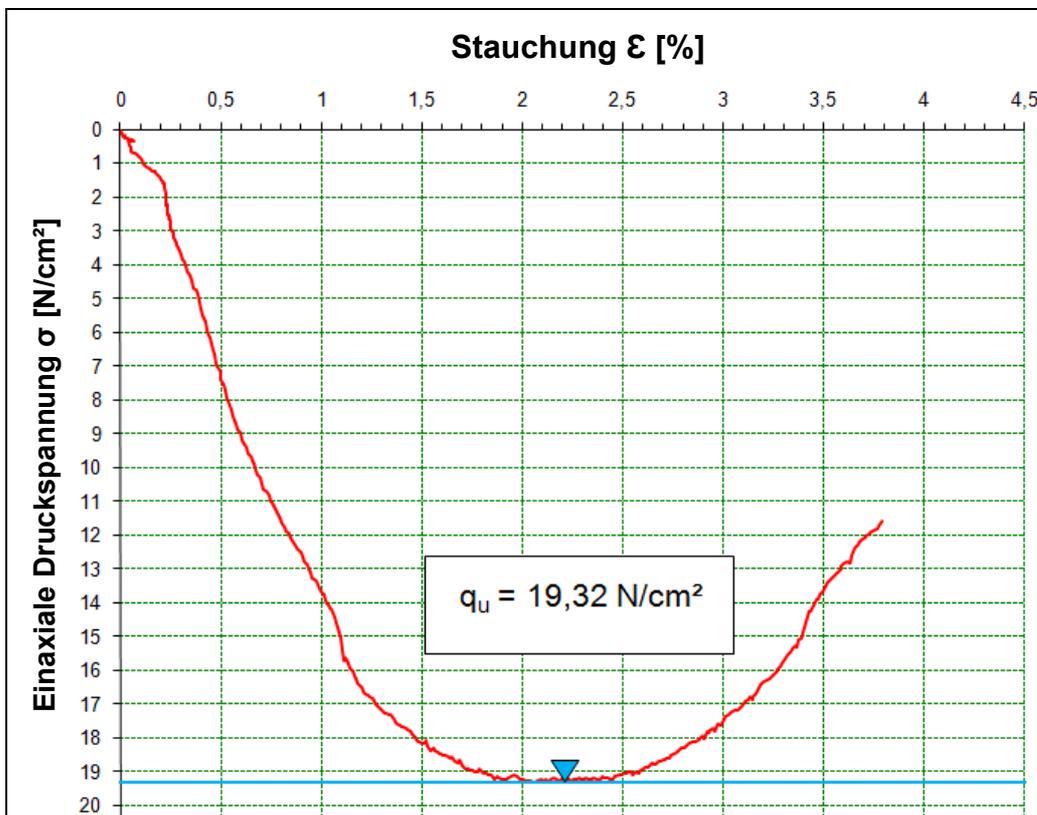


Abbildung 5.19: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/2

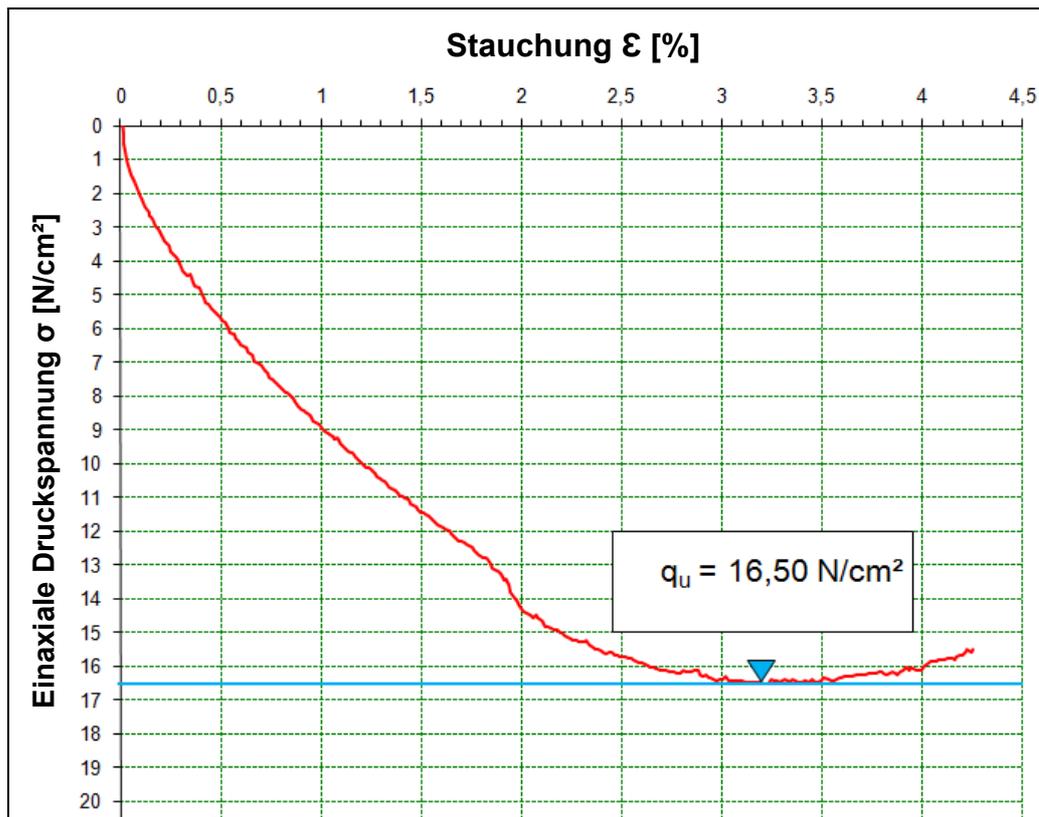


Abbildung 5.20: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/3

## 6 Ermittlung der Wärmedämmeigenschaften

Eine weitere Anforderung an fließfähige Thermosandmischungen ist die Aufrechterhaltung der guten Wärmedämmeigenschaften. Um diese nachzuweisen, wurde an den hergestellten Proben eine Versuchsreihe im Labor des Instituts für Geophysik an der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Es wurden die drei Probenreihen 9, 12 und 17 untersucht, da sie den Anforderungen an ein Bettungsmaterial entsprochen haben.

### 6.1 Wärmeleitung im Boden

#### 6.1.1 Grundlagen der Wärmeleitung

Zur Übertragung von thermischer Energie, also Wärme, existieren in der Thermodynamik drei Mechanismen: die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung und die Konvektion. Für die Wirksamkeit dieser thermodynamischen Prinzipien ist es notwendig, dass in einem Medium oder zwischen zwei Medien eine Temperaturdifferenz vorliegt (Baehr, H.D. et al., 2003).

Wärmeleitung kann zwischen Festkörpern oder zwischen einem Festkörper und einem Fluid stattfinden.

#### 6.1.2 Der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda$ bei Messungen an Bettungsmaterialien

Für Messungen an Bettungsmaterialien gilt es über die zugeführte Energie und die messbare Temperaturänderung Rückschlüsse auf den vorhandenen Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  zu ziehen. Als Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  bezeichnet man die temperaturabhängige Eigenschaft eines Feststoffes, Energie in Form von Wärme zu übertragen. Der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  wird in W/mK angegeben. Es ist vor allem auf den Wassergehalt in den Bodenproben zu achten. Wasser besitzt im Allgemeinen eine geringere Leitfähigkeit ( $\lambda = 0,6$ ) als das Korngefüge. In einer getrockneten Probe befindet sich jedoch statt Wasser Luft in den Poren, die eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Wasser aufweist. Aus diesem Grund ergibt sich für

eine Probe mit geringerem Wassergehalt eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Bettungsmaterial sollte eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

## 6.2 Die Bestimmung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes $\lambda$ von Bettungsmaterialien

### 6.2.1 Erklärung des Messprinzips

Für die Messung an den Bettungsmaterialproben gibt es zwei unterschiedliche Messprinzipien. Entweder die Messung über eine Halbraumsonde oder über eine Vollraumsonde. Bei beiden Varianten wird eine Wärmesonde mit konstanter Heizleistung mit einer Probe in Berührung gebracht. Dabei wird die Änderung der Temperatur (Erwärmung) an der Quelle gemessen (Teka, 2007).

Der wesentliche Unterschied zwischen Messungen mit der Vollraum- und der Halbraumsonde besteht darin, dass sich bei der Halbraumsonde die Wärme nur auf den halben Raum ausbreiten kann. Deswegen müssen die Ergebnisse der Messung mit der Halbraumsonde (Abb. 6.1) verdoppelt werden. Das der Halbraumsonde zugeordnete Softwareprogramm führt dies automatisch durch.

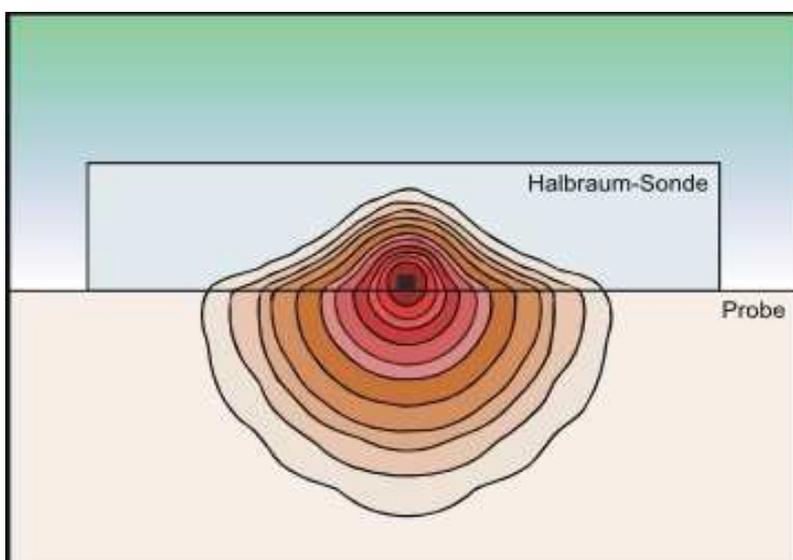


Abbildung 6.1: Abbildung der Wärmeleitung einer Halbraumsonde (Teka, 2007)

Die Messungengenauigkeit beider Sonden beträgt bezogen auf den  $\lambda$ -Wert  $\pm 2\%$ . Ein Kriterium, um den Einsatzbereich der beiden Sonden zu differenzieren, liegt im

Messbereich. Die Vollraumsonde deckt den Bereich von 0,3 bis 10 W/mK, die Halbraumsonde jenen von 0,1 bis 10 W/mK ab. Bei der Vollraumsonde verursacht das Einsetzen der Sonde eine geringfügige Störung der Probe. Bei den erwarteten und auch erzielten Werten der Thermosandmischungen sind beide Sonden (Abb. 6.2) zulässig. Ein weiteres Differenzierungsmerkmal ist die Festigkeit des zu prüfenden Stoffes. Weiche Proben werden fast ausschließlich mit Vollraumsonden untersucht. Dies geschieht deshalb, weil bei der Messung mit Halbraumsonden Druck auf die Proben ausgeübt wird, was zu einer Zerstörung weicher Proben führen würde. Für die Bestimmung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes  $\lambda$  wurden beide Sonden eingesetzt.

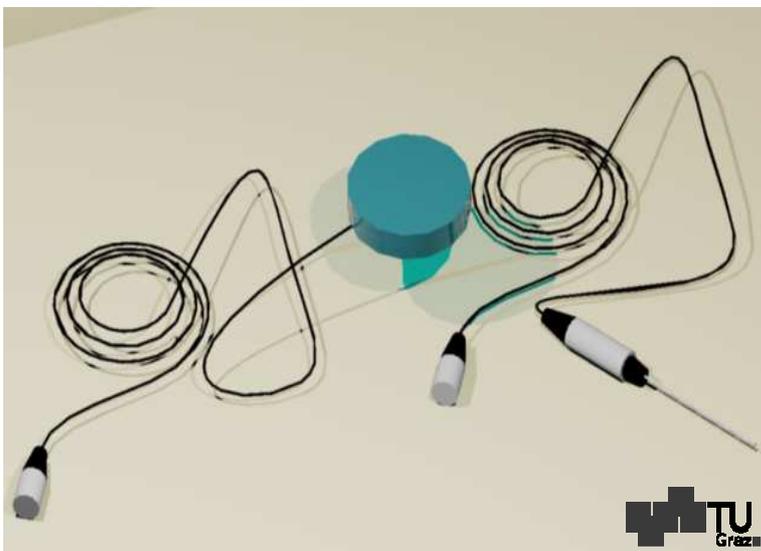


Abbildung 6.2: Vergleich Halbraumsonde (links) und Vollraumsonde (Pagitsch, 2009)

## 6.3 Durchführung der Wärmemessungen

### 6.3.1 Vorbereitung

Vor Beginn der Messung wurden die Proben einen Tag lang im klimatisierten Versuchsraum des Institutes für Geophysik gelagert, damit sie eine konstante Temperatur aufweisen. Die Versuche wurden jeweils bei einer Raumtemperatur von 20 °C durchgeführt und zusätzlich durch einen Thermoschrank (Abb. 6.3) mit 20 °C vor der Umgebung geschützt. Dieser Schutz ist unumgänglich, da bereits das kurzfristige Öffnen einer Innentüre im Labor geringe Temperaturschwankungen bewirkt und eine Zeitverzögerung der Untersuchung mit sich bringt. Der

Thermoschrank hat die Abmessungen 70 x 70 x 70 cm und ist innen mit Styropor-Dämmplatten verkleidet. Die Wärmeleitfähigkeitsmessung wird vom Softwareprogramm bei konstanten Temperaturverhältnissen weitergeführt. Zur Steuerung wird ein computergesteuertes Messgerät mit der Bezeichnung TK04 verwendet, welches eine Verbindung zwischen der Sonde und dem Computer herstellt. Die notwendigen Daten zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit werden vom Messgerät an den PC gesendet.

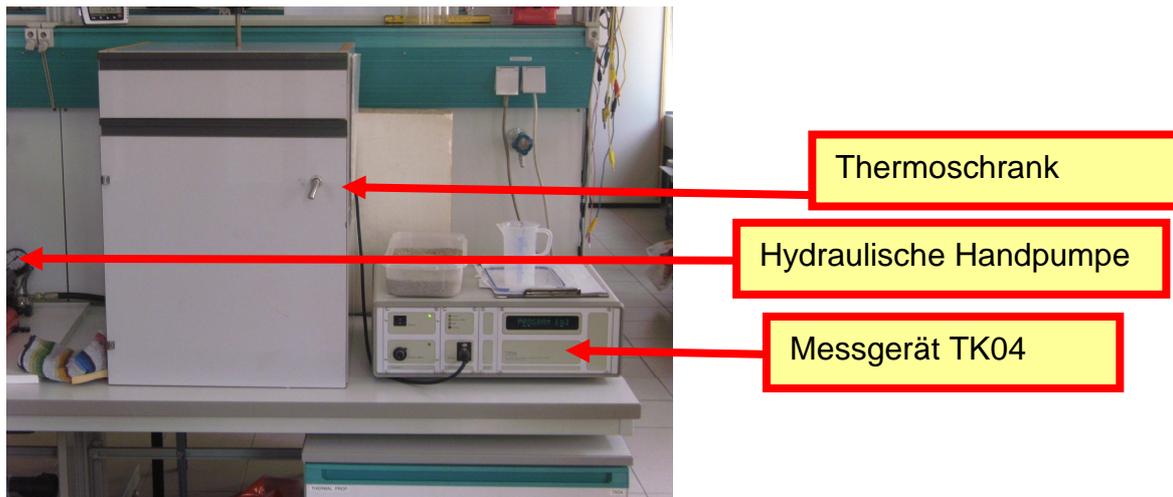


Abbildung 6.3: Labor des Instituts für Geophysik an der Montanuniversität

### 6.3.2 Messung mit der Halbraumsonde

Bei der Halbraumsonde wird eine Presse mit hydraulischer Handpumpe (Abb. 6.5) benötigt, um den notwendigen Kontakt zwischen der Probe und der Sonde herzustellen. Der aufzubringende Druck liegt je nach Festigkeit der Probe zwischen 10 und maximal 15 bar. Die Oberflächen müssen parallel und glatt sein. Bei den verwendeten Proben wurde die Oberfläche der Probe mit einem feinen Schleifpapier geschliffen und auf die glatte Oberseite eine wärmeleitende Creme aufgetragen. Dies geschieht, um die Poren der Probenoberfläche zu verschließen und einen vollständigen Kontakt zur Sonde herzustellen. Anschließend wurde mit einer hydraulischen Handpumpe (Abb. 6.4) ein Kontaktdruck von 10 bar auf die SVM-Probe aufgebracht. Danach konnte der Thermoschrank geschlossen und das Messprogramm gestartet werden. Jede Messung dauerte mindestens 1 Stunde.



Abbildung 6.4: Halbraumsonde mit Probe

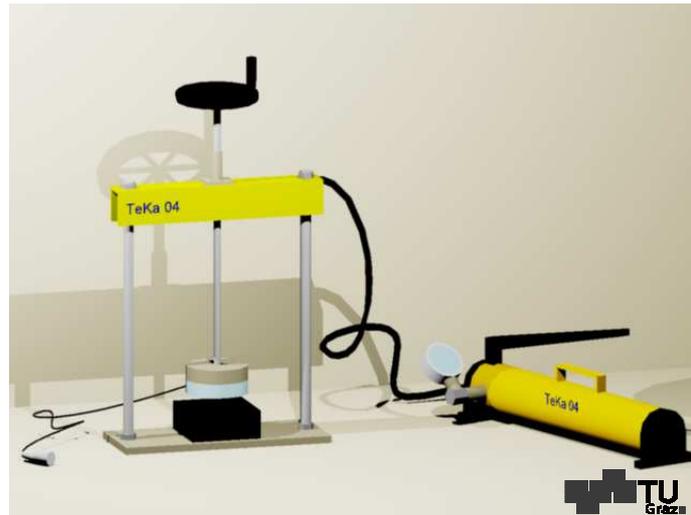


Abbildung 6.5: Halbraumsonde mit hydraulischer Handpumpe (Teka, 2007)

### 6.3.3 Messung mit der Vollraumsonde

Bei dieser Variante war es nicht notwendig die Oberfläche der SVM-Probe zu schleifen. Die Sonde wurde vorsichtig mit der Hand von oben in die Probe eingestochen und wieder herausgezogen. Danach erfolgte das Einführen der Wärmeleitcreme mit einer Apothekenspritze (Abb. 6.6) und das Wiedereinsetzen der Vollraumsonde (Abb. 6.7) in die Thermosandmischung. Anschließend wurde die Probe in den Thermoschrank gestellt und das Messprogramm gestartet. Auch hier dauerte die Messung mindestens 1 Stunde.



Abbildung 6.6: Einbringen der Wärmeleitcreme



Abbildung 6.7: Vollraumsonde

Bei den Untersuchungen an den Thermosandproben kamen, wie bereits erwähnt, beide Sonden zur Anwendung. Dabei lieferten die zwei Verfahren vergleichbare Ergebnisse. Für Proben dieser Art ist die Vollraumsonde zu bevorzugen, weil beim Verfahren mit der Halbraumsonde der für den Kontakt erforderliche Anpressdruck für junge Thermosandmischungen mit geringer Druckfestigkeit zu groß sein kann.

### 6.4 Auswertung der Messungen

Nach Beendigung der Messungen berechnet die beigelegte Software den Wärmeleitfähigkeitsbeiwert. Um eine Aussage über die Qualität der Messung und somit die Richtigkeit des Beiwertes treffen zu können, ist es notwendig, die Ergebnisse durch ein graphisches Auswerteprogramm zu evaluieren. Die dabei aufgezogenen Diagramme geben Aufschluss über die wichtigsten Qualitätsparameter und werden in den nachfolgenden Unterpunkten erklärt.

#### 6.4.1 Das $\lambda$ -Diagramm

Das  $\lambda$ -Diagramm oder Thermal Conductivity (TC) -Diagramm in Abb. 6.8 stellt beispielhaft die aus den Einzelmessungen einer Probe gewonnenen Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte  $\lambda$  gegenüber und kennzeichnet deren Mittelwert mit Hilfe einer roten Linie. Die Ordinate links zeigt die Skala für die  $\lambda$ -Werte und die Ordinate rechts die Skala mit den prozentuellen Abweichungen vom Mittelwert. Befindet sich diese Abweichung im Bereich von  $\pm 5\%$ , so liegen die Einzelmessungen im tolerierbaren Bereich. Eine größere Abweichung dient als Hinweis auf einen Fehler in der Messung (Pagitsch, 2009).

Die  $\lambda$ -Messungen bei der vorliegenden Masterarbeit wurden mit diesem Diagrammtyp dargestellt.

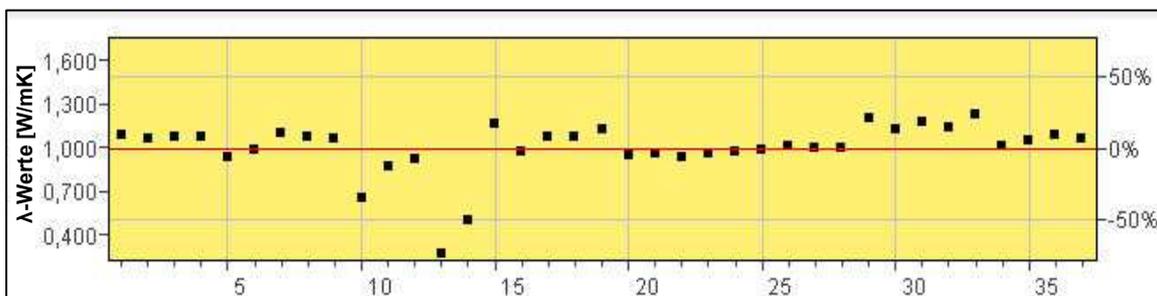


Abbildung 6.8:  $\lambda$ - Diagramm (Teka, 2007)

### 6.4.2 Das $\lambda$ -Diagramm als Normalverteilung nach Gauß

Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung der  $\lambda$ -Werte ist die Normalverteilung nach Gauß (Abb. 6.9), welche Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreibt. Die Gaußverteilung beruht auf dem zentralen Grenzwertsatz, der besagt, dass eine Summe von  $n$  unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen im Grenzwert  $n \rightarrow \infty$  normalverteilt ist.

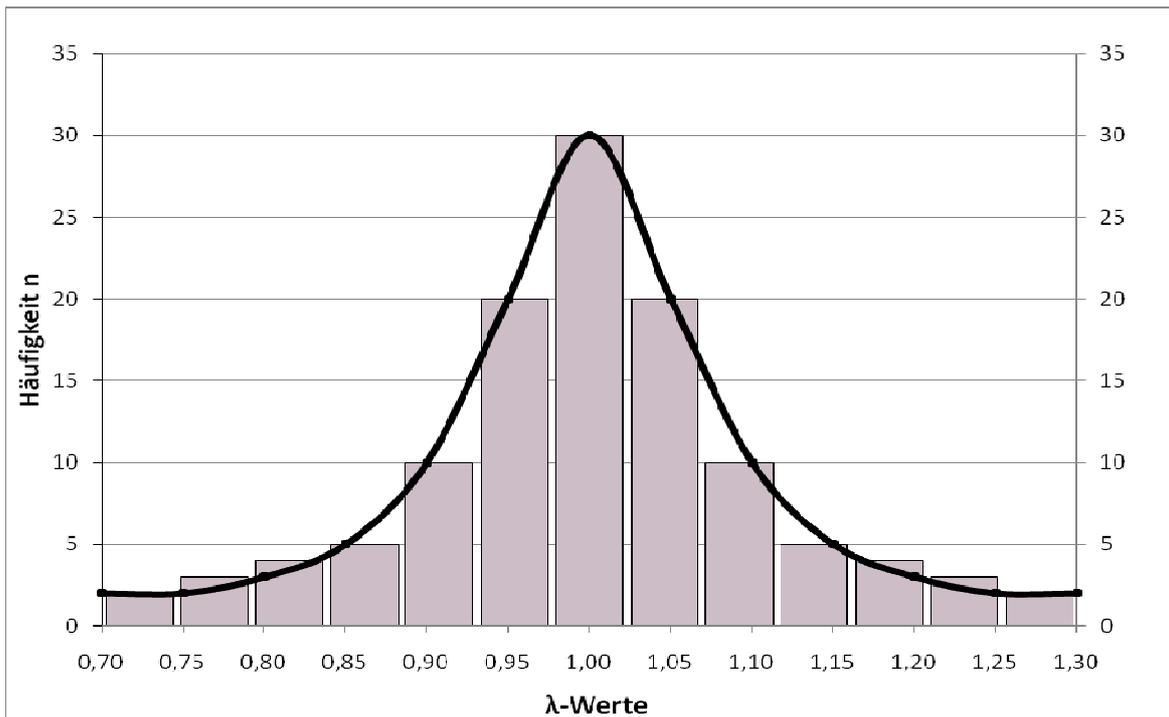


Abbildung 6.9:  $\lambda$ -Werte in einer Normalverteilung nach Gauß

Für ein repräsentatives Ergebnis einer Gaußverteilung werden mehr  $\lambda$ -Werte als in der vorliegenden Untersuchung benötigt. Bei den Messungen der Probenreihen 9, 12 und 17 wurden 4 bis 5 verschiedene  $\lambda$ -Werte ermittelt. Aus diesem Grund ist die Ergebnisdarstellung der Abbildung 6.8 zu bevorzugen.

### 6.4.3 Ergebnisse der $\lambda$ -Messungen bei den Probenreihen 9,12 und 17

Die  $\lambda$ -Werte der Probenreihe 9 mit einem mittleren Wassergehalt von 21,9 % ergaben 1,038 (Abb. 6.10), 1,059 (Abb. 6.11) und 1,078 W/mK (Anlage 19). Bei der Probenreihe 12 wurden die größten Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte mit 1,168 (Abb. 6.12) und 1,112 W/mK (Abb. 6.13) gemessen (Anlage 20). Bei dieser Mischung wurde Zement als Binder verwendet.

Die Probenreihe 17 hat bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung nach 28 Tagen die niedrigsten  $\lambda$ -Werte mit 0,992 (Abb. 6.14), 0,946 (Abb. 6.15) und 1,05 W/mK erzielt (siehe auch Kapitel 7.3.5 und Anlage 21).

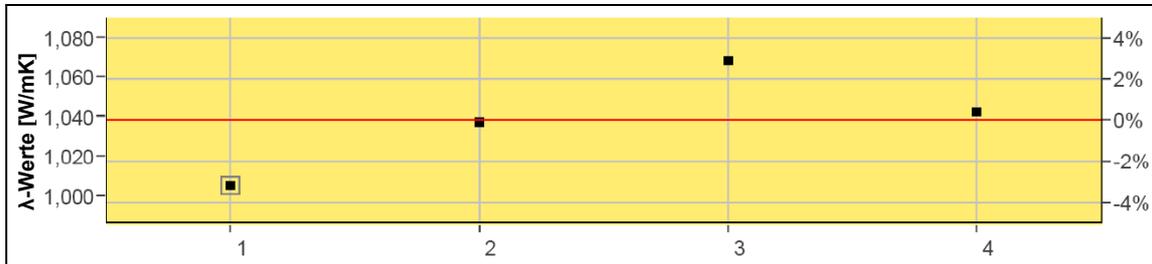


Abbildung 6.10:  $\lambda$  -Diagramme der Probe 9/6-3

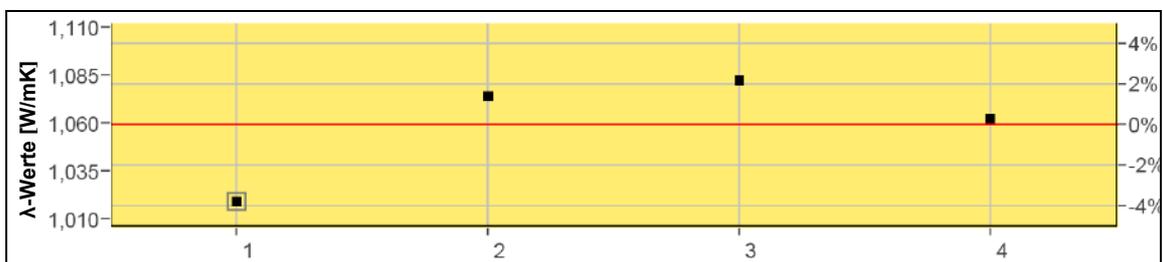


Abbildung 6.11:  $\lambda$  -Diagramme der Probe 9/6-5

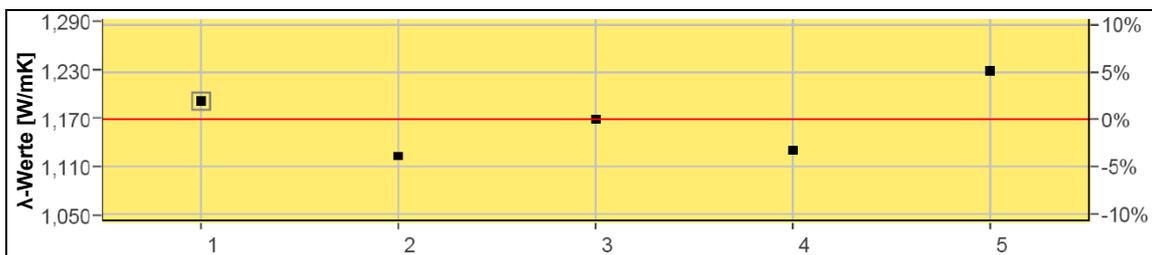


Abbildung 6.12:  $\lambda$ -Diagramm der Probe 12/3-3

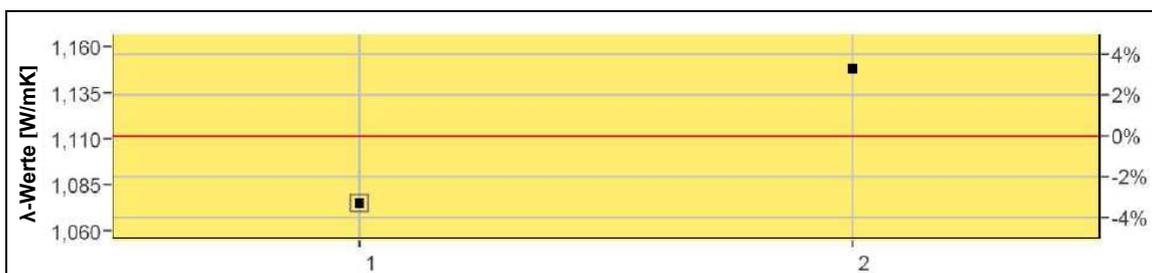


Abbildung 6.13:  $\lambda$ -Diagramme der Probe 12/3-5

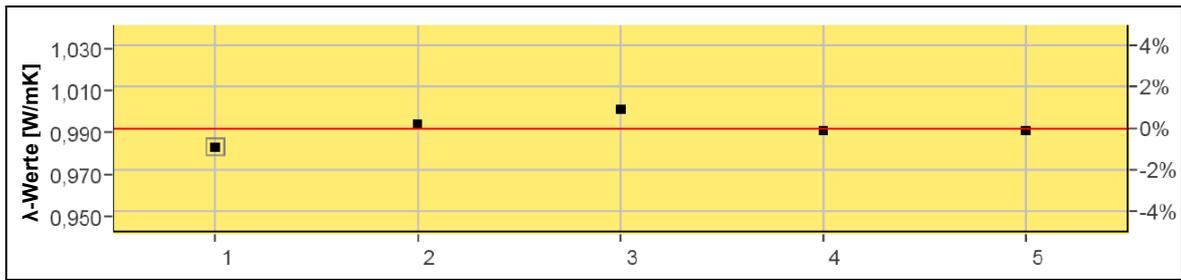


Abbildung 6.14: λ-Diagramme der Probe 17/3-3

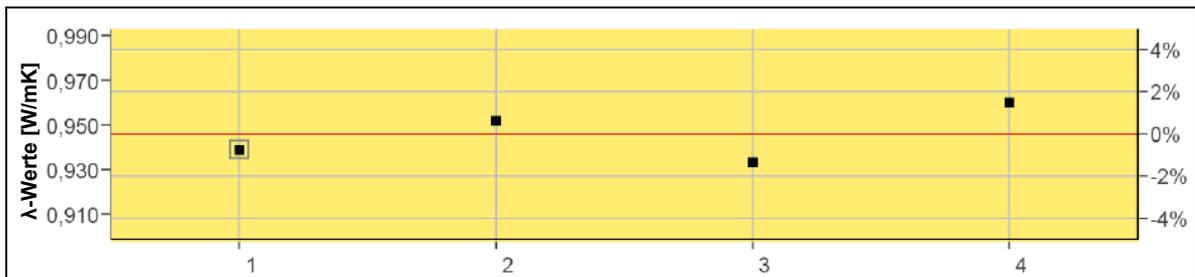


Abbildung 6.15: λ-Diagramme der Probe 17/3-5

## 6.4.4 Zusammenhang zwischen Wassergehalt und λ-Werten

In der Abbildung 6.16 wird der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt  $w$  und den jeweiligen  $\lambda$ -Werten grafisch dargestellt.

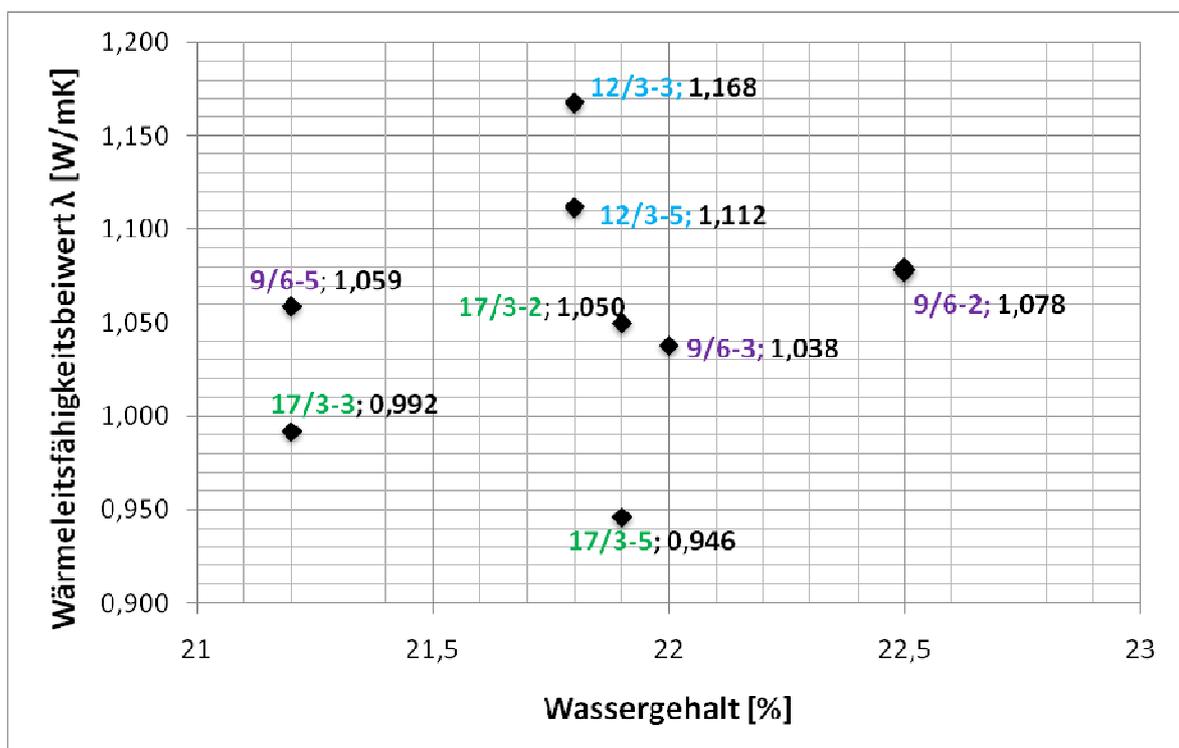


Abbildung 6.16: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und λ-Werten

## 7 Auswertung

### 7.1 Vorgehensweise zur Festlegung der empfohlenen Mischung

Um die optimale Mischung zu finden, wurde ein Entscheidungskriterium festgelegt. Die Durchführung erfolgte ähnlich eines Verfahrens der negativen Auslese (Abb. 7.1). Insgesamt wurden 18 Mischungen angefertigt. Das 1. Kriterium war die Anforderung an die Fließfähigkeit, welche mit dem Ausbreitmaß beschrieben wird. Diese Hürde schafften

7 Mischungen (7, 9, 11, 12, 16, 17 und 18), die eine Konsistenzklasse von F59 (Tab.4.3 bis 4.5) aufwiesen.

Das 2. Kriterium war das Absetzverhalten der fließfähigen Thermosandmischungen. Diese Anforderung von maximal 2 % Absetzung in 24 Stunden erfüllten insgesamt 4 Probenreihen (9, 12, 17 und 18), die somit das nächste Kriterium erreichten (Tab. 4.6 bis 4.8.) In diesem wurde die einaxiale Druckfestigkeit (Tab. 4.9) der Thermosandmischungen nach 28 Tagen bestimmt. Die Proben mussten nach 28 Tagen eine minimale einaxiale Druckfestigkeit von 5 N/mm<sup>2</sup> (Begehrbarkeit) und eine maximale von 60 N/mm<sup>2</sup> (siehe 3.1) aufweisen. Zudem sollte eine einaxiale Druckfestigkeit von 1 N/mm<sup>2</sup> nach 3 Tagen gegeben sein. Diese Anforderungen erfüllten die Probenreihen 9 (Anlagen 1 bis 3), 12 (Anlagen 4 bis 6) und 17 (siehe 7.3). Bei der Mischung 12 wurde im Gegensatz zu den Mischungen 9 und 17 Bindemittel in Form von Zement verwendet (Tab. 4.2).

Beim letzten Kriterium wurde der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  ermittelt. Dabei schnitt die Probenreihe 17 (siehe 7.3.5) besser ab als die Probenreihen 9 und 12 (Anlagen 19 und 24).

In der durchgeführten Laborversuchsreihe hat sich schlussendlich die Thermosandmischung 17 (Ergebnisse siehe 7.3) durchgesetzt. Diese hat alle Anforderungen hinsichtlich Ausbreit- und Absetzmaß, sowie der einaxialen Druckfestigkeit nach ONR FW 110A (1999) und ONR 23131 (2005), erfüllt. Zudem erzielte die Mischung 17 den niedrigsten und zugleich besten  $\lambda$ -Wert. Aufgrund dieser Ergebnisse wird sie als stabilisiertes Verfüllmaterial empfohlen.

In Bezug auf den Wassergehalt und die einaxiale Druckfestigkeit entsprechen die Versuchsergebnisse der Mischung 17 jenen Feldproben, die in der Fischhofgasse im Abschnitt 2 (Tabelle 5.5) entnommen wurden. Abschnitt 1 (Tab. 5.4) der Fisch-

hofgasse hatte zu niedrige, die Abschnitte 3 (Tab. 5.6) und 4 (Tab. 5.7) zu hohe einaxiale Druckfestigkeiten. Die Entnahme der Stechzylinder wurde dadurch schwierig. Weiters waren auch die Wassergehalte der Abschnitte 3 und 4 mit circa 37 % zu hoch; da bei den im Labor durchgeführten Absetzversuchen (siehe Tab. 4.2 und 4.6 bis 4.8) Mischungen mit einem Wassergehalt > 28 % das geforderte Absetzmaß überschritten.

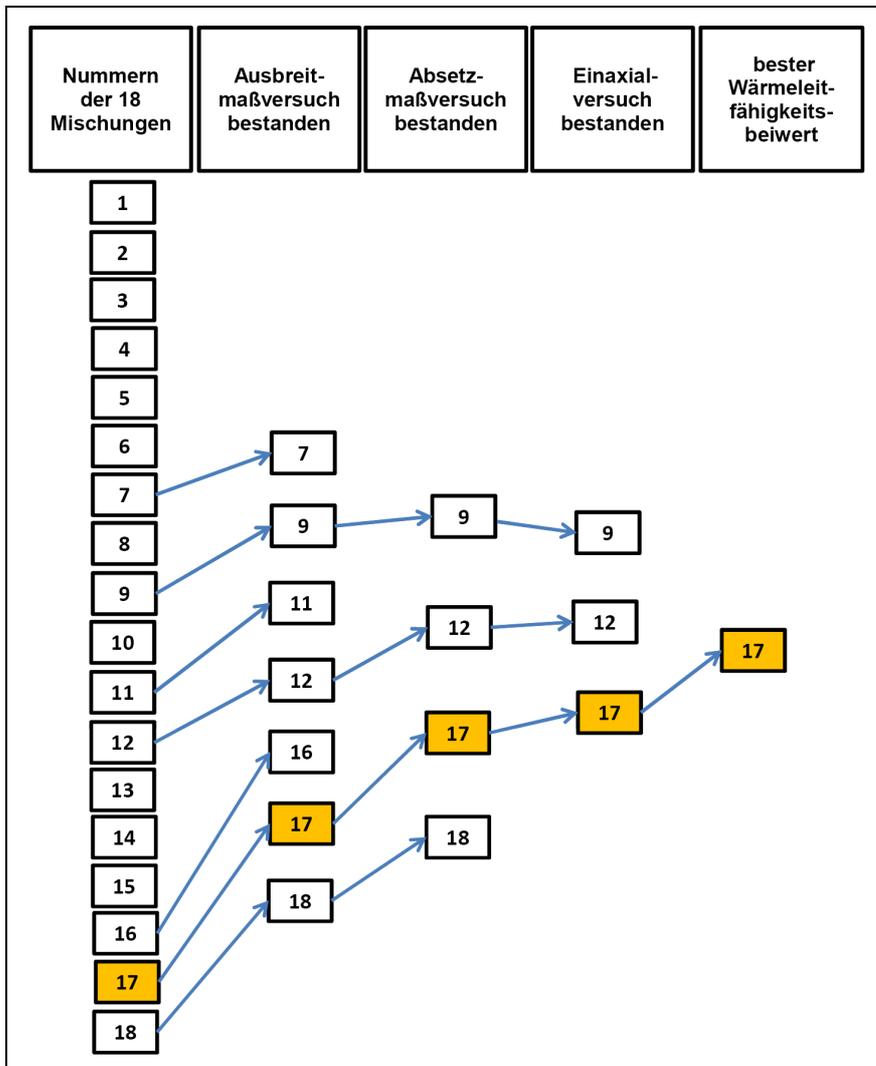


Abbildung 7.1: Verfahren der negativen Auslese der Thermosandmischungen

## 7.2 Eigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit der 3 besten Mischungen

Zur besseren Übersicht werden nachfolgend von den 3 besten Mischungen (9,12 und 17) jeweils der Verlauf der ersten 28 Tage der mittleren einaxialen Druckfes-

tigkeit sowie der Verlauf des durchschnittlichen Wassergehaltes graphisch dargestellt (siehe Abb. 7.2 bis 7.7).

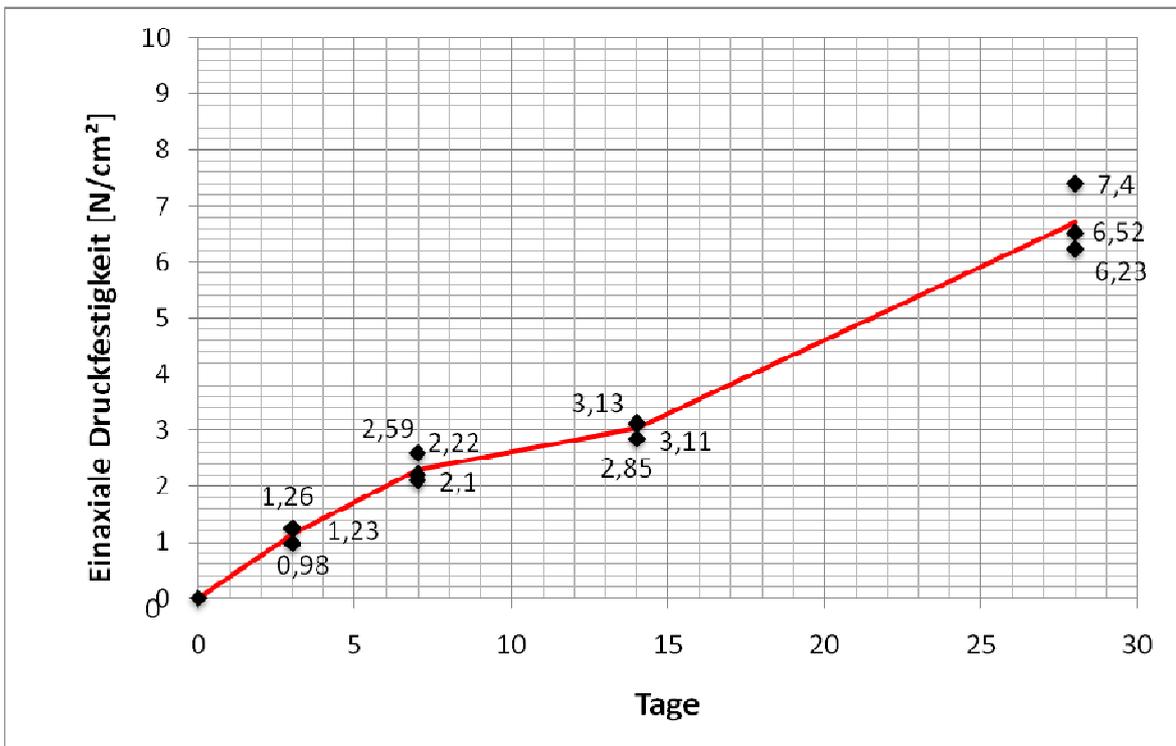


Abbildung 7.2: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 17

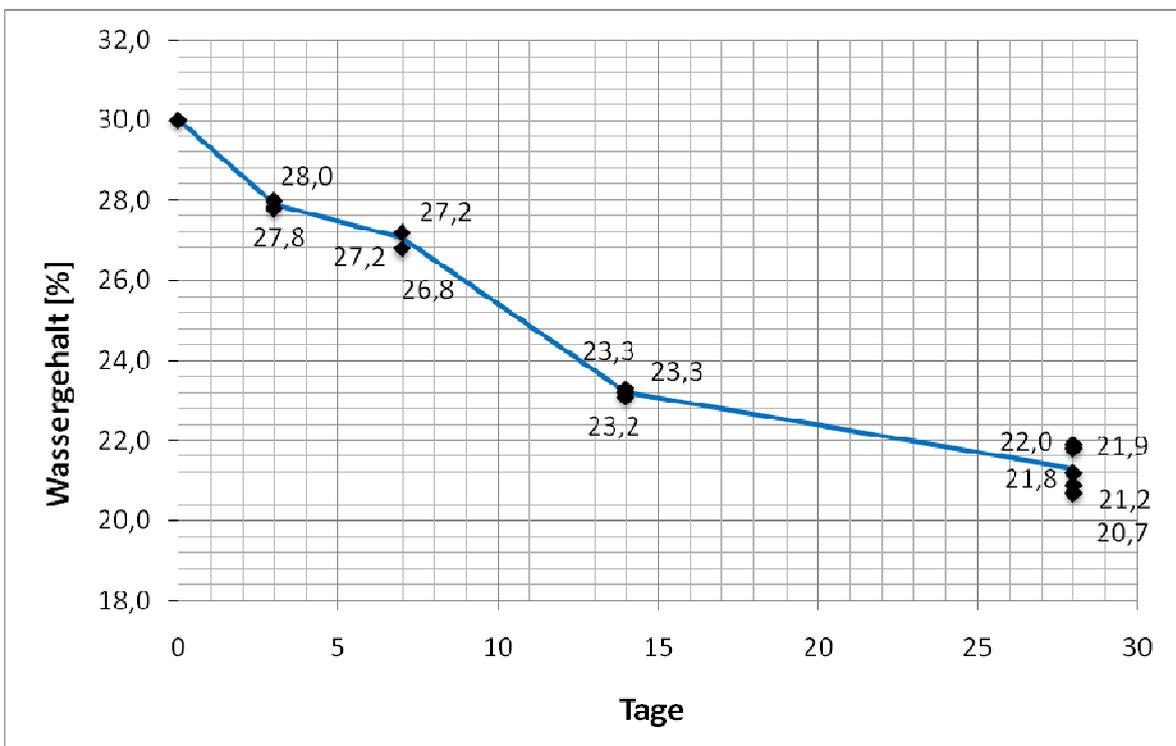


Abbildung 7.3: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 17

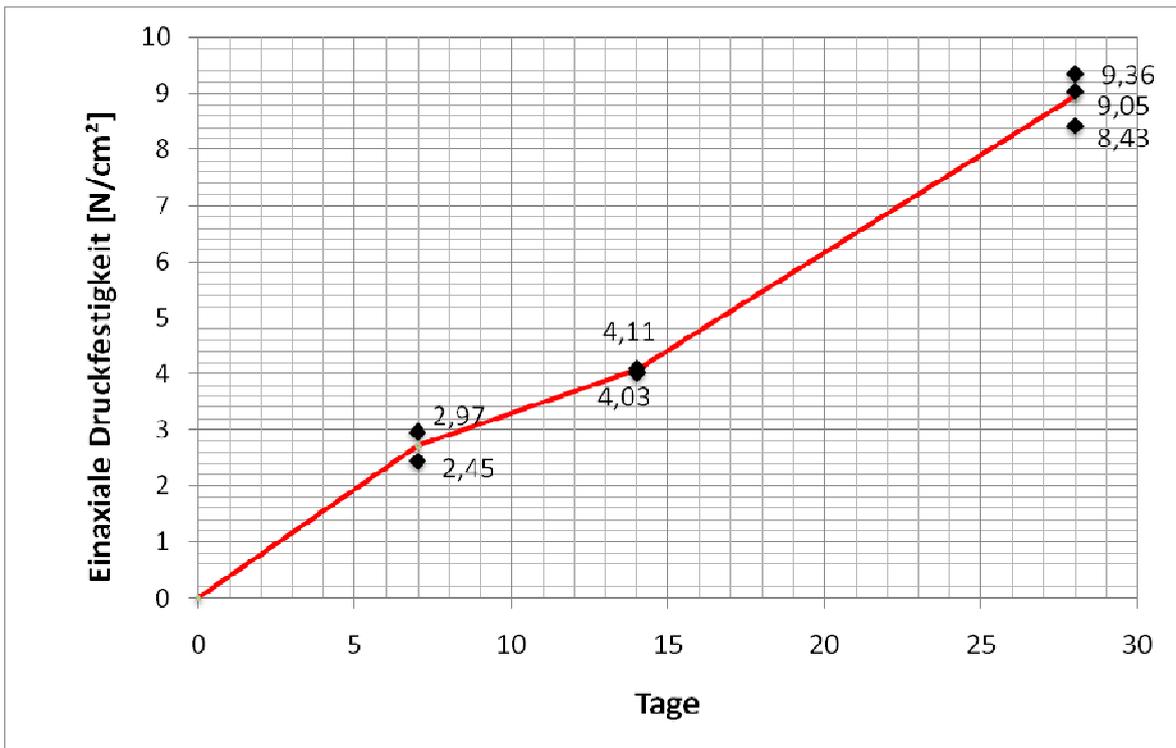


Abbildung 7.4: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 12

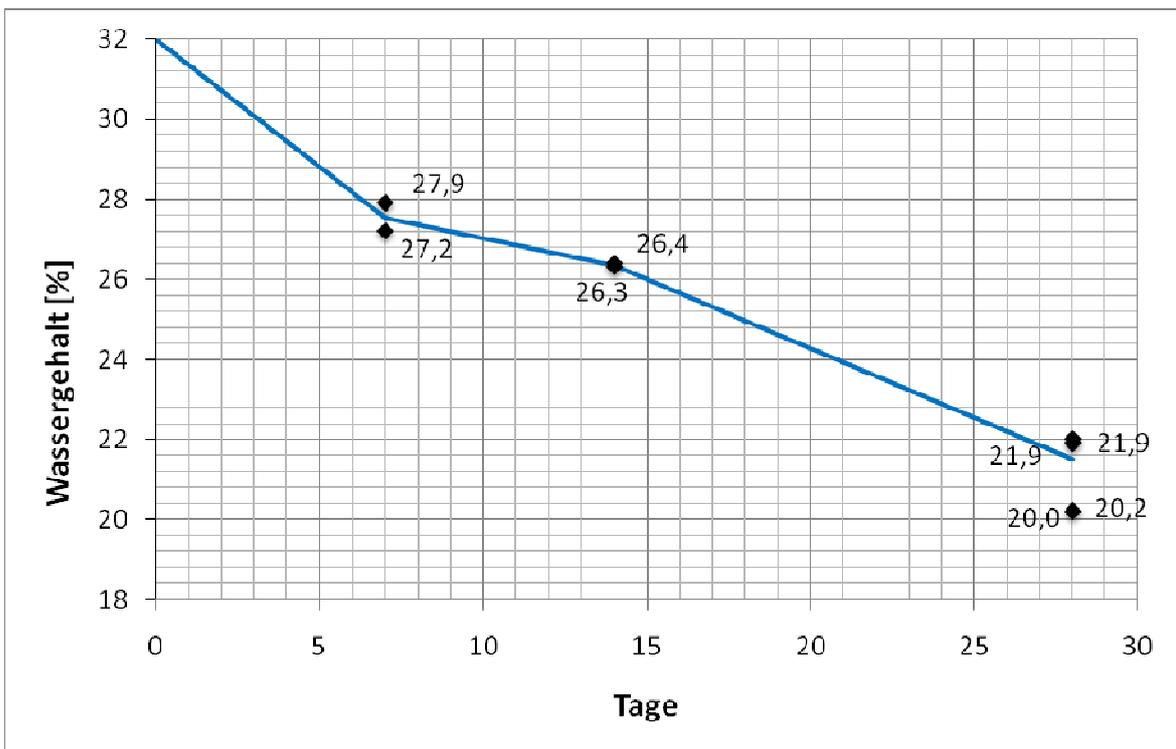


Abbildung 7.5: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 12

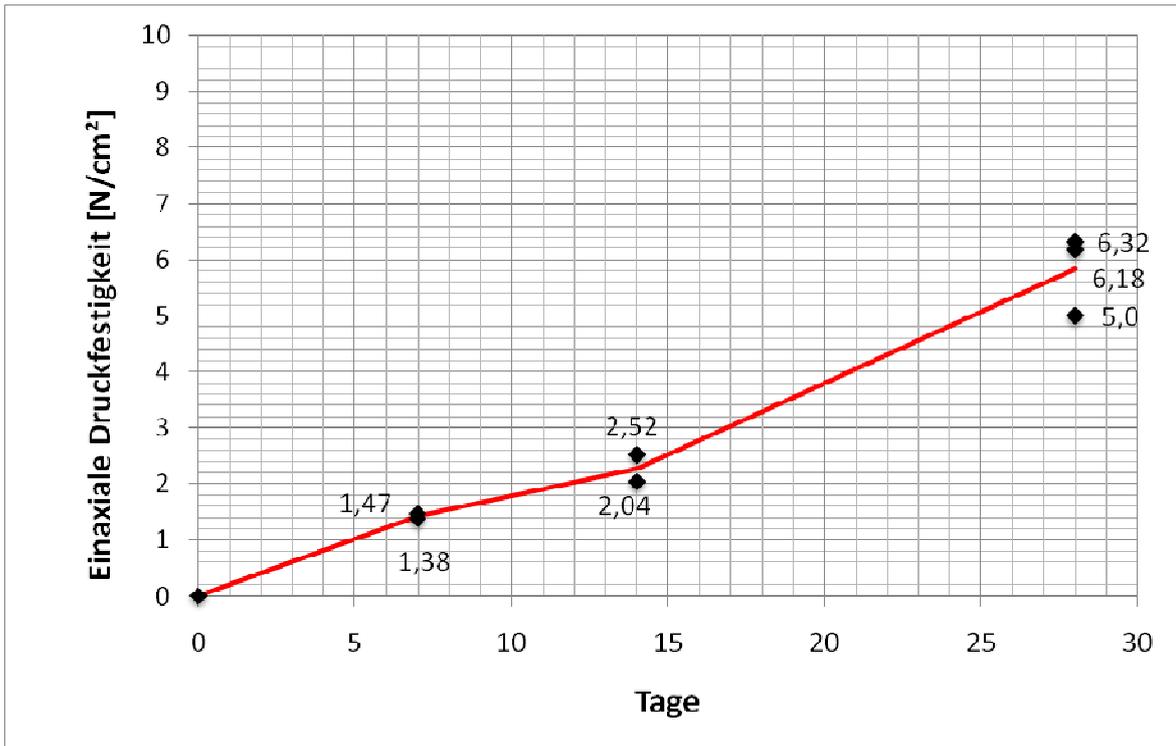


Abbildung 7.6: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 9

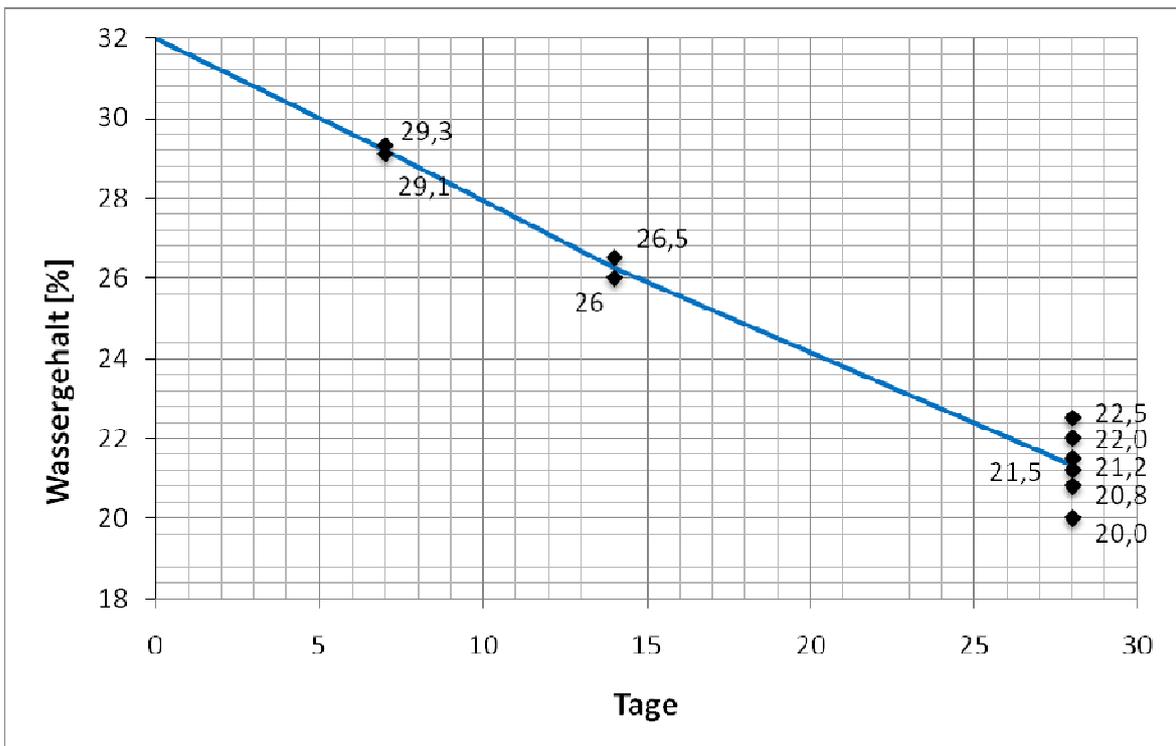


Abbildung 7.7: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 9

Bei den Verläufen der einaxialen Druckfestigkeiten der Mischungen 9, 12, und 17 ist zu beobachten, dass nach 14 Tagen die Festigkeiten überproportional zuneh-

men. Dies ist mit den latent hydraulischen Eigenschaften des Thermoandes (Freiwerden von Kalken) erklärbar. Die Mischung 12, bei der 0,5 % Zement beigemischt wurde, erzielt nach 28 Tagen mit durchschnittlichen 8,9 N/cm<sup>2</sup> erwartungsgemäß die höchsten Druckfestigkeiten. Die Mischungen 9 und 17 haben mittlere Druckfestigkeiten von 5,8 und 6,4 N/cm<sup>2</sup>. Alle 3 Probenreihen erfüllen nach der Abminderung der Werte von 10 % (Korrekturfaktor aus Kapitel 3.1.3.2) mit den durchschnittlichen einaxialen Druckfestigkeiten von 5,2 N/cm<sup>2</sup> (Mischung 9), 8,0 N/cm<sup>2</sup> (Mischung 12) und 5,8 N/cm<sup>2</sup> (Mischung 17) jeweils die Anforderungen von mindestens 5 N/cm<sup>2</sup>. Die Wassergehalte aller 3 Probenreihen nehmen mit der Zeit gleichmäßig ab und betragen nach 28 Tagen bei jeder Mischung zwischen 20 und 22,5 Gewichts-%.

### 7.3 Ergebnisse der Probenreihe 17

In der Tabelle 7.1 werden die Ausbreit- und Absetzmaßeergebnisse der Probenreihe 17 dargestellt.

Ausbreitmaßversuch			Mischungsnummer 17	
Probennummer	Datum	Durchmesser	mittlerer Durch.	Klasse
<b>17/1</b>	05.08.2009	d1=565 mm d2=570 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>17/2</b>	05.08.2009	d1=565 mm d2=575 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
<b>17/3</b>	12.08.2009	d1=555 mm d2=560 mm	d= 560 mm	<b>F59</b>
<b>17/4</b>	09.09.2009	d1=565 mm d2=570 mm	d=570 mm	<b>F59</b>
Absetzmaßversuch			Mischungsnummer 17	
Probennummer	Herstelldatum	Zeitraum	Absetzung in mm	Absetzung in %
<b>17/1</b>	05.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,3</b>
<b>17/2</b>	05.08.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	5,5	<b>1,6</b>
<b>17/3</b>	12.08.2009	nach 24 Stunden	4,0	<b>1,2</b>
		nach 28 Tagen	4,5	<b>1,3</b>
<b>17/4</b>	09.09.2009	nach 24 Stunden	5,0	<b>1,5</b>
		nach 28 Tagen	5,5	<b>1,6</b>

Tabelle 7.1: Ausbreit- und Absetzmaßeergebnisse der Probenreihe 17

In der Tabelle 7.2 sind alle ermittelten Ergebnisse der Probenreihe 17, insbesondere der Wassergehalt und die einaxiale Druckfestigkeit (ohne Abminderung von 10 % gemäß Kapitel 3.1.3.2), nach 3 und 7 Tagen zusammengefasst. Die Tabelle 7.3 stellt die Ergebnisse nach 14 und 28 Tagen dar.

Probenbezeichnung			17/3-1	17/2-4	17/4-1	17/3-4	17/4-3	17/4-4
<b>Probenalter</b>			<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
Durchmesser	D <sub>0</sub>	cm	10,0	10,0	10	10	10	10
Höhe	h <sub>0</sub>	cm	10,3	11,0	12	11,0	13,2	13,4
Masse	W <sub>0</sub>	g	1442,8	1529	1687,2	1534	1847,8	1861,4
Volumen	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	809,0	863,9	942,48	863,9	1036,7	1052,4
Dichte	ρ	g/cm <sup>3</sup>	1,78	1,77	1,79	1,78	1,78	1,77
Kraft	F <sub>max</sub>	N	91	85	102	209	210	178
<b>Spannung</b>	<b>σ</b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,23</b>	<b>0,98</b>	<b>1,26</b>	<b>2,10</b>	<b>2,59</b>	<b>2,22</b>
Änderung der Höhe	Δh	mm	5,0	6,78	5,3	4,1	5,0	4,2
Fläche	A <sub>max</sub>	cm <sup>2</sup>	82,26	82,90	81,83	81,57	81,46	81,02
<b>Wassergehalt</b>	<b>w</b>	<b>%</b>	<b>28,0</b>	<b>27,8</b>	<b>27,9</b>	<b>27,2</b>	<b>27,2</b>	<b>26,8</b>
Trockendichte	ρ <sub>d</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,39	1,39	1,40	1,40	1,40	1,39

Tabelle 7.2: Laborergebnisse der Probe 17 nach 3 und 7 Tagen

Probenbezeichnung			17/2-3	17/4-2	17/1-4	17/1-2	17/2-1	17/1-1
<b>Probenalter</b>			<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>28</b>
Durchmesser	D <sub>0</sub>	cm	10,0	10,0	10	10	10	10
Höhe	h <sub>0</sub>	cm	13,5	13,8	13,6	13,5	13,5	13,6
Masse	W <sub>0</sub>	g	1801,5	1847,8	1831,8	1806,5	1806,1	1811,8
Volumen	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	1060,3	1083,9	1068,0	1060,3	1060,3	1068,0
Dichte	ρ	g/cm <sup>3</sup>	1,70	1,71	1,71	1,70	1,70	1,69
Kraft	F <sub>max</sub>	N	242	258	250	507	602	528
<b>Spannung</b>	<b>σ</b>	<b>N/cm<sup>2</sup></b>	<b>2,85</b>	<b>3,13</b>	<b>3,11</b>	<b>6,23</b>	<b>7,40</b>	<b>6,52</b>
Änderung der Höhe	Δh	mm	6,8	6,82	4,8	6,5	4,8	7,5
Fläche	A <sub>max</sub>	cm <sup>2</sup>	81,77	82,59	81,80	82,71	81,36	83,27
<b>Wassergehalt</b>	<b>w</b>	<b>%</b>	<b>23,2</b>	<b>23,1</b>	<b>23,3</b>	<b>20,7</b>	<b>20,9</b>	<b>21,8</b>
Trockendichte	ρ <sub>d</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1,38	1,39	1,39	1,41	1,41	1,39

Tabelle 7.3: Laborergebnisse der Probe 17 nach 14 und 28 Tagen

In den nachfolgenden Kapiteln 7.3.1 bis 7.3.4 werden die einaxialen Druckfestigkeiten der Probenreihe 17 jeweils nach 3, 7, 14 und 28 Tagen graphisch dargestellt. An jedem Prüftag wurden 3 Einaxialversuche durchgeführt. Die dazugehörigen Wassergehalte dieser Proben sind in der Anlage 16 ersichtlich.

### 7.3.1 Einaxiale Druckfestigkeit nach 3 Tagen

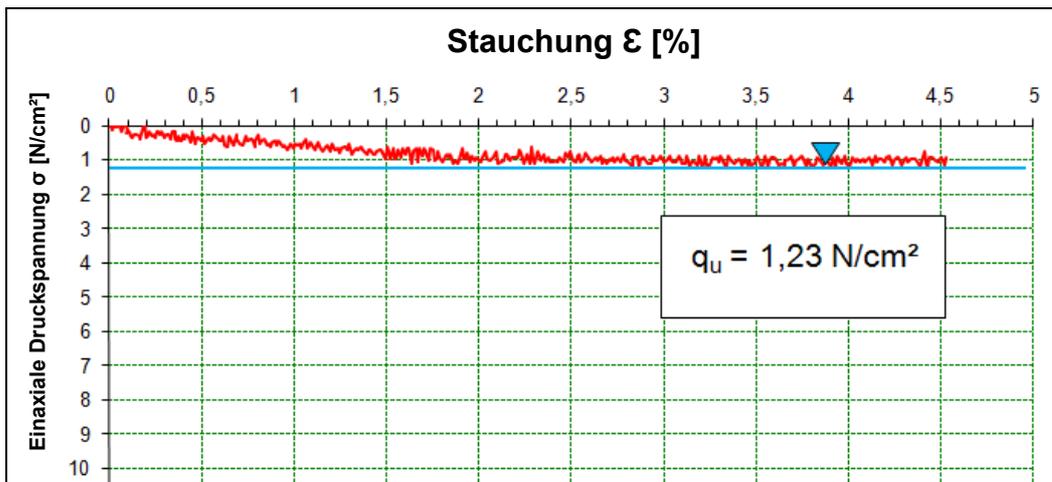


Abbildung 7.8: Einaxialversuch Probe 17/3-1

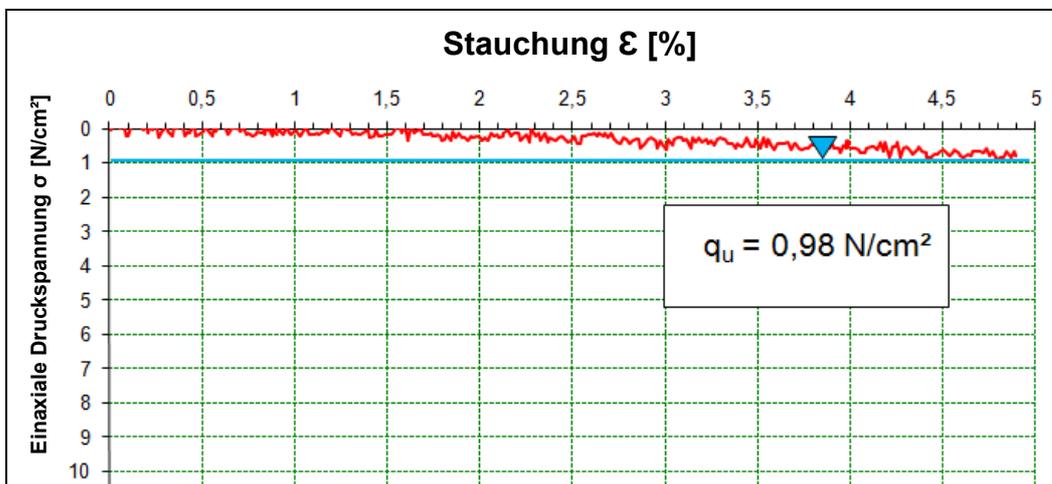


Abbildung 7.9: Einaxialversuch Probe 17/2-4

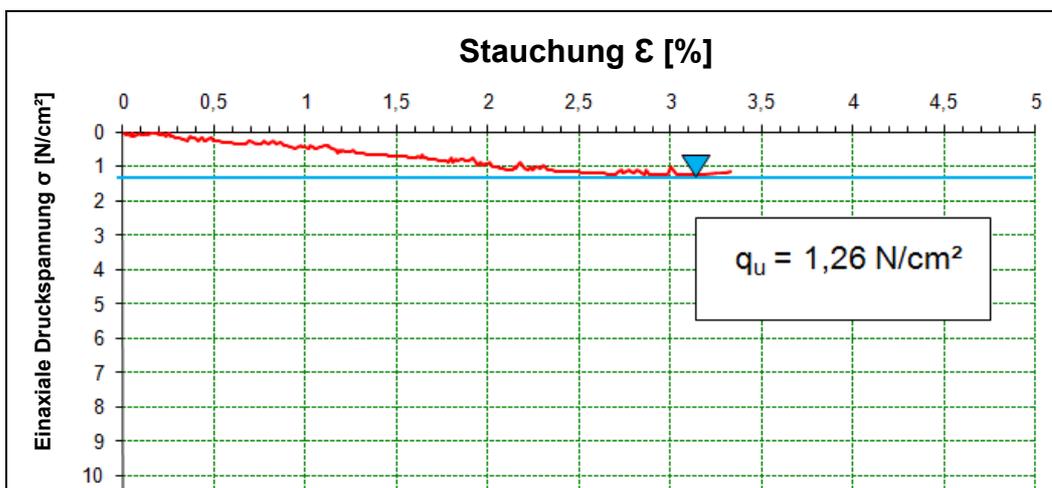


Abbildung 7.10: Einaxialversuch Probe 17/4-1

### 7.3.2 Einaxiale Druckfestigkeit nach 7 Tagen

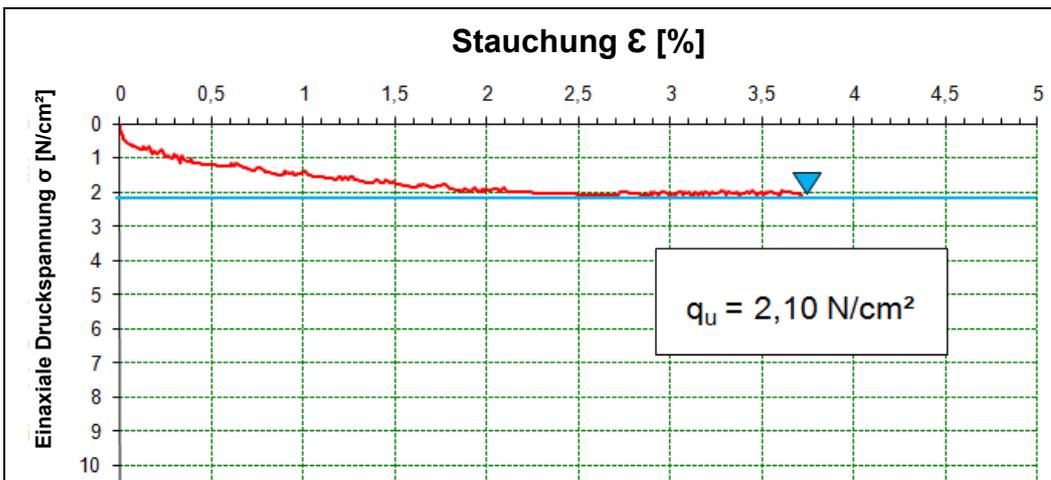


Abbildung 7.11: Einaxialversuch Probe 17/3-4

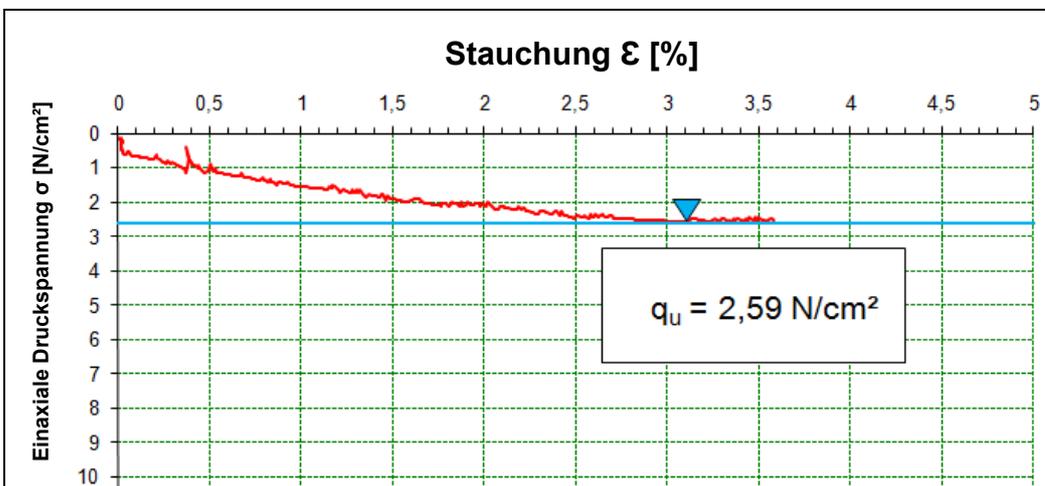


Abbildung 7.12: Einaxialversuch Probe 17/4-3

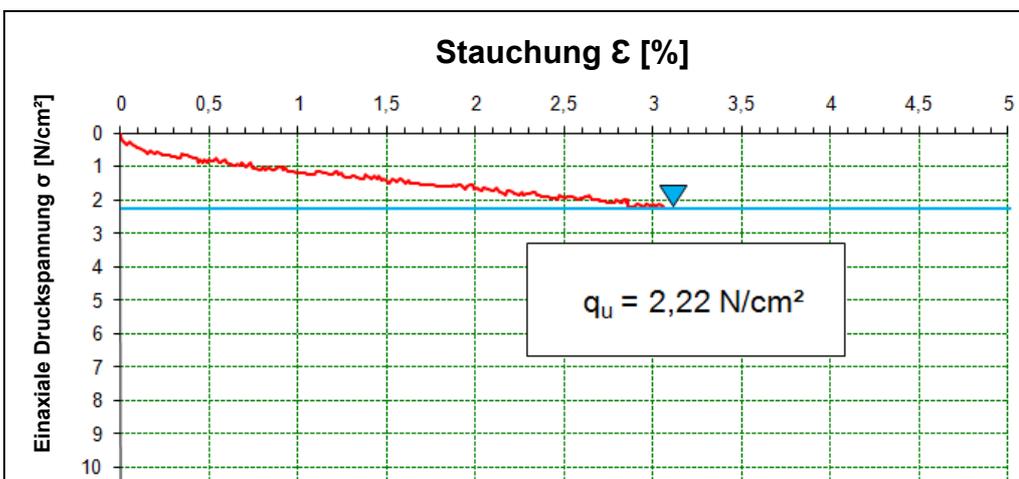


Abbildung 7.13: Einaxialversuch Probe 17/4-4

7.3.3 Einaxiale Druckfestigkeit nach 14 Tagen

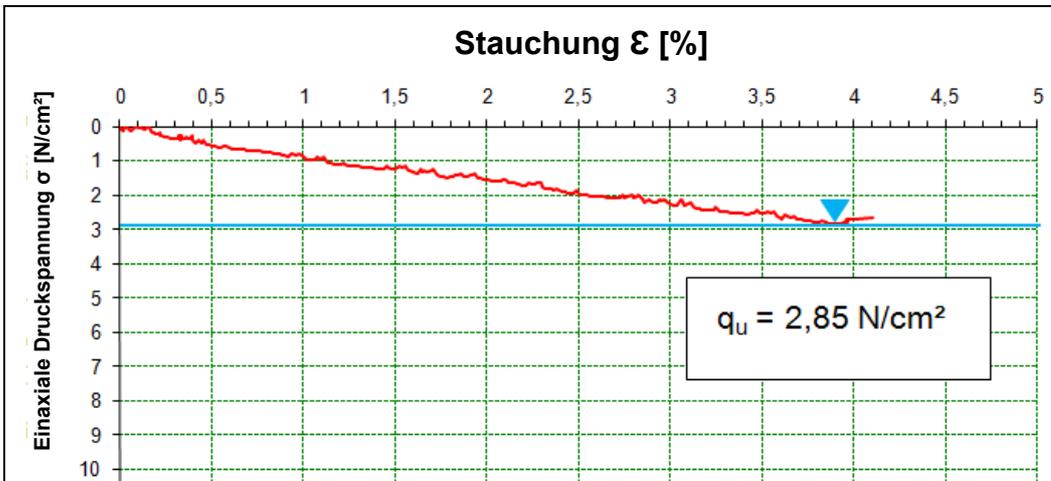


Abbildung 7.14: Einaxialversuch Probe 17/2-3

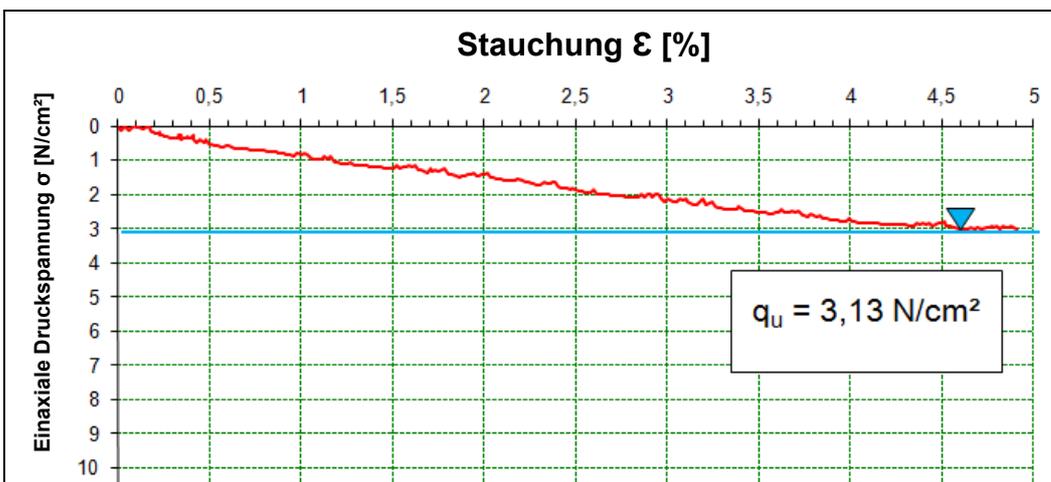


Abbildung 7.15: Einaxialversuch Probe 17/4-2

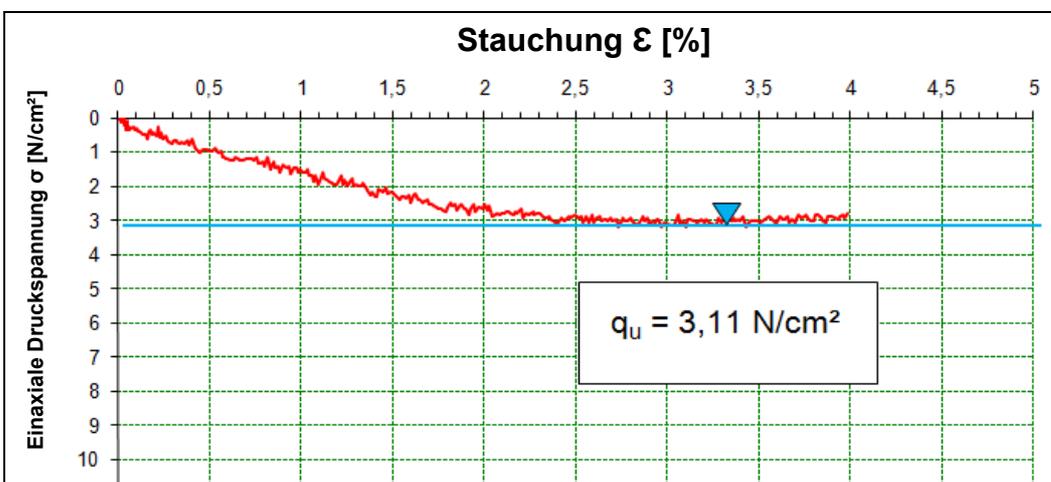


Abbildung 7.16: Einaxialversuch Probe 17/1-4

7.3.4 Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen

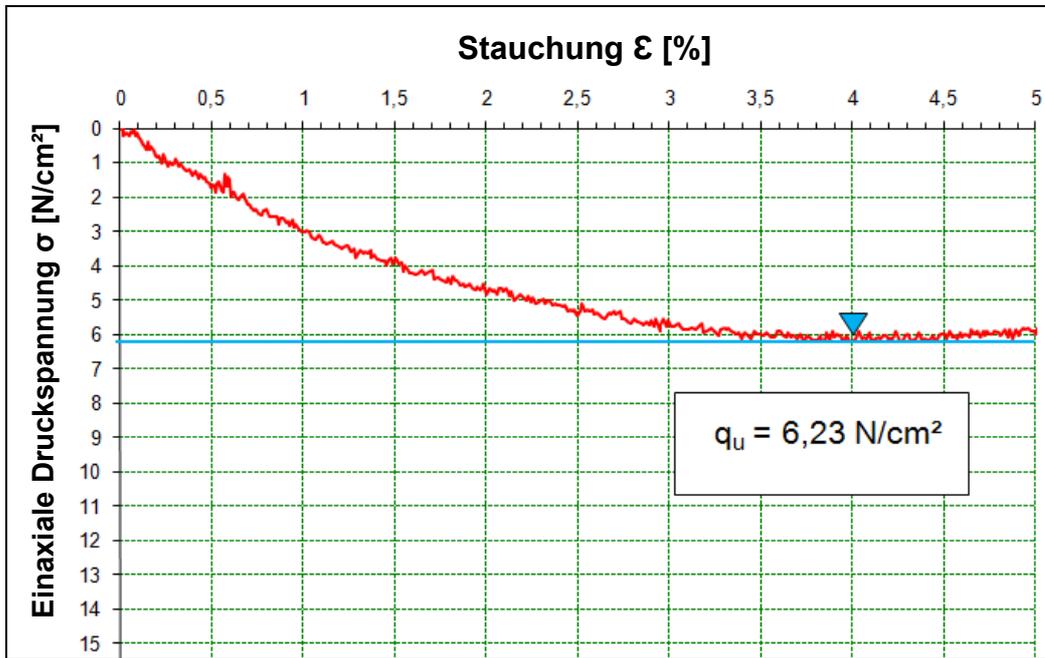


Abbildung 7.17: Einaxialversuch Probe 17/1-2

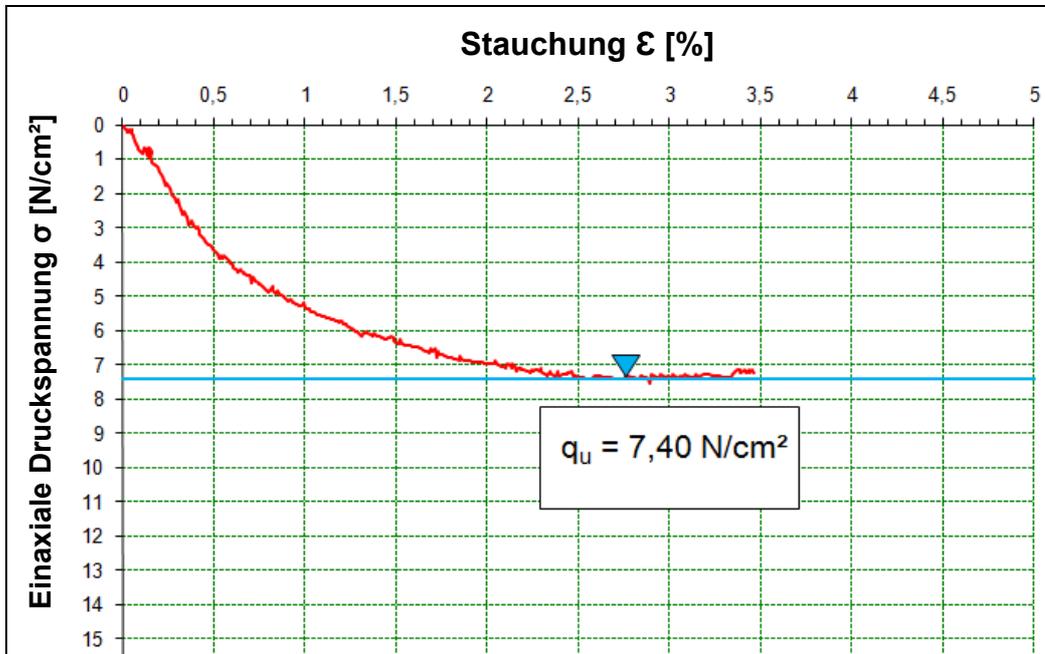


Abbildung 7.18: Einaxialversuch Probe 17/2-1

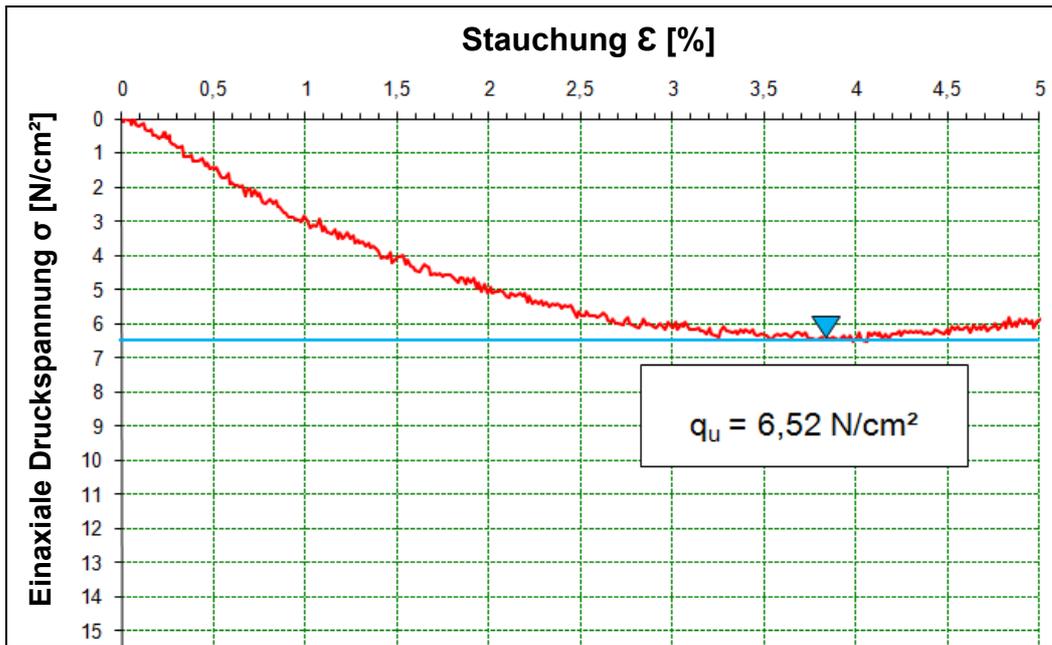
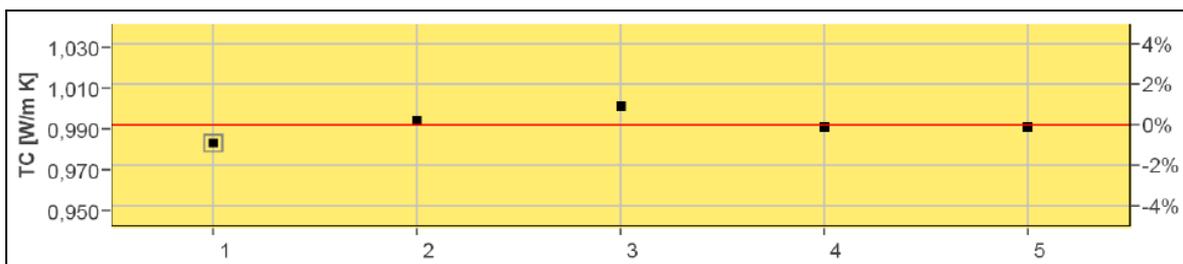


Abbildung 7.19: Einaxialversuch Probe 17/1-1

### 7.3.5 Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda$ der SVM-Probenreihe 17 nach 28 Tagen

Die Probenreihe 17 hat bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung nach 28 Tagen (siehe Kapitel 6.4) die niedrigsten  $\lambda$ -Werte erzielt. Bei der Mischung 17/3-3 (Abb. 7.20) wurde ein  $\lambda$ -Wert von 0,992  $\text{W/mK}$ , bei der Mischung 17/3-5 (Abb. 7.21) ein  $\lambda$ -Wert von 0,946  $\text{W/mK}$  und bei der Probe mit der Nummer 17/3-2 (Abb. 7.22) ein  $\lambda$ -Wert von 1,05  $\text{W/mK}$  ermittelt. Ein trockener Thermosand hat nach Herstellerangaben (Kekelit, 2006) einen  $\lambda$ -Wert von 0,177  $\text{W/mK}$ . Bei einem Wassergehalt der Proben (Anlage 18) von durchschnittlich 21,5 % und einer Trockendichte  $\rho_d$  von 1,40  $\text{g/cm}^3$  entsprechen diese Werte vorangegangenen Untersuchungen (Henögl et al, 2009).

Der  $\lambda$  –Wert der Probe 17/3-3 beträgt **0,992  $\text{W/mK}$**  bei einem Wassergehalt von  $w = 21,2 \%$ .

Abbildung 7.20:  $\lambda$ -Wert Probe 17/3-3

## Auswertung

---

Der  $\lambda$  –Wert der Probe 17/3-5 beträgt **0,946 W/mK** bei einem Wassergehalt von  $w = 21,9 \%$ .

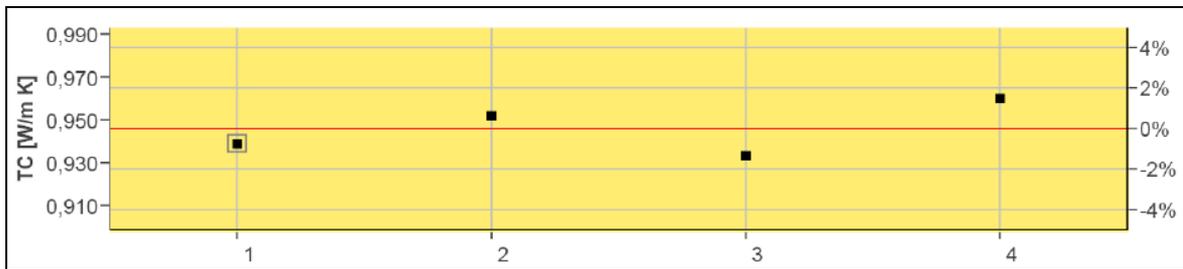


Abbildung 7.21:  $\lambda$ -Wert Probe 17/3-5

Der  $\lambda$  –Wert der Probe 17/3-2 beträgt **1,050 W/mK** bei einem Wassergehalt von  $w = 21,9 \%$ .

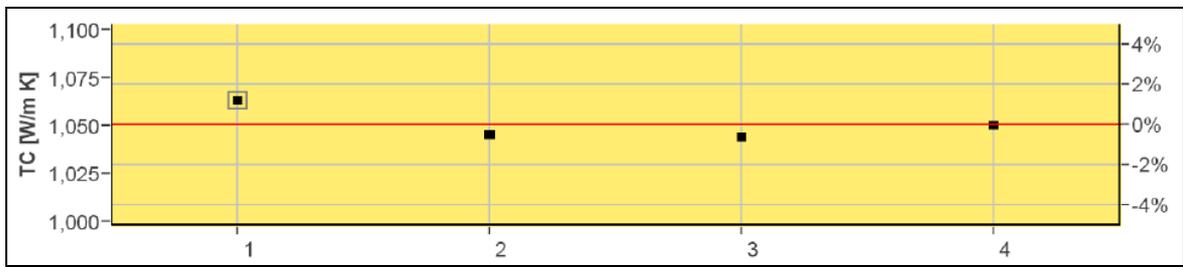


Abbildung 7.22:  $\lambda$ -Wert Probe 17/3-2

## 8 Kostenberechnung

In diesem Kapitel werden die Herstellungskosten für den Einbau von fließfähigem Thermosand im Stadtgebiet von Wien ermittelt.

Als Grundlagen für die Kalkulation des fließfähigen Thermosandes dienen:

- die ÖNORM B 2061(1999)
- die österreichische Baugeräteliste (ÖBGL,1996)
- das Formblatt K6E für die Ermittlung der Baugeräte und Betriebsstoffkosten
- das Formblatt K7 für die Preisermittlung

### 8.1 Kalkulation nach ÖNORM B 2061

Die ÖNORM B 2061 regelt das Verfahren der Preisermittlung von Bauleistungen gemäß der ÖNORM B 2110 (Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen, 2009) und der ÖNORM B 2117 (Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen an Verkehrswegen, 2002). Sie gibt Hinweise für die Darstellung und den Aufbau der Kalkulation. Diese Norm ist auch Grundlage für die Überprüfung der Angemessenheit der Preise. Folgend wird der Aufbau dieser Norm kurz beschrieben.

Die in der Baukalkulation vorkommenden Kostenarten samt den Kostengrundlagen sind in der ÖNORM B 2061 angeführt. Für die Ermittlung von Kosten ist eine Unterteilung der Kostenarten in Personal-, Material-, Geräte- und Fremdleistungskosten vorzunehmen. Weiters ist in dieser Norm beschrieben, wie die Kosten auf einzelne Kostenträger umgelegt werden können, und welche Kostenkomponenten es gibt. Diese sind die Mittellohnkosten, die Materialkosten und die Gerätekosten. Die Mittellohnkosten sind mit Hilfe des Formblattes K3, die Materialkosten mit dem Formblatt K4 und K5 zu berechnen. Für die Ermittlung der Gerätekosten sind die Formblätter K6 sowie K6E heranzuziehen. Zur eigentlichen Preisermittlung werden dann im K7-Blatt (Abb.8.1) die ermittelten Kosten aus den oben aufgezählten Formblättern K3 bis K6 angesetzt.

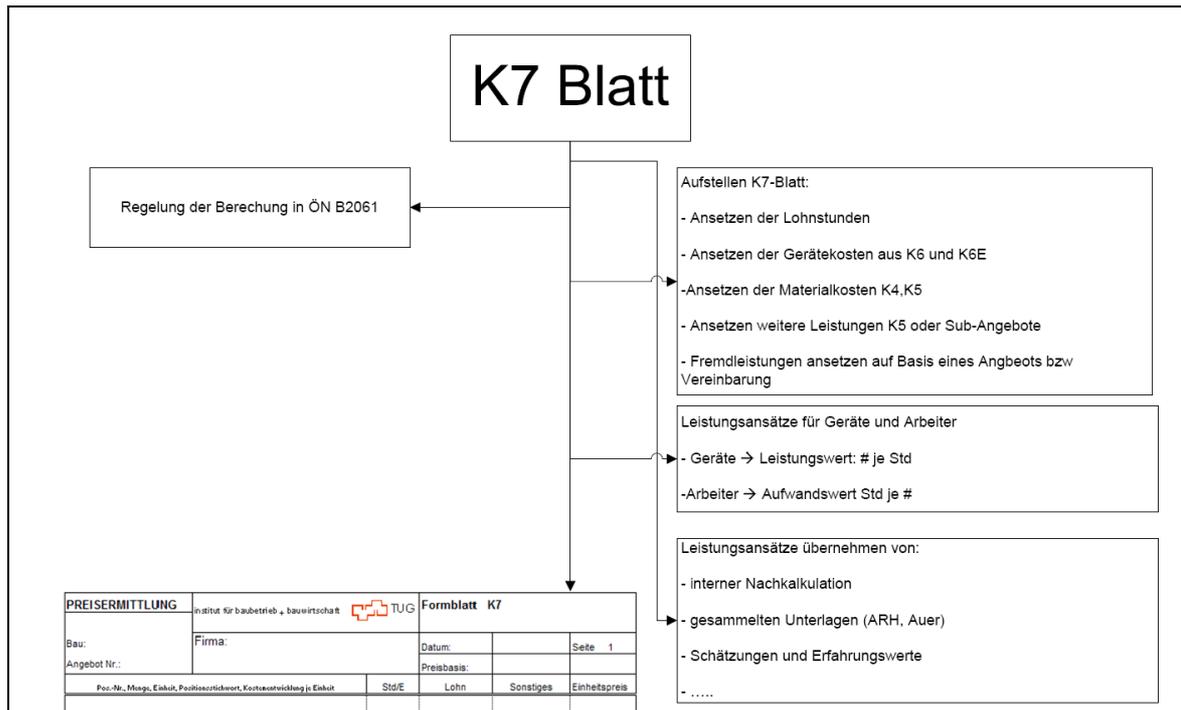


Abbildung 8.1: Aufbau des Formblattes K7, Institut für Baubetrieb u. Bauwirtschaft, TU Graz, 2009

### 8.1.1 Österreichische Baugeräteliste

In der österreichischen Baugeräteliste (ÖBGL) sind alle erforderlichen und üblichen Baumaschinen, sowie gängige Baustellenausstattungen angeführt. Die einzelnen Positionen in der ÖBGL umfassen die technischen und wirtschaftlichen Durchschnittswerte des jeweiligen Gerätes. Die durchschnittlichen Anschaffungskosten der Geräte sind für das Jahr 2009 mit einem Faktor von 1,313 (Großhandelspreisindex für Baumaschinen 2008) zu multiplizieren, da die angegebenen Kosten in der aktuellen ÖBGL aus dem Jahr 1996 datieren. Der Großhandelsindex stellt die Entwicklung der Preise dar.

### 8.1.2 Geräteleistung und Gerätekosten

Bei der Kalkulation von Gerätekosten wird zwischen Vorhaltegeräten und Leistungsgeräten unterschieden. Vorhaltegeräte werden auf der Baustelle für verschiedenste Teilleistungen eingesetzt und pauschal in €/Monat angegeben. Leistungsgeräte, die für eine spezielle Teilleistung (zum Beispiel ein Bodenaushub) eingesetzt werden, sind direkt der Leistung zuordbar (€/lfm).

Für die Kalkulation der Leistungsgeräte sind zutreffende Angaben über die speziellen Gerätekosten (z.B. €/Einsatzstunde) und den Leistungsansatz

(z.B. m<sup>3</sup>/Einsatzstunde) erforderlich. Die Ermittlung der Geräteleistung basiert auf Erfahrungswerten.

Unter Gerätekosten versteht man alle Kosten, die sich aus der Vorhaltung und dem Betrieb der Geräte ergeben.

Die Gerätekosten setzen sich zusammen aus:

- Vorhaltekosten (Abschreibung, Verzinsung, Reparatur)
- Betriebskosten (Betriebs- und Schmierstoffe, Wartung, Pflege)
- Einrichtungskosten (An- und Abtransport, Auf- und Abbau)
- Sonstige Kosten (Lager, Verwaltung, Versicherung, Steuern)

## 8.2 Baubetrieblicher Ablauf mit dazugehörigen Einheitspreisen

Nachfolgend ist der Arbeitsablauf auf der Baustelle im Großraum Wien zur Herstellung einer Fernwärmeleitung aufgelistet und mit den ermittelten Einheitspreisen aus der Kalkulation (Anlagen 22 bis 38) versehen.

Als Mittelohnkosten werden erfahrungsgemäß 30 € angesetzt.

### 8.2.1 Baustelle einrichten

Die Baustelleneinrichtung besteht aus 2 Baucontainern, sowie Absperrungen (Bauzaun) für die Rohrkünette und angebrachten Verkehrsschildern (Anlage 29).

Einheitspreis = 7,0 €/lfm

### 8.2.2 Asphalt aufschneiden

Das Aufschneiden des Asphalt (Anlage 30) wurde mit einer Fugenfräse nach ÖBGL 1996 kalkuliert. Die Gerätekosten sind in der Anlage 25 ersichtlich.

Einheitspreis = 27,84 €/lfm

### **8.2.3 Rohrgrubenaushub**

Der Bodenaushub bei einer Tiefe von 1,25 m wird von einem Mobilbagger mit Tief-  
löffel durchgeführt. Die Gerätekosten des 16 Tonnen schweren Baggers sind laut  
ÖBGL im K6E-Batt 1 (Anlage 22) dargestellt.

Der Bagger benötigt für einen Laufmeter Aushub der Künette 0,075 Stunden, was  
ca. 5 Minuten entspricht (Anlage 31).

Einheitspreis = 11,75 €/lfm

### **8.2.4 Verfuhr**

Das ausgehobene Material wird in einem LKW (3-Achser lt. ÖBGL 1996,  
Anlage 27) verführt. Die Entfernung zum Lagerplatz beträgt 15 km (Anlage 32).

Einheitspreis = 20,42 €/lfm

### **8.2.5 Pölzen**

Die 1,25 m tiefe und 0,8 m breite Rohrkünette wird mit einem waagrechten Verbau  
aus Holz gepölzt (Anlage 33). Ein LKW mit Kran ist zu 30 % der benötigten Ein-  
bauzeit der Pölung auf der Baustelle.

Einheitspreis = 28,22 €/lfm

### **8.2.6 Montage der Fernwärmerohre**

Die Montage der Fernwärmeleitungen mit einem Stahlrohr DN 100 mm und einem  
Mantelrohr DN 200 mm wird von Fernwärme Wien durchgeführt und ist nicht Be-  
standteil dieser Kalkulation. Der Einfluss auf die Bauzeit durch die Montagearbei-  
ten ist jedoch zu beachten.

### **8.2.7 Antransport des Thermosandes**

Der lose Thermosand wird vom Werk aus Fohnsdorf mit zugeplanten LKWs in ein  
Mischwerk (Entfernung 180 km) nach Wien verführt (Anlage 34).

Einheitspreis = 20,71 €/lfm

### **8.2.8 Abmischen des Thermosandes**

Der Thermosand wird im Mischwerk durch Zugeben von Wasser und Fließmittel einbaufertig gemacht und mit einem Mischwagen zur Baustelle verführt (Anlage 35).

Einheitspreis = 38,39 €/lfm

### **8.2.9 Hinterfüllen der Leitungszone**

Die Verfüllung der 60 cm hohen Leitungszone erfolgt mit einem Kleindumper (Gerätekosten in Anlage 25), der die fließfähige Thermosandmischung aus dem Mischwagen bezieht. Die Pölzung ist gleichmäßig zu ziehen. (Anlage 36).

Einheitspreis = 5,0 €/lfm

### **8.2.10 Hinterfüllen der Auffüllungszone**

Die Auffüllungszone (65 cm) wird mit einem LKW mit Kran und dazugehörigem Zweischalengreifer (Gerätekosten in Anlage 23) hinterfüllt und mit einer reversierbaren Vibrationsplatte (Gerätekosten in Anlage 24) verdichtet (Kalkulation in Anlage 37).

Einheitspreis = 16,80 €/lfm

### **8.2.11 Asphalt aufbringen**

Die 10 cm dicke Asphaltenschicht wird mit einem Straßenfertiger (Gerätekosten in Anlage 27) aufgebracht. Als Leistungsansatz werden 120 m<sup>3</sup> eingebrachter Asphalt pro Stunde angenommen (Anlage 38).

Einheitspreis = 49,75 €/lfm

### 8.3 Herstellpreis des fertig eingebauten Thermosandes als SVM

Nachfolgend werden alle in Abschnitt 8.2 aufgelisteten Einheitspreise zusammengefasst (siehe auch Abb. 8.2). Nur die Montage der Fernwärmerohre wird in dieser Preiskalkulation nicht berücksichtigt.

Der kalkulierte Herstellpreis beträgt beim Einbau eines Fernwärmerohres DN 100/200 mm mit Thermosand als stabilisiertes Bettungsmaterial 225,90 € pro Laufmeter, bei einer Rohrgrabenhöhe von 1,25 m und einer Breite von 0,80 m.

1. Einrichten der Baustelle	7,00 €/lfm	=	3%
2. Asphalt schneiden	27,84 €/lfm	=	12%
3. Rohrgrabenaushub	11,75 €/lfm	=	5%
4. Verfuhr der Materialien	20,42 €/lfm	=	10%
5. Pölzen	28,22 €/lfm	=	13%
6. Montage der Fernwärmerohre	--- €/lfm	=	0%
7. Antransport des Thermosandes	20,71 €/lfm	=	9%
8. Abmischen des Thermosandes	38,39 €/lfm	=	17%
9. Hinterfüllung der Leitungszone	5,00 €/lfm	=	2%
10. Hinterfüllung der Auffüllungszone	16,80 €/lfm	=	7%
11. Asphalt aufbringen	49,75 €/lfm	=	22%
	<b>225,90 €/lfm</b>		<b>100%</b>

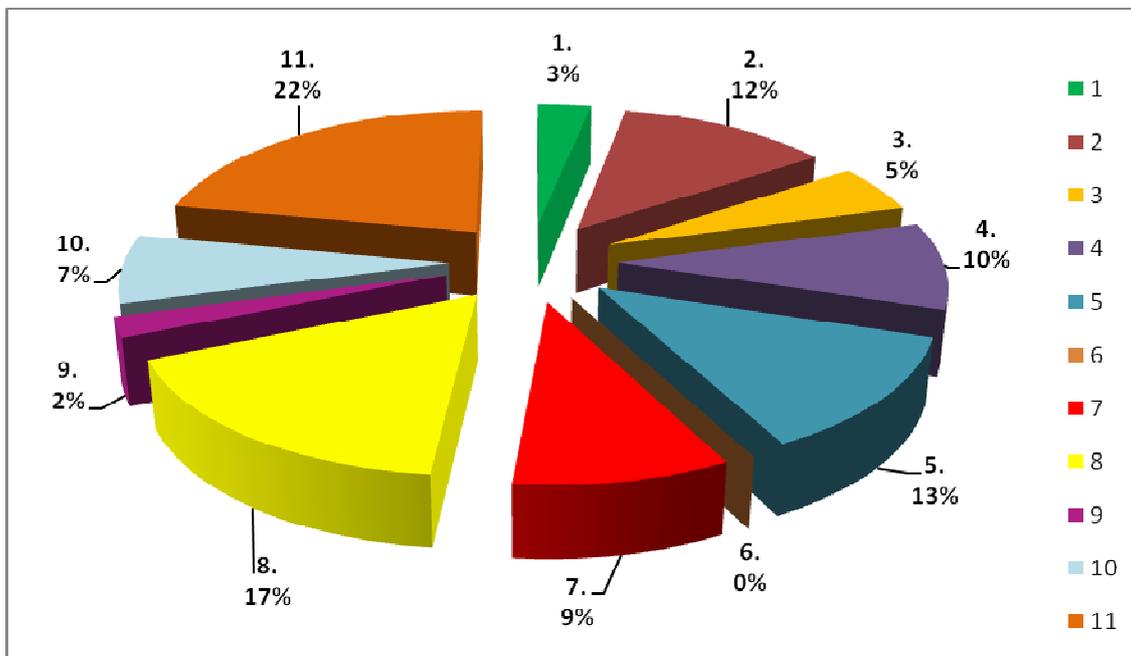


Abbildung 8.2: Aufteilung der kalkulierten Herstellpreise in %

## 9 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war die Untersuchung von Thermosandmischungen als stabilisiertes Verfüll- und Bettungsmaterial in Rohrgräben bei der Verlegung von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren. Wichtig dabei war die Erhaltung der guten Wärmedämmeigenschaften des Thermosandes.

Um die Eignung des Thermosandes als stabilisiertes Verfüllmaterial für erdverlegte Fernwärmerohre zu überprüfen, wurden Anforderungen an die Konsistenz, an das Absetzverhalten und an die einaxiale Druckfestigkeit auf Basis der ONR 23131 (2005) und der ONR FW 110A (1999) erstellt, und die dazu notwendigen Laborversuche durchgeführt.

Insgesamt wurden 18 verschiedene Thermosandmischungen im Labor angefertigt und untersucht, mit dem Ziel, die geeignetste Mischung herauszufinden. Zudem wurden an einer Versuchsstrecke in Wien Feldversuche durchgeführt, um die Laborergebnisse bestätigen zu können.

Es stellte sich heraus, dass die optimale Thermosandmischung (Mischung 17) nur Wasser und Fließmittel enthält und zur Erreichung der notwendigen Festigkeiten kein Bindemittel in Form von Zement beigemischt werden muss. Sie hat nach 28 Tagen einen durchschnittlichen Wassergehalt von 21 %, eine mittlere Trockendichte von  $1,40 \text{ g/cm}^3$ , eine durchschnittliche einaxiale Druckfestigkeit von  $6,7 \text{ N/cm}^2$  und einen mittleren Wärmeleitfähigkeitsbeiwert von  $0,996 \text{ W/mK}$ . Darüber hinaus wurden die geforderte Konsistenzklasse der frischen Thermosandmischung von F59 sowie das Absetzmaß nach 24 Stunden und 28 Tagen erfüllt.

Um ein zügiges Arbeiten auf der Baustelle zu ermöglichen, ist es von Vorteil, die Fernwärmerohre nur bis zum Kämpfer (also Rohrmitte, siehe Abb. 9.1) mit der fließfähigen Thermosandmischung 17, und die obere Hälfte der Leitungszone nach 24 Stunden mit losem und trockenem Thermosand zu verfüllen. Mit dieser Arbeitsweise kann die Auffüllungszone unmittelbar danach verfüllt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Thermosandmischung 17 als stabilisiertes Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen geeignet ist. Das Datenblatt dieser Mischung ist in Tab. 9.1 ersichtlich.

Anzumerken ist weiters, dass der Grenzwert der Wiederaufgrabbarkeit (siehe Kapitel 3.1) nach ONR 23131 (2005) mit einer einaxialen Druckfestigkeit von  $60 \text{ N/cm}^2$  nach 28 Tagen zu hoch ist. Die Mischung 18 (Anlage 15) mit einer durch-

schnittlichen einaxialen Druckfestigkeit von 42,5 N/cm<sup>2</sup> nach 28 Tagen ist mit einer Schaufel oder einem Krampen nicht mehr bearbeitbar.



Abbildung 9.1: Verfüllung der fließfähigen, stabilisierten Thermosandmischung bis zur Rohrmitte

Abschließend wurden alle ermittelten Ergebnisse der optimalen Thermosandmischung 17 zu einem Datenblatt (Tab. 9.1) zusammengefasst. Bei den angegebenen Tabellenwerten der einaxialen Druckfestigkeit, dem Wassergehalt  $w$ , der Trockendichte  $\rho_d$  sowie dem Wärmeleitfähigkeitsbeiwert  $\lambda$  handelt es sich um Durchschnittswerte.

Datenblatt	Ausbreitmaß	Absetzmaß nach 24 h	Absetzmaß nach 28 Tage	Trockendichte $\rho_d$
<b>Mischung 17</b>	F 59	1,40%	1,50%	1,40 g/cm <sup>3</sup>
	Einaxiale Druckfestigkeit nach 3 d	Einaxiale Druckfestigkeit nach 7 d	Einaxiale Druckfestigkeit nach 14 d	Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 d
	1,1 N/cm <sup>2</sup>	2,1 N/cm <sup>2</sup>	2,7 N/cm <sup>2</sup>	5,8 N/cm <sup>2</sup>
Datum: 15.03.2010	Wassergehalt $w$ nach 3 d	Wassergehalt $w$ nach 7 d	Wassergehalt $w$ nach 14 d	Wassergehalt $w$ nach 28 d
	27,9%	26,8%	23,2%	21,3%
<b>Rezeptur</b>	Thermosand GK 4 mm	Wasser	Fließmittel LZF	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda$
	100 Gew.-%	28 Gew.-%	2 Gew.-%	0,996 W/mk

Tabelle 9.1: Datenblatt Thermosandmischung 17

## 10 Literaturverzeichnis

Axnix, P.J., 2008:

Wärmeausbreitung im Boden,  
Mathematische Formulierung und Fernwärmeleitungen als  
Anwendungsbeispiel. Diplomarbeit, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,  
Technische Universität Graz

Baehr, H-D. / Stephan, K., 1996:

Wärme- und Stoffübertragung, 2. Auflage  
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

Henögl, O., 2006:

Bodenmechanische Eignung und thermische Vorteile eines neuartigen Bet-  
tungssandes für Fernwärmeleitungen.

5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Tagungshandbuch 2006,

Druck: Technische Akademie Esslingen, Ostfildern

Herausgeber: Prof. Dr. Ing. habil. Hermann Schad

Henögl, O. et al., 2009:

„Thermal propagation around heat supply pipes – determining thermal conduc-  
tivity of soil specimens“, Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on  
Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Ägypten, 5-  
9.10.2009, Vol. 2, 1036-1040

Litscher, P., 2004:

Bewertung von unterschiedlichen Bettungsmaterialien für Fernwärmeleitungen  
aus Kunststoffverbundmantelrohren (KVM – Rohre)

Diplomarbeit Institut für Bodenmechanik und Grundbau,

Technische Universität Graz

Meseck H., 1987:

Mechanische Eigenschaften mineralischer Dichtwandmassen

Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik,

TU Braunschweig, Heft 23

Pagitsch M., 2009:

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Bodenproben mit der Halbraumsonde – Prinzip und vergleichende Messungen,  
Bachelorprojekt Institut für Bodenmechanik und Grundbau,  
Technische Universität Graz

Semprich S. / Henögl O, 2003:

„Thermosand (Fohnsdorfer Halditt)“ -  
Bericht und Attest zur Eignungsprüfung im Labor  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz,  
unveröffentlicht

Kekelit ,2006:

Handbuch Thermosand  
Kekelit Kunststoffwerk Gesellschaft m.b.H. ,Linz

Teka, 2007:

Thermophysikalische Messgeräte-Geothermische Untersuchungen  
Firma Teka, Berlin, Deutschland

FW7, 1999

Technische Richtlinie für vorisolierter Fernwärmerohre aus Stahl mit Kunststoff- und Polyurethanausschäumungsmantel

FW11, 1999

Qualitätssicherungsrichtlinie vorisolierter Fernwärmerohre aus Stahl mit Kunststoff- und Polyurethanausschäumungsmantel

FW401, 1999

Technische Richtlinie für Verlegung und Statik von Kunststoff-Mantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze

ONR FW 110A; 1999:

Fernwärmeversorgung – Stabilisierte Rohrgrabenverfüllmaterialien,  
SVM für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ONR 23131, 2005:

Verfüllungen mit stabilisierten, fließfähigen Verfüllmaterialien (SVM)

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Österreichische Baugeräteliste, 1996:

ÖBGL; technisch – wirtschaftliche Baumaschinendaten zur internen Verrechnung bei Arbeitsgemeinschaften

Fachverband der Bauindustrie

ÖNORM B 2110, 2009:

Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen

Werkvertragsnorm

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 2061, 1999:

Preisermittlung für Bauleistungen - Verfahrensnorm

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 2117, 2002:

Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen an Verkehrswegen sowie für den damit im Zusammenhang stehenden Landschaftsbau,

Werkvertragsnorm

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4401-1, 1980:

Teil 1: Erd- und Grundbau, Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4410, 1974:

Ausgabe 5/74: Erd- und Grundbau; Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung; Untersuchung von Bodenproben,

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4412, 1979:

Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben;  
Korngrößenverteilung,  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4413, 1975:

Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben;  
Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpyknometer  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4414-2, 1979:

Teil 2: Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben;  
Bestimmung der Dichte des Bodens  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4415, 2010:

Geotechnik; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der einaxialen  
Druckfestigkeit  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4416, 1978:

Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben;  
Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Scherversuchen  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4418, 1981:

Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben;  
Proctorversuch.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 4710-1, 2007:

Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1)  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12350-5, 2009:

Prüfung von Frischbeton Teil 5: Ausbreitmaß

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 253, 2009:

Fernwärmerohre – Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Verbund-Rohrsystem bestehend aus dem Stahl-Mediumrohr, Polyurethandämmung und Außenmantel aus Polyethylen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 488, 2009:

Fernwärmerohre – Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Vorgesdämmte Absperrarmaturen bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethandämmung und Außenmantel aus Polyethylen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 489, 2009:

Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Rohrverbindungen für Stahlmediumrohre mit Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Ofi, 2002:

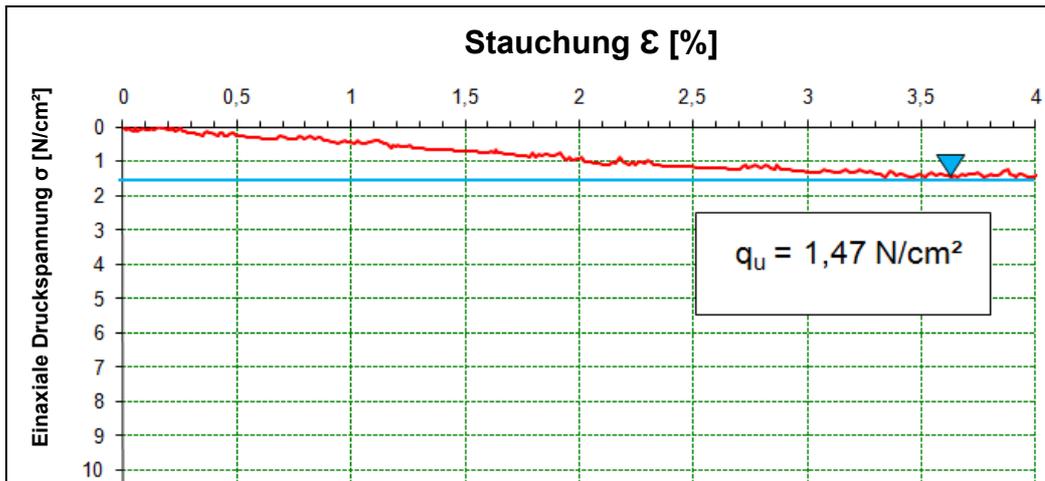
Institut für Sporttechnologie,

Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik Arsenal

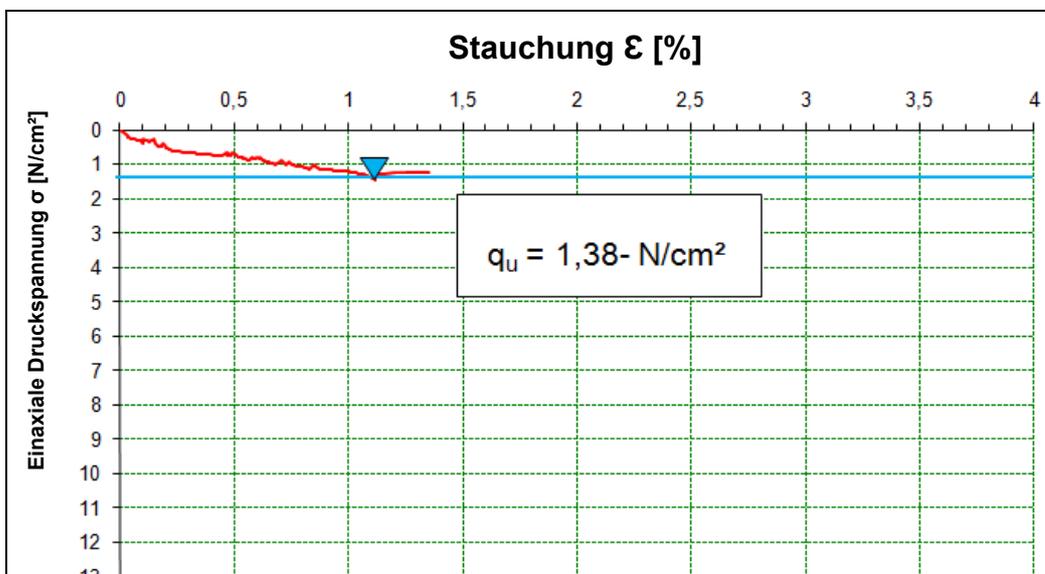
## Anlagen

### Anlage 1: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 7 Tagen

Probe 9/3-2

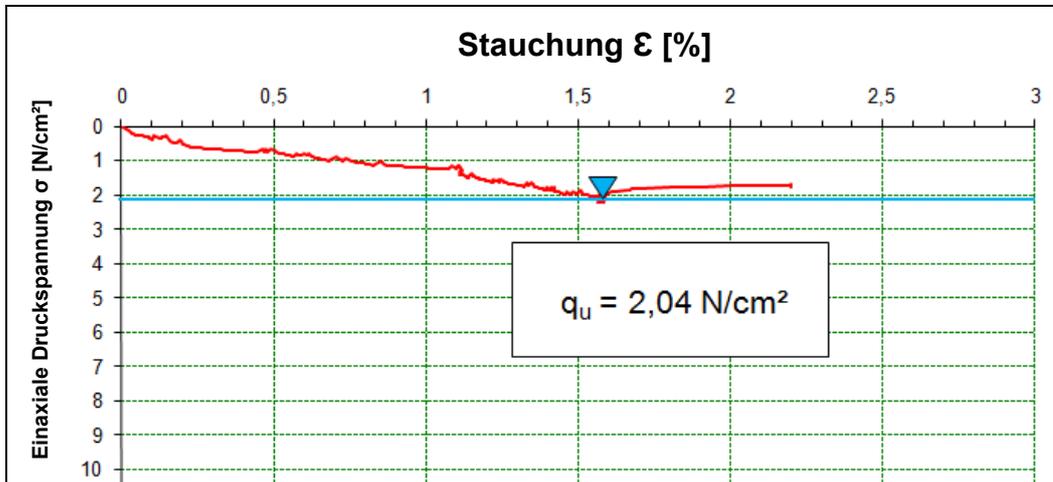


Probe 9/4-2

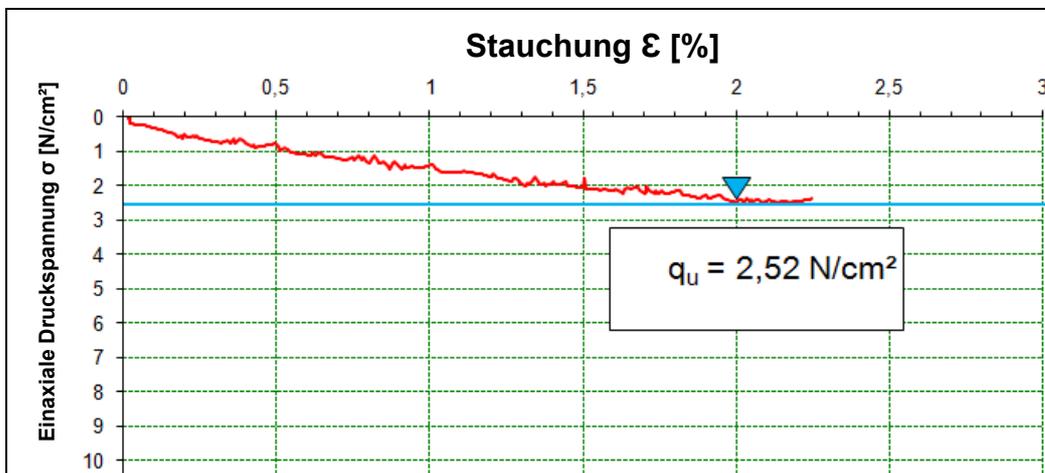


Anlage 2: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 14 Tagen

Probe 9/1-4

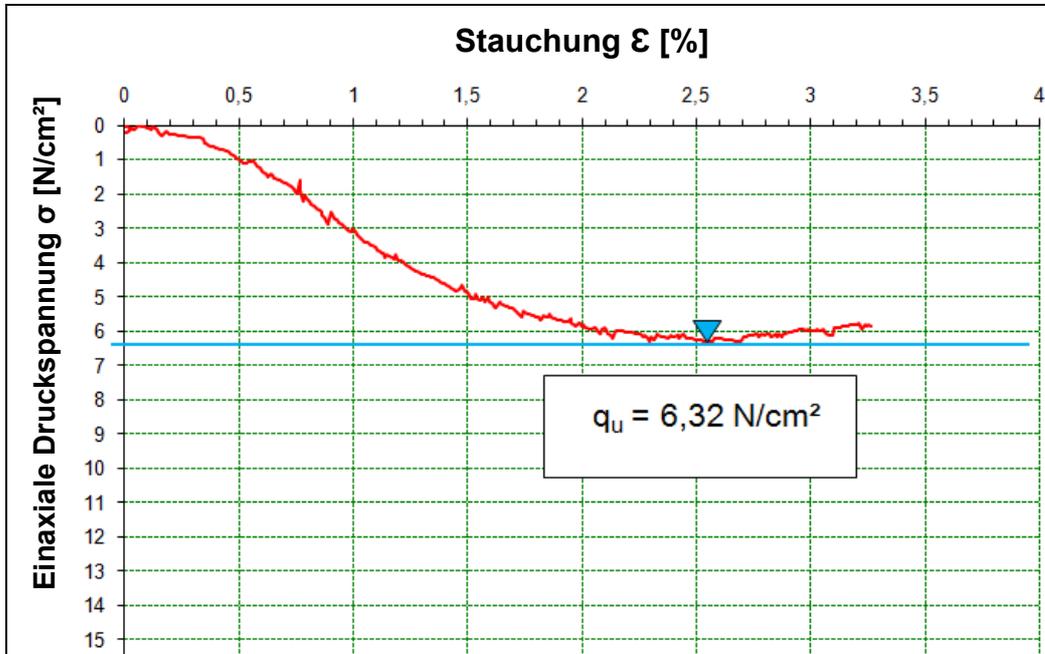


Probe 9/4-1

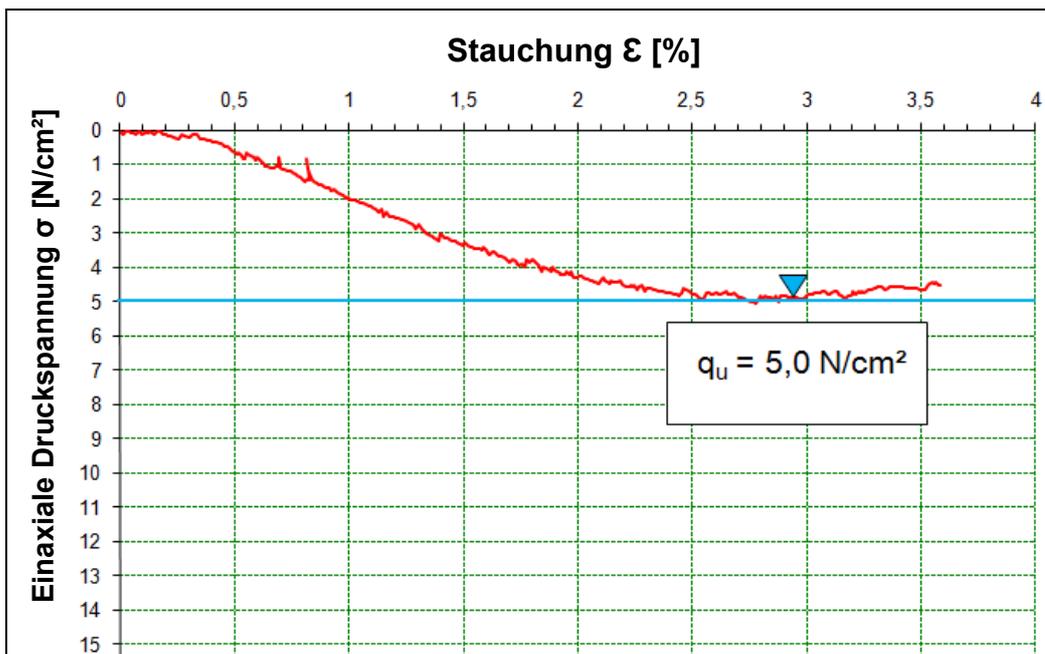


### Anlage 3: Einaxialversuche der Probenreihe 9 nach 28 Tagen

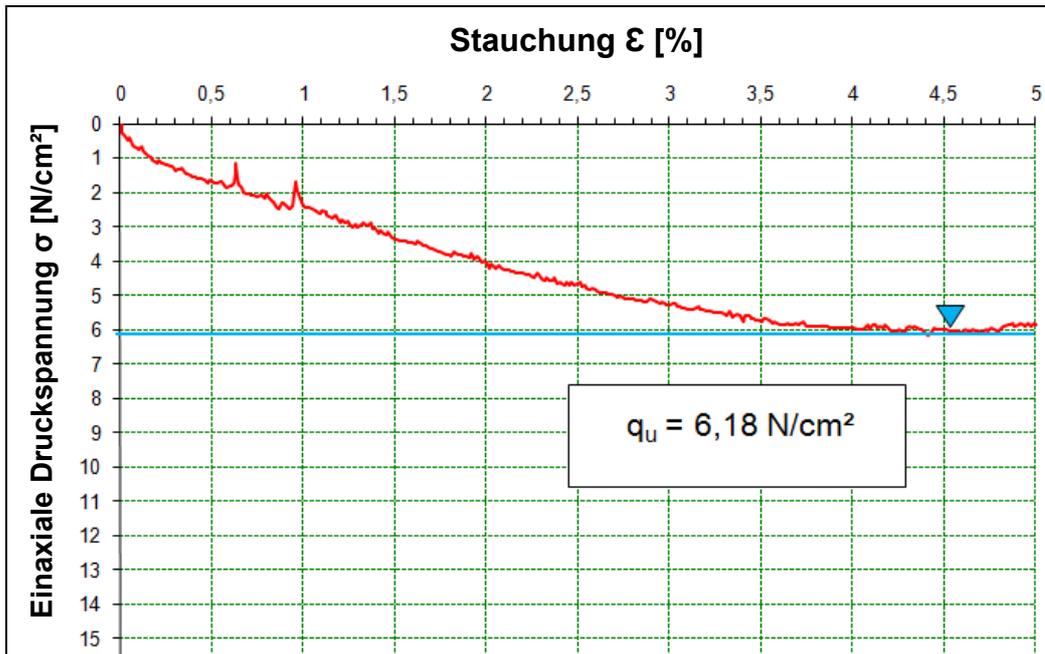
Probe **9/3-1**



Probe **9/5-4**

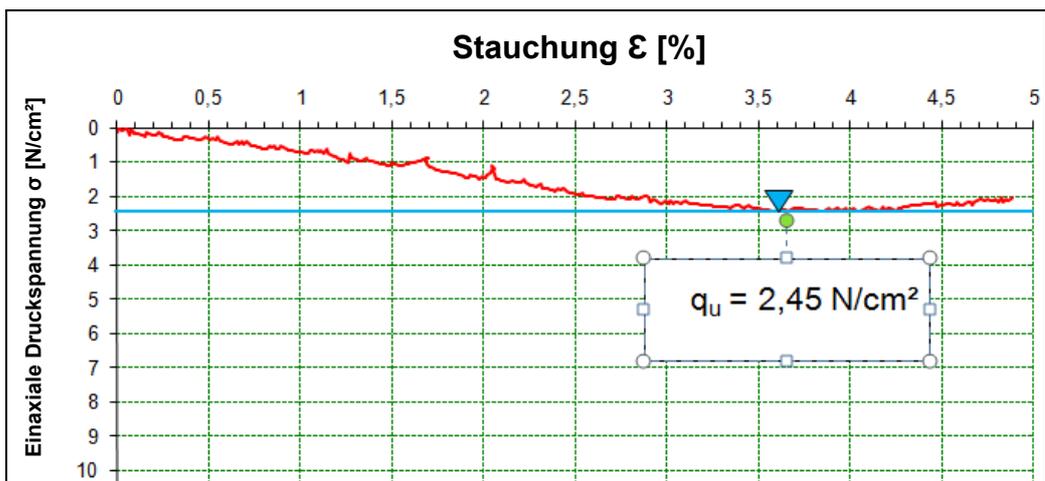


Probe 9/2-1

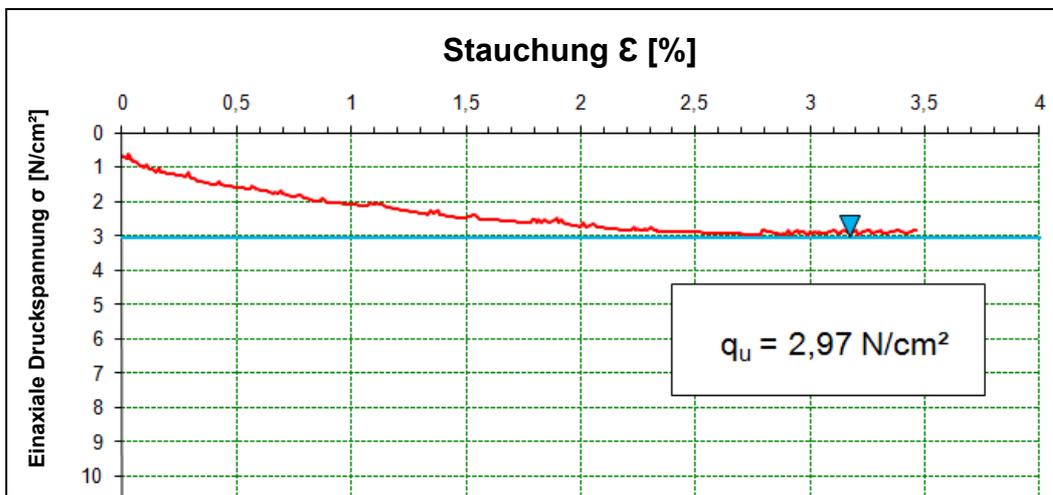


Anlage 4: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 7 Tagen

Probe 12/5-4

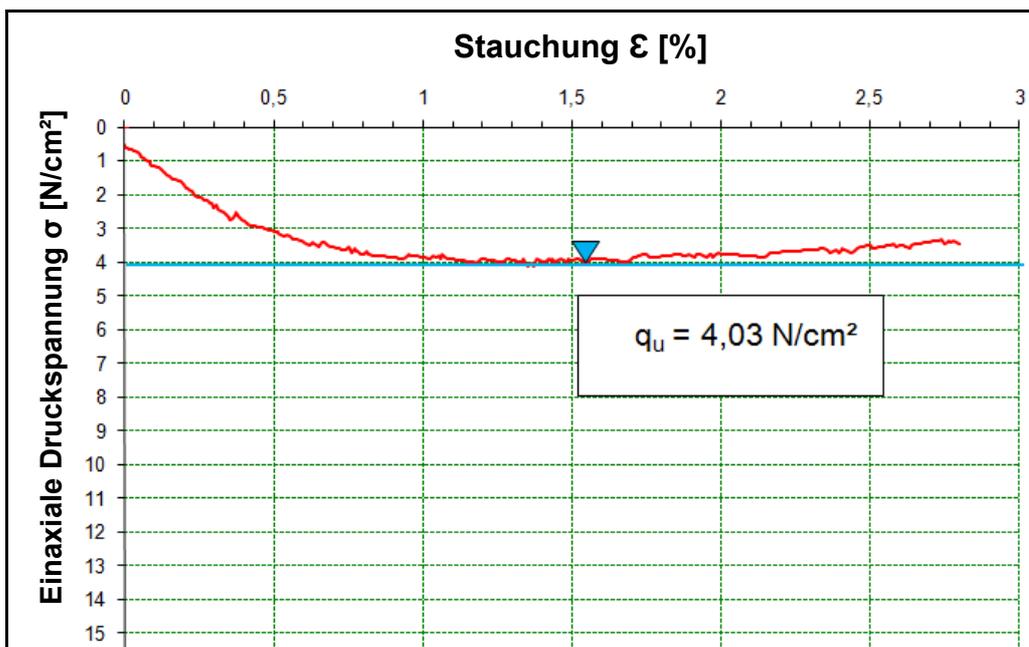


Probe 12/2-2

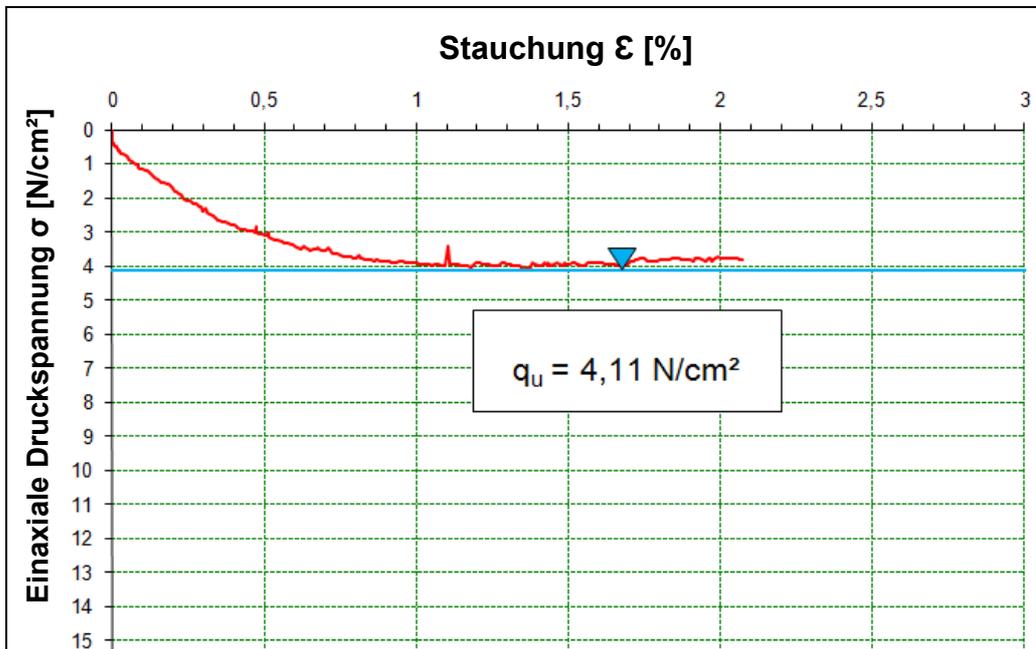


Anlage 5: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 14 Tagen

Probe 12/3-1

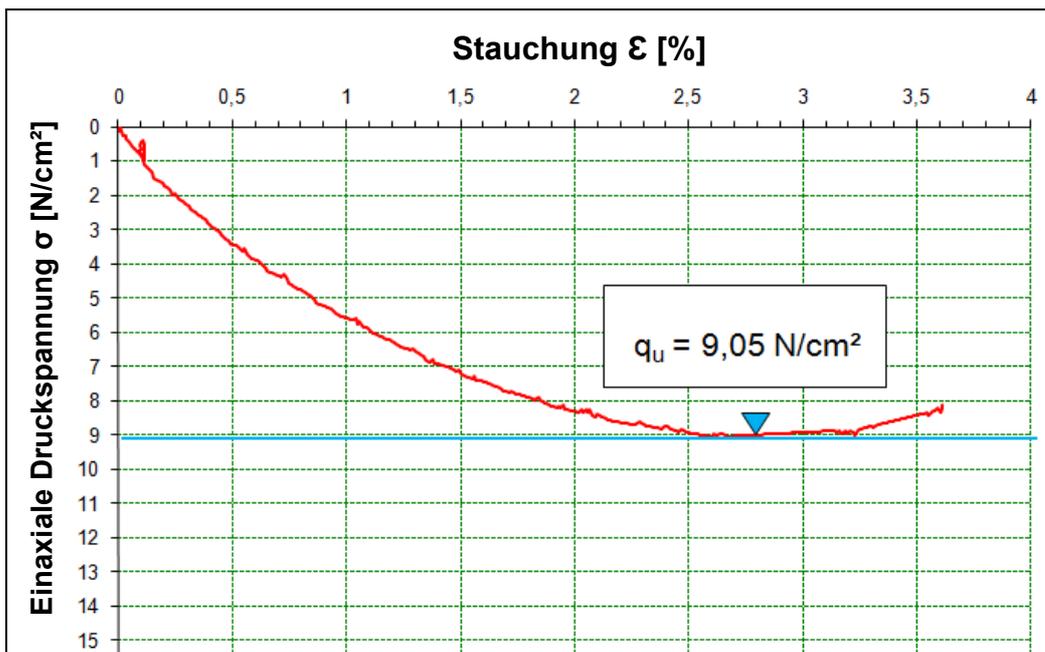


Probe 12/3-4

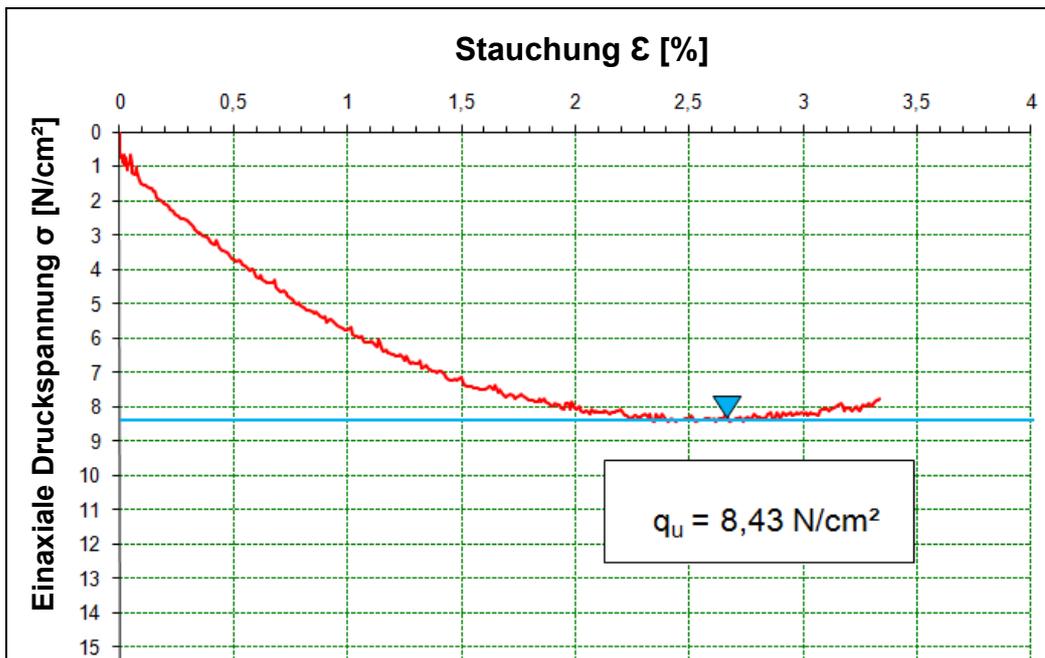


Anlage 6: Einaxialversuche der Probenreihe 12 nach 28 Tagen

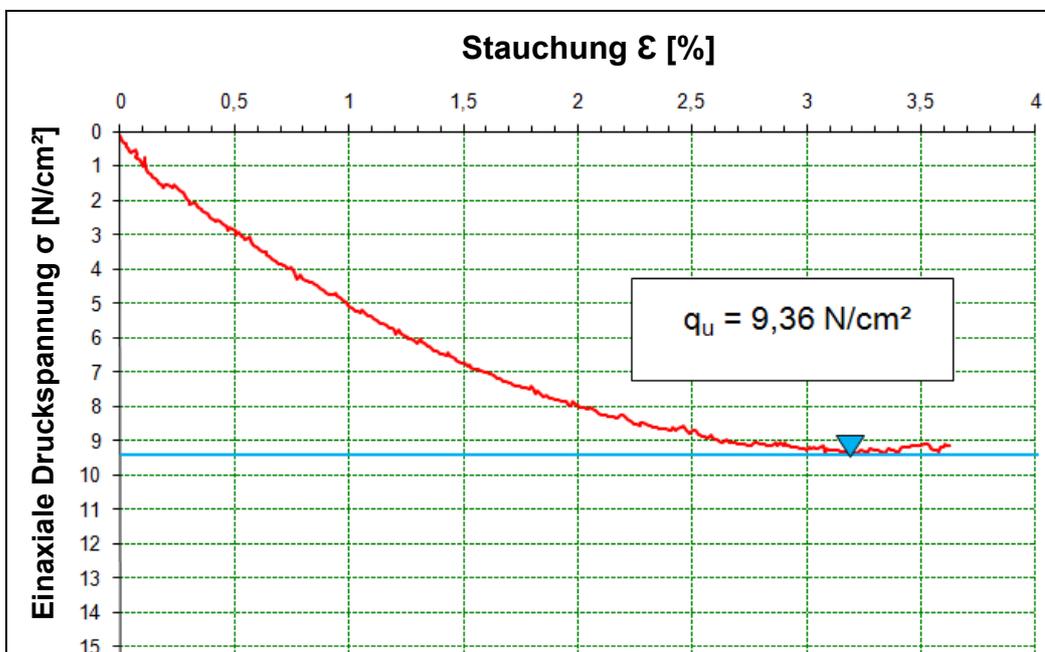
Probe 12/2-4



Probe 12/2-3

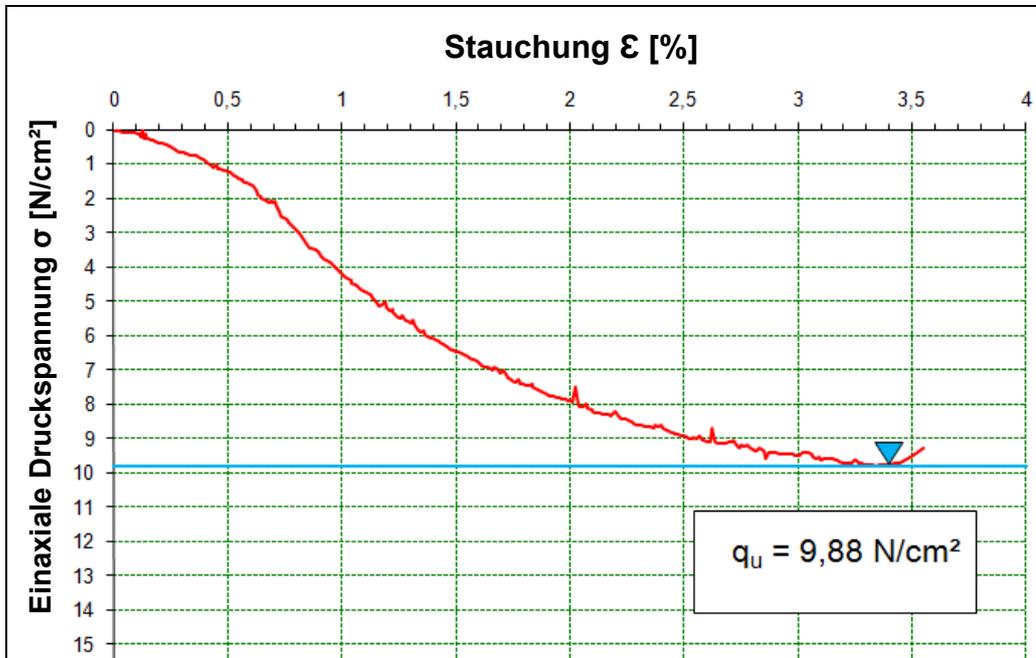


Probe 12/1-1



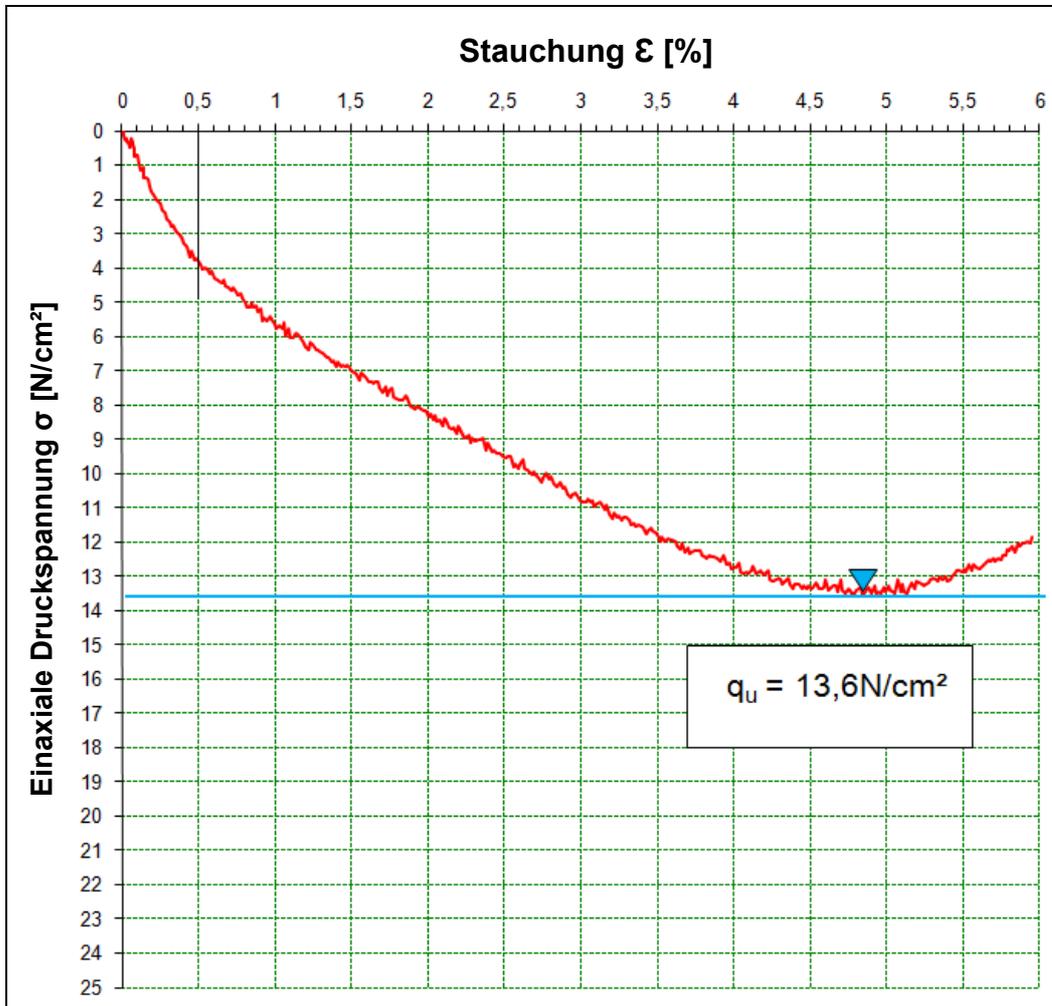
## Anlage 7: Einaxialversuche der Probenreihe 2

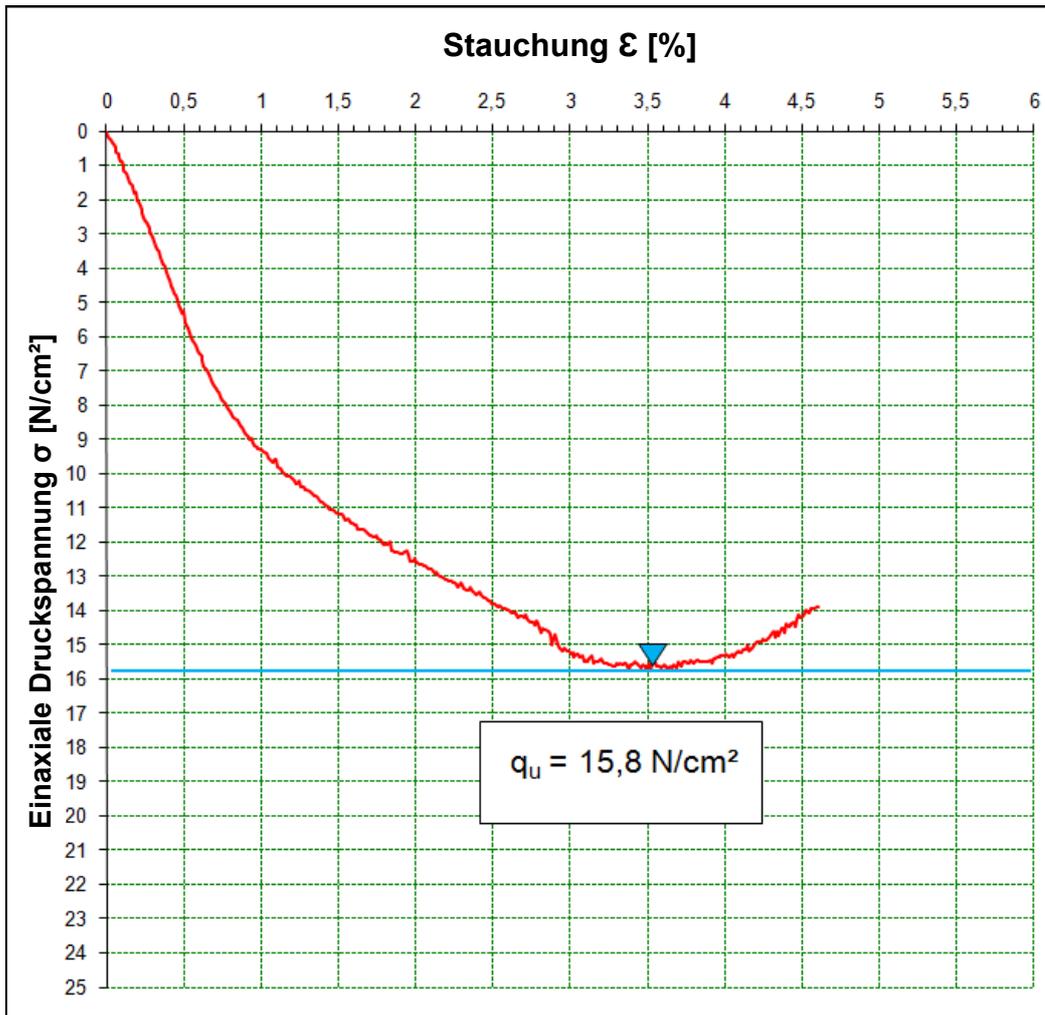
Probe 2/2-2



## Anlage 8: Einaxialversuche der Probenreihe 3

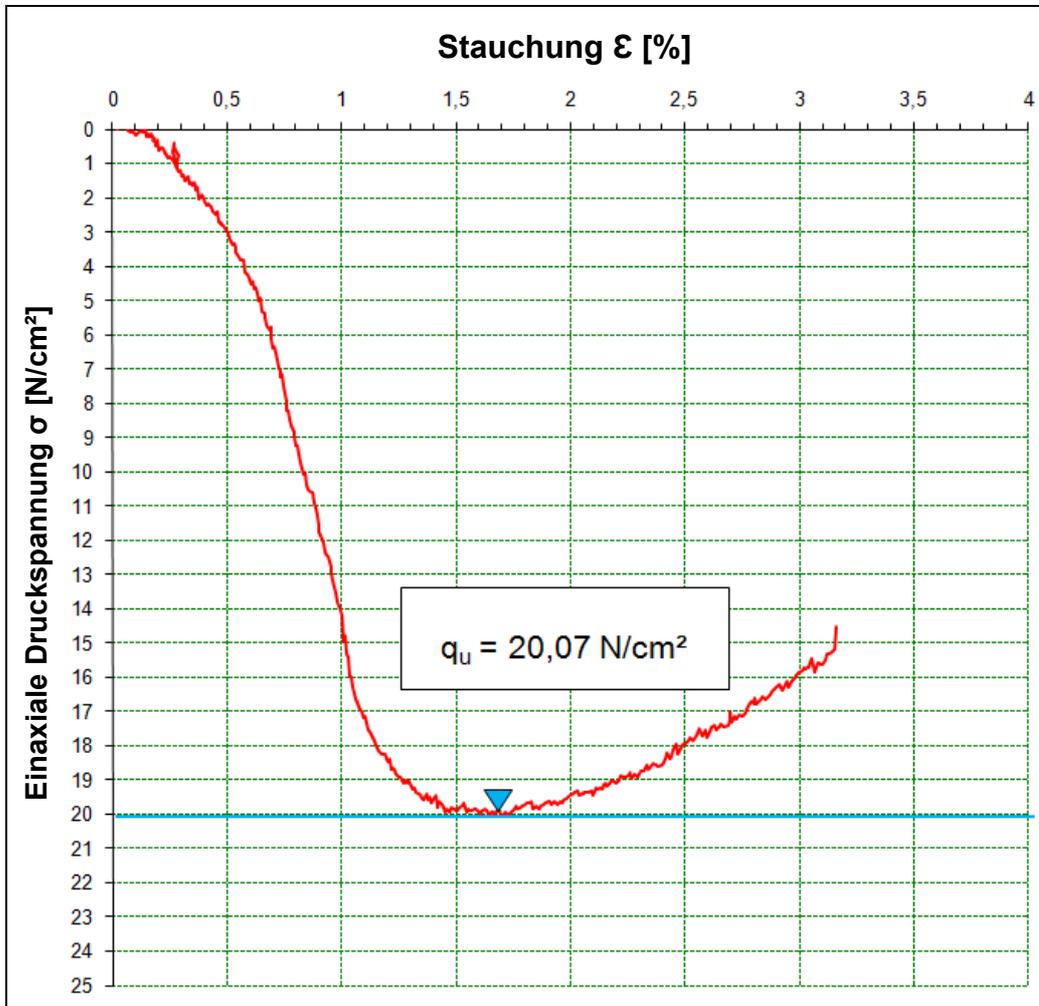
Probe 3/5-1





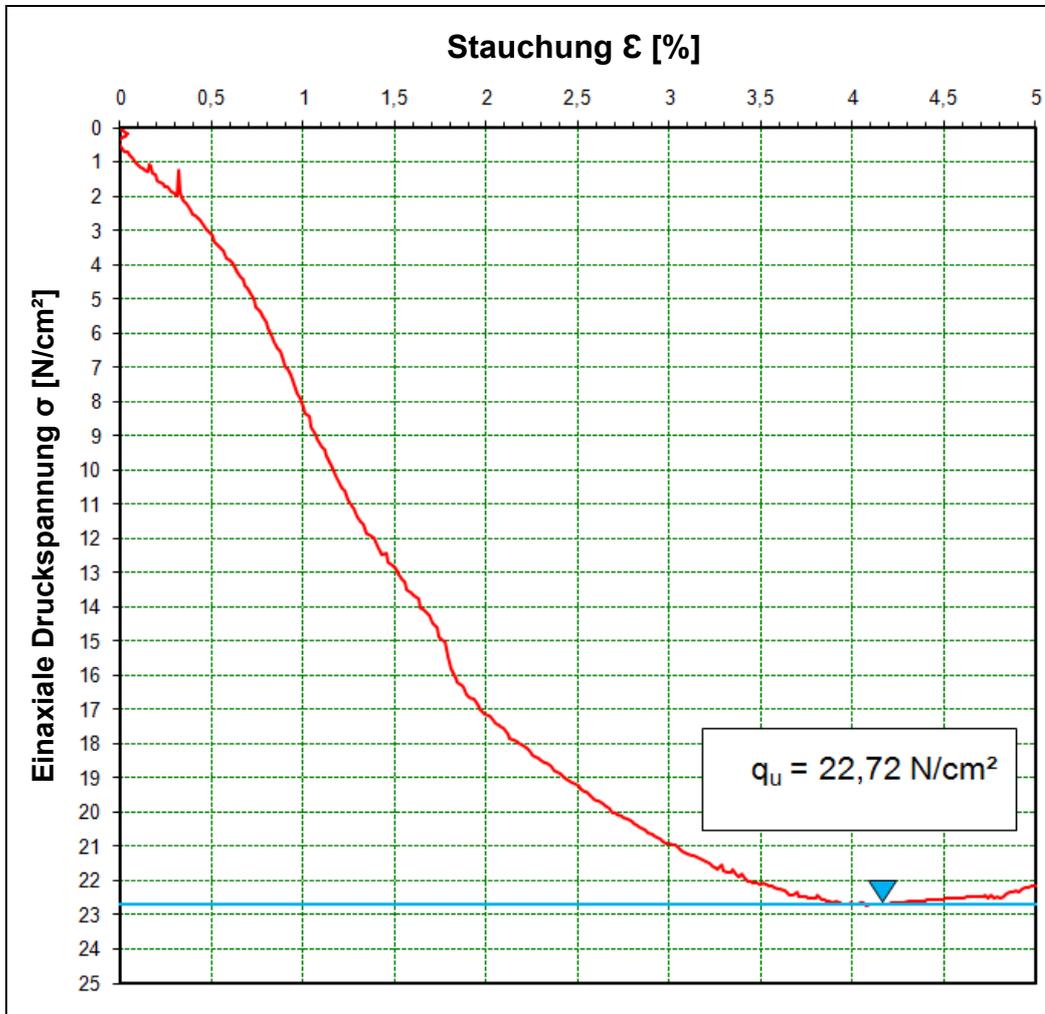
## Anlage 9: Einaxialversuche der Probenreihe 4

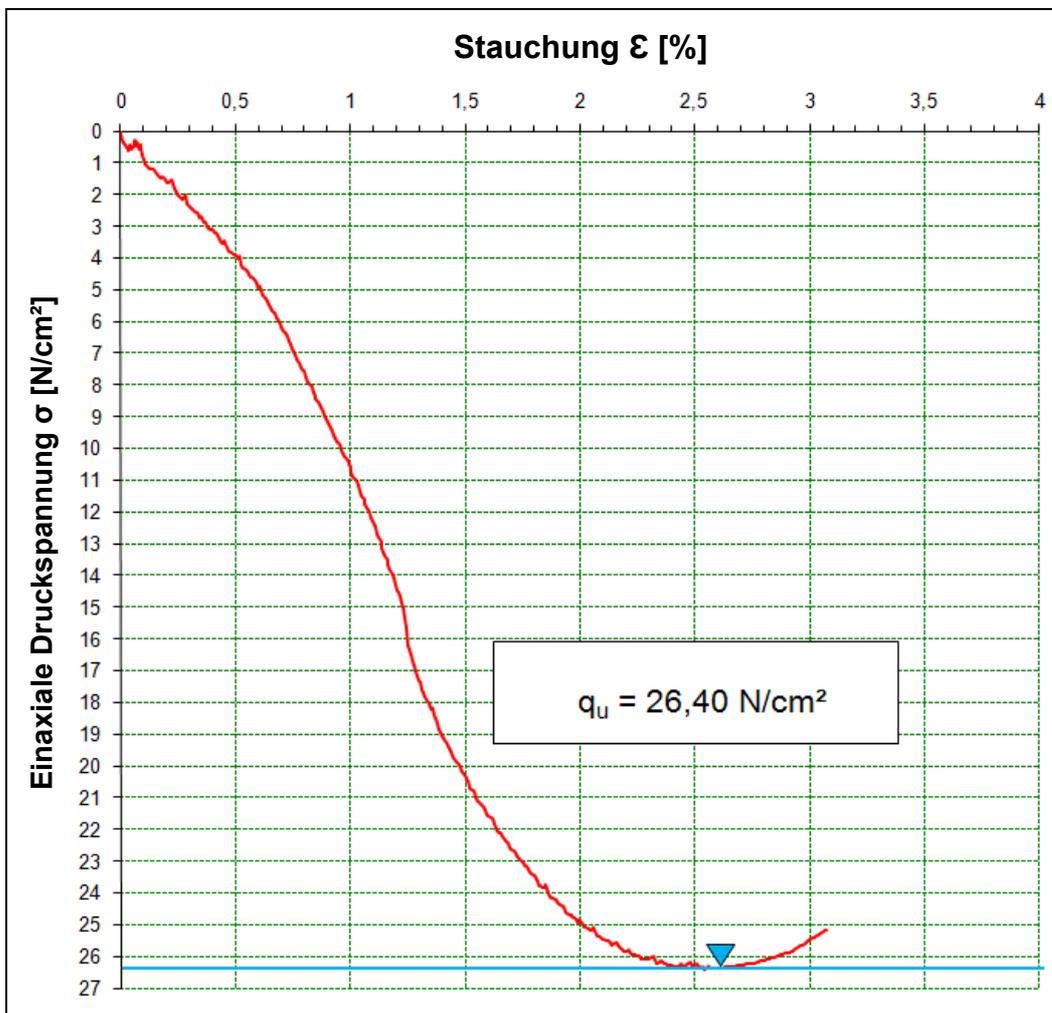
Probe 4/2-1



## Anlage 10: Einaxialversuche der Probenreihe 5

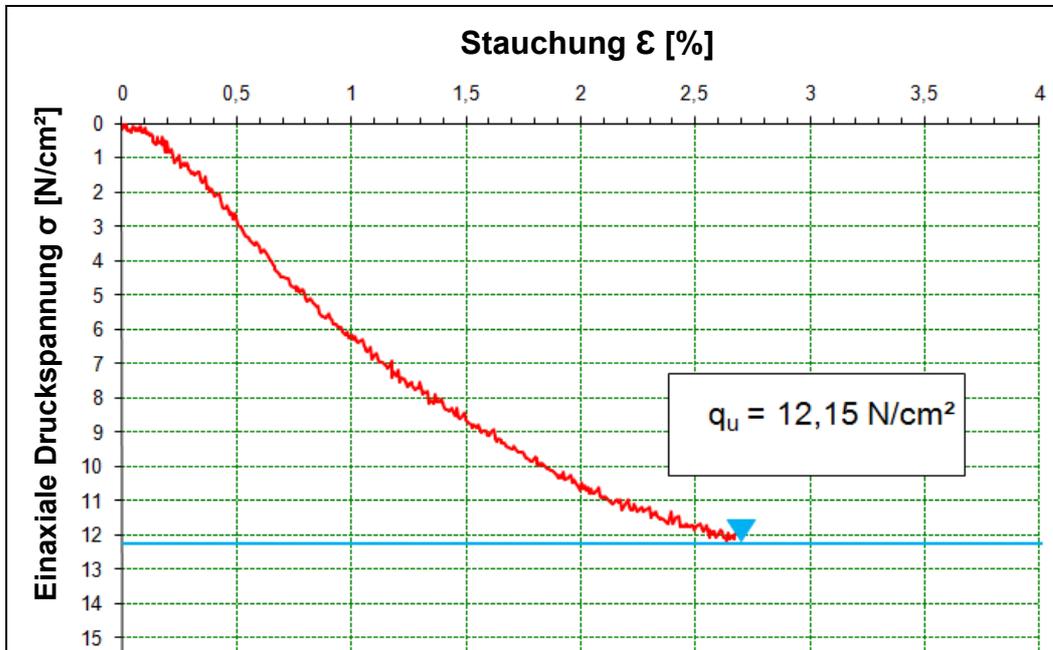
Probe 5/4-4



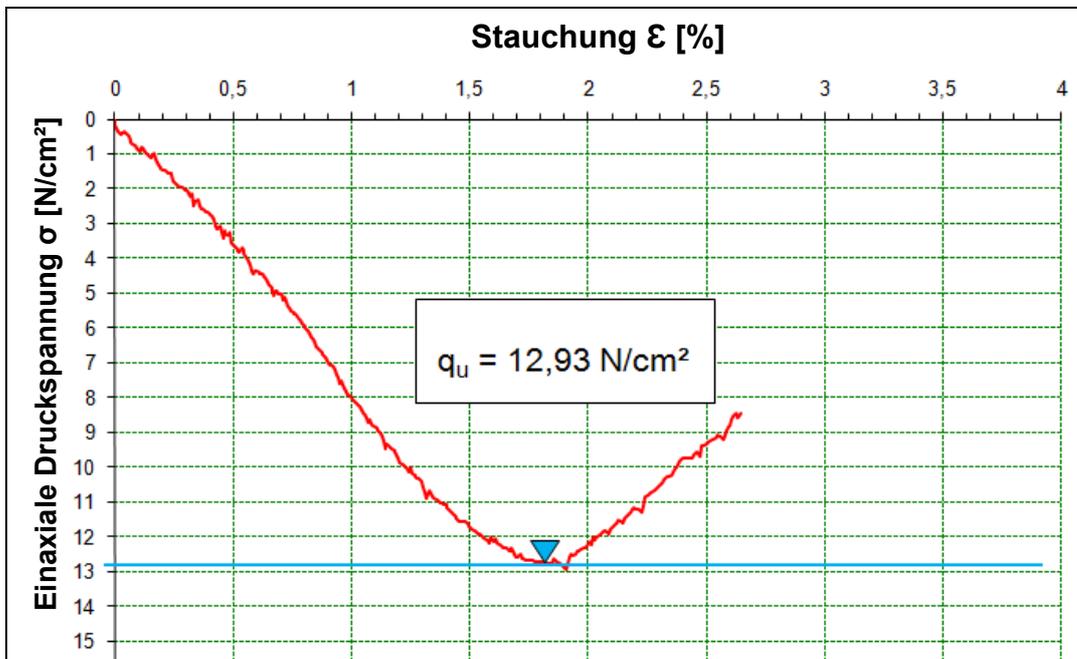


## Anlage 11: Einaxialversuche der Probenreihe 13

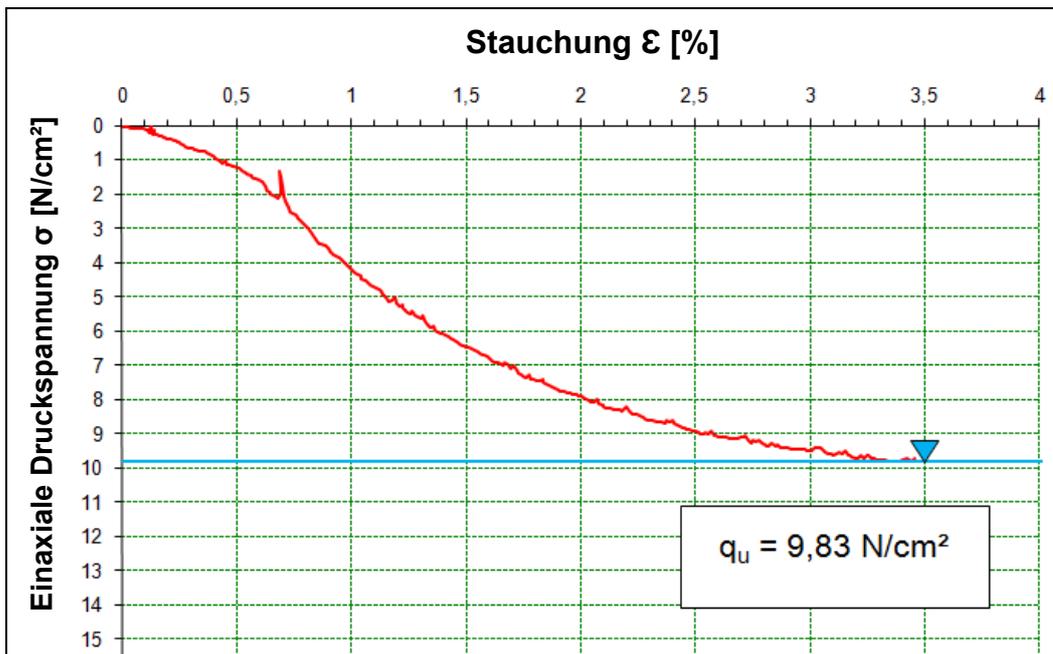
Probe 11/1-1



Probe 11/1-3

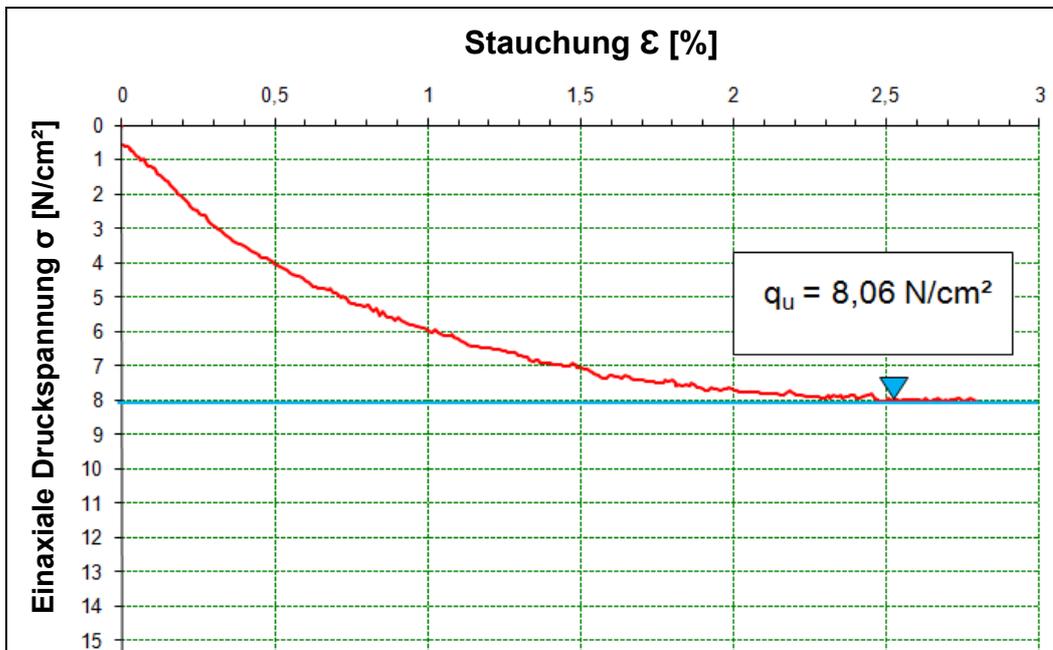


Probe 13/1-3



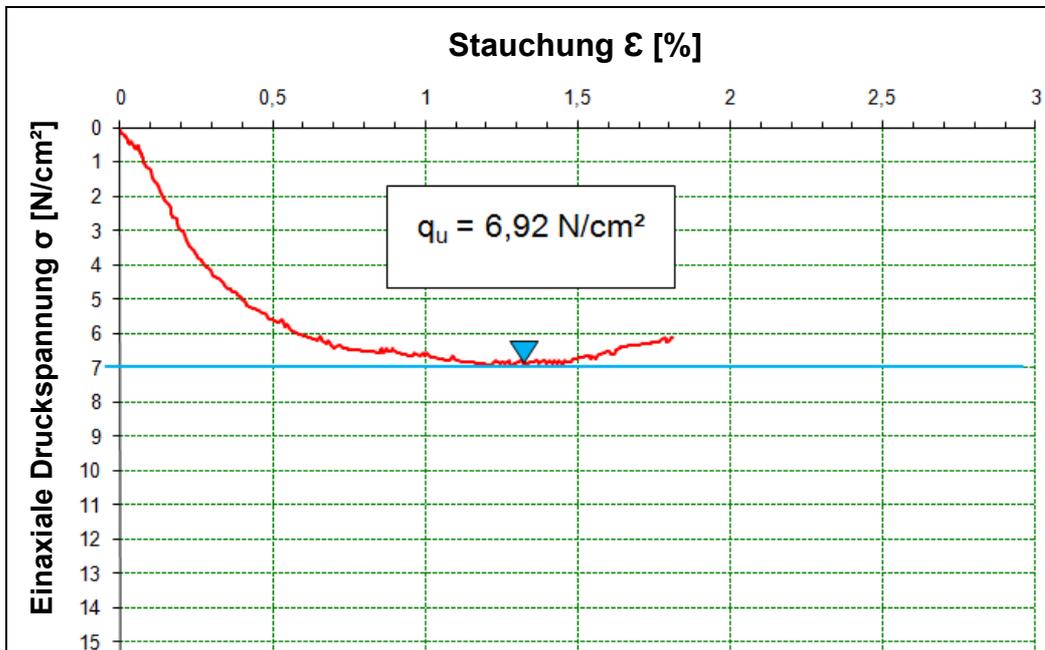
Anlage 12: Einaxialversuche der Probenreihe 13

Probe 13/2-1



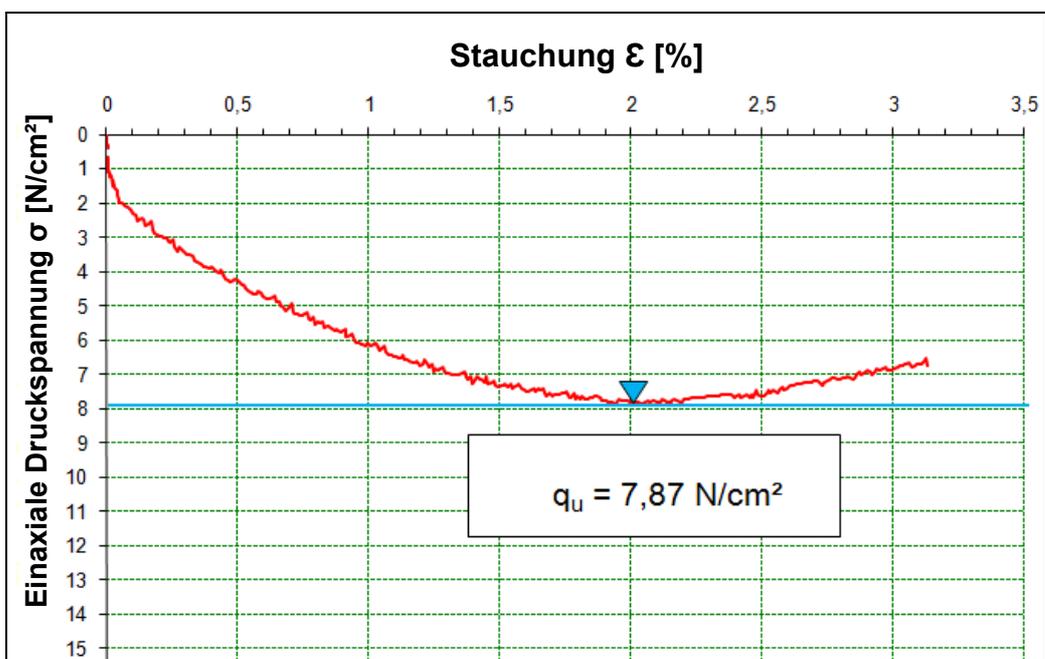
## Anlage 13: Einaxialversuche der Probenreihe 14

Probe 14/1-4



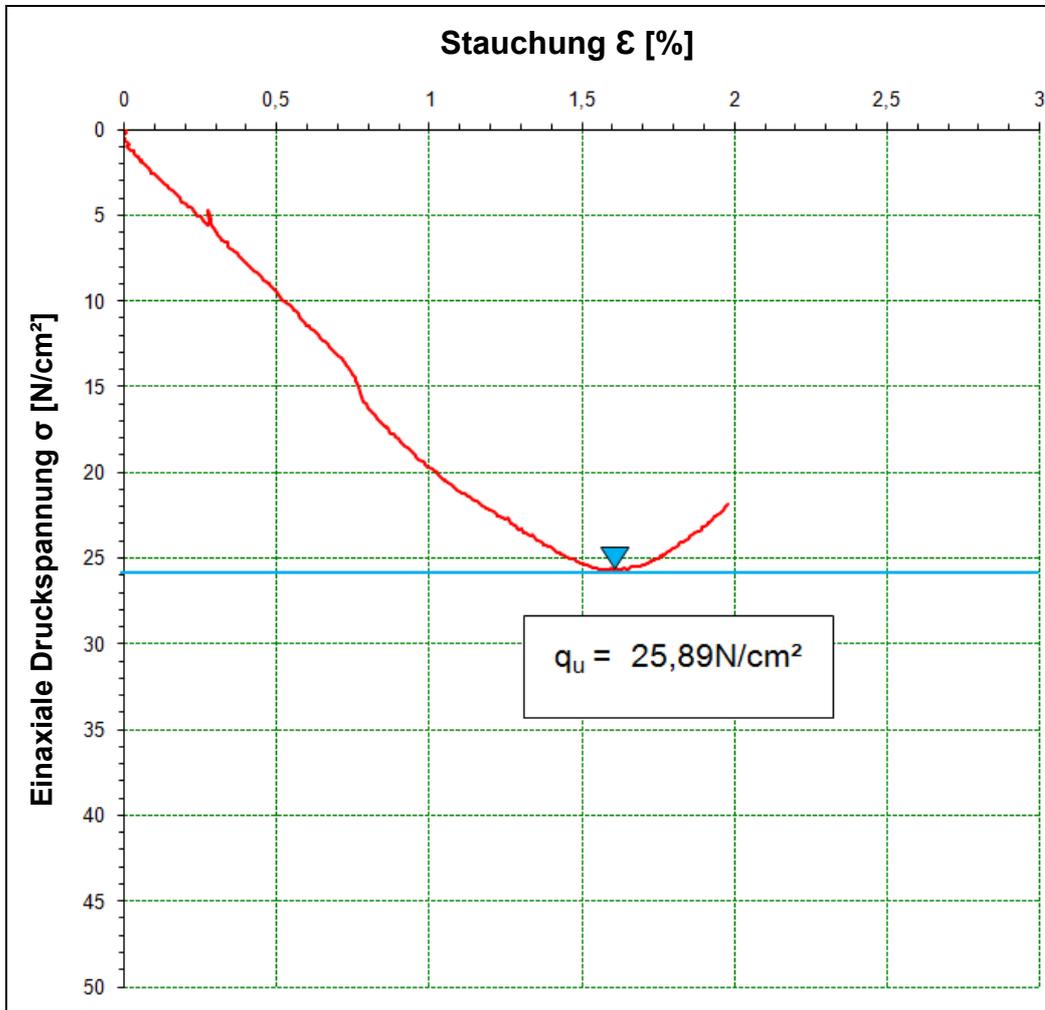
## Anlage 14: Einaxialversuche der Probenreihe 16

Probe 16/1-4

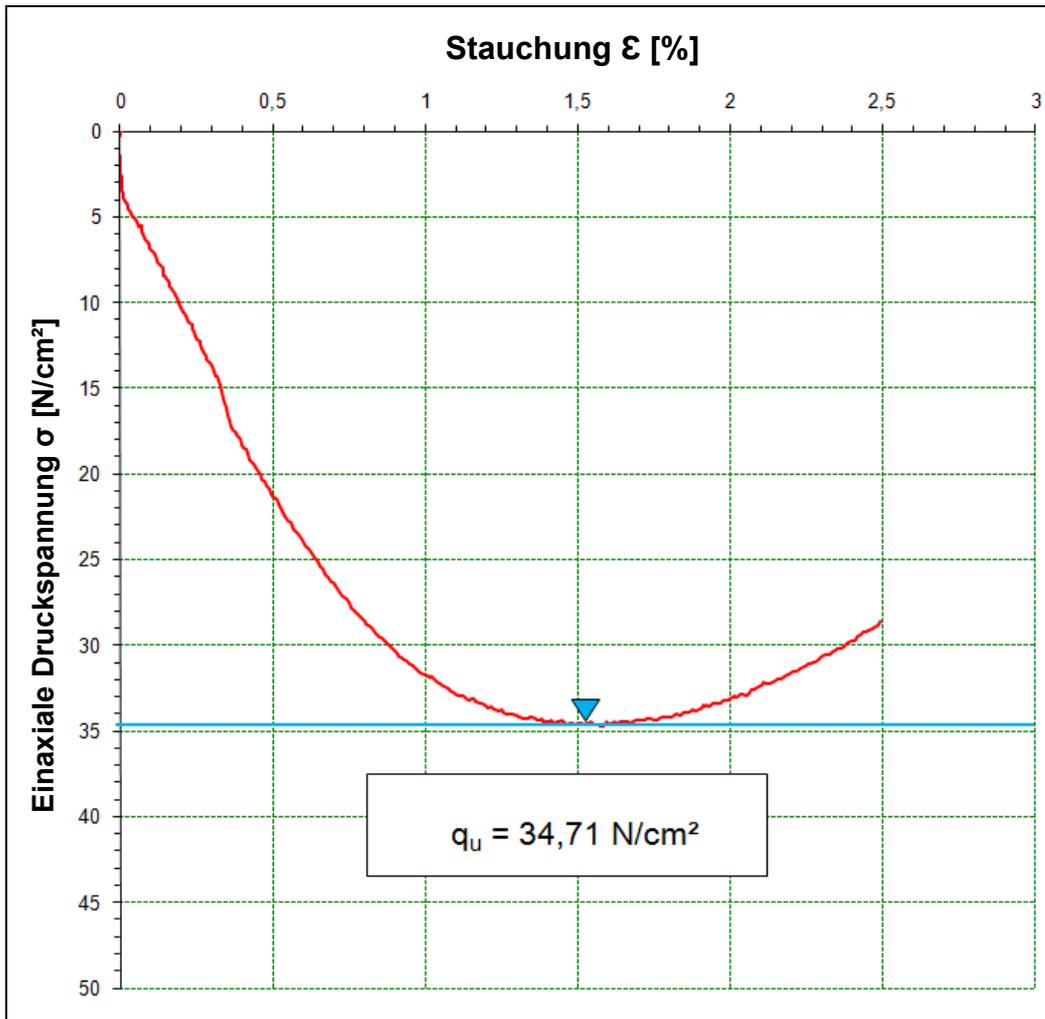


## Anlage 15: Einaxialversuche der Probenreihe 18

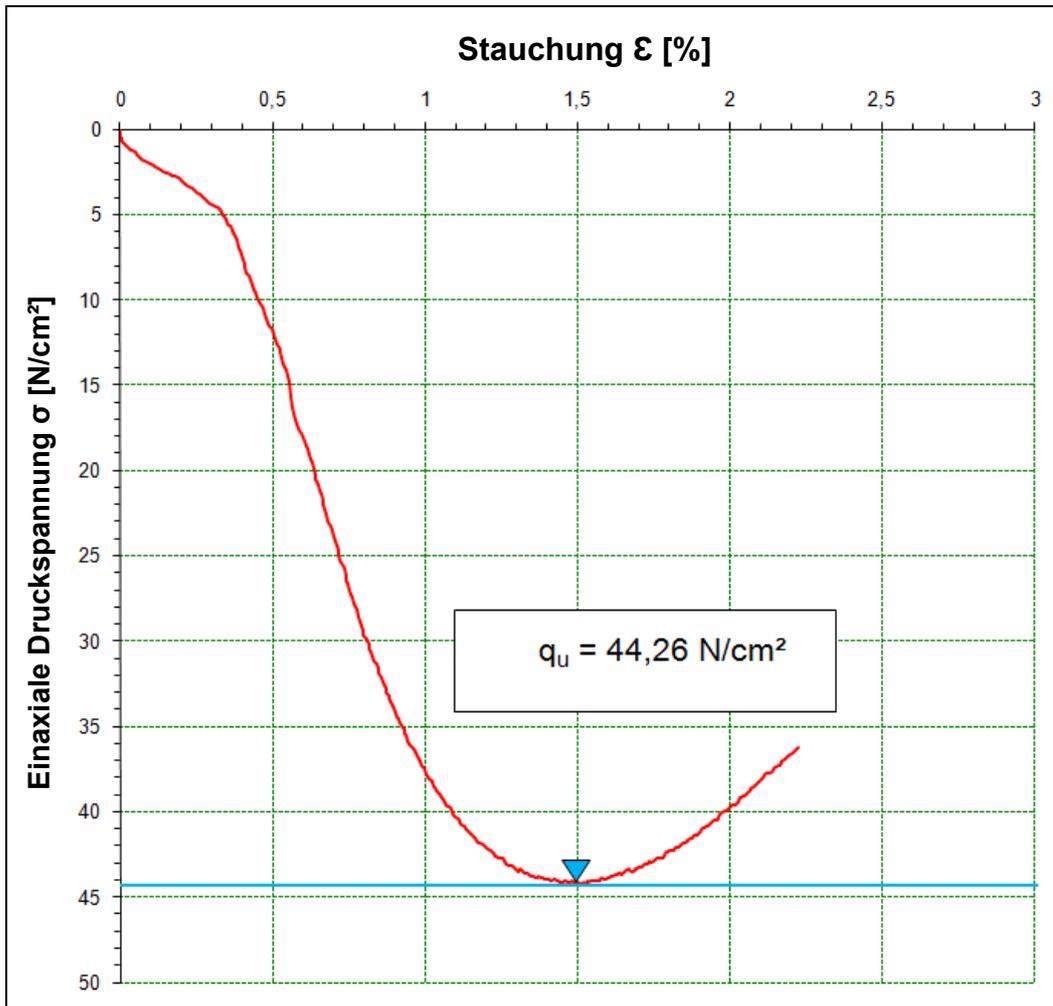
Probe **18/1-1**: Einaxiale Druckfestigkeit nach 14 Tagen



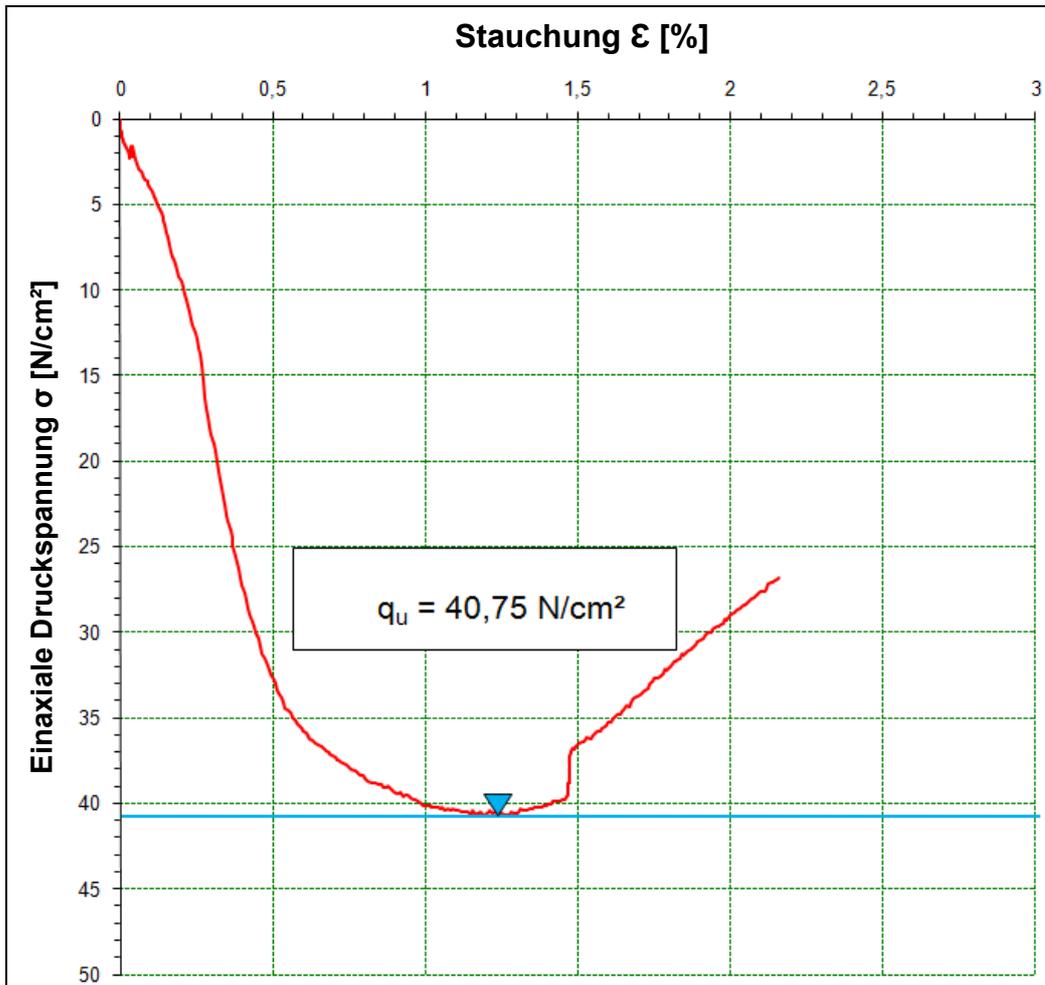
Probe 18/1-2: Einaxiale Druckfestigkeit nach 14 Tagen



Probe 18/1-3: Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen



Probe 18/1-4: Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen



## Anlage 16: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410: Proben 1-18

Versuch Nr.					1/2-1	2/1-1	2/2-2	3/1	3/2
Probenalter					233	233	233	233	233
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1378,8	1983,1	1998,6	1508,9	1357,8
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1308,4	1928,0	1805,0	1308,2	1325,5
3	Masse Behälter	$m_B$	g		334,3	332,5	298,8	297,7	297,2
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1044,5	1650,6	1699,8	1211,2	1060,6
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	974,1	1595,5	1506,2	1010,5	1028,3
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	70,4	55,1	193,6	200,7	32,3
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>7,0</b>	<b>3,5</b>	<b>13,0</b>	<b>20,0</b>	<b>3,1</b>

Versuch Nr.					3/3	3/5	4/2	4/4
Probenalter.					233	7	231	7
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1200,6	2355,5	1362,8	2013,2
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1178,6	1989,8	1330,3	1618,6
3	Masse Behälter	$m_B$	g		199,4	716,6	334,4	334,3
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1001,2	1638,9	1028,4	1678,9
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	979,2	1273,2	995,9	1284,3
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	22	365,7	32,5	394,6
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>2,3</b>	<b>28,7</b>	<b>3,3</b>	<b>30,7</b>

Versuch Nr.					5/2	5/4-4	6/1	7/1	9/1-4
Probenalter					233	28	14	14	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		2027,6	2869,0	2052,8	2388,7	2064,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1867,9	2494,6	1728,0	2087,3	1695,6
3	Masse Behälter	$m_B$	g		728,4	1151,8	297,7	682,5	297,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1299,2	1717,2	1755,1	1706,2	1766,8
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1139,5	1342,8	1430,3	1404,8	1397,9
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	159,7	374,4	324,8	301,4	368,9
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>14,0</b>	<b>27,9</b>	<b>22,7</b>	<b>21,5</b>	<b>26,5</b>

Versuch Nr.					9/2-1	9/3-1	9/3-2	9/4-1	9/4-2
Probenalter.					28	28	7	14	7
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1736,1	2352,8	1722,7	2081,8	2056,2
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1434,8	2069,2	1400,2	1720,8	1668,4
3	Masse Behälter	$m_B$	g		174,1	653,0	298,8	334,4	334,3
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1562	1699,8	1423,9	1747,4	1721,9
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1260,7	1416,2	1101,4	1386,4	1334,1
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	301,3	283,6	322,5	361,0	387,8
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>21,5</b>	<b>20,0</b>	<b>29,3</b>	<b>26,0</b>	<b>29,1</b>

Versuch Nr.					9/5-4	12/2-3	12/2-4	13/2-1
Probenalter					28	28	28	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		2101,2	2930,6	2301,5	1724,1
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1797,0	2609,5	2005,3	1407,7
3	Masse Behälter	$m_B$	g		334,4	1151,8	539,9	297,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1766,8	1778,8	1761,6	1426,4
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1462,8	1457,7	1465,4	1110,0
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	304,0	321,1	296,2	316,4
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>20,8</b>	<b>22,0</b>	<b>20,2</b>	<b>28,5</b>

Versuch Nr.					13/1-1	13/1-3	14/1-2	13/2-1
Probenalter.					28	28	14	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		922,5	2261,5	2434,8	1852,8
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		814,4	1936,0	2104,5	1558,4
3	Masse Behälter	$m_B$	g		334,4	539,9	714,3	168,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	588,1	1721,6	1720,5	1684,1
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	480,0	1396,1	1390,2	1389,7
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	108,1	325,5	330,3	294,4
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>22,5</b>	<b>23,3</b>	<b>23,8</b>	<b>28,5</b>

Versuch Nr.					14/1-3	14/1-4	12/3-1	12/3-4
Probenalter					14	28	14	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		2281,2	2268,0	1951,2	2064,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1917,7	1944,2	1580,9	1695,6
3	Masse Behälter	$m_B$	g		712,5	547,4	172,0	297,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1568,7	1720,6	1779,2	1766,8
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1205,2	1396,8	1408,9	1397,9
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	363,5	323,8	370,3	368,9
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>30,2</b>	<b>23,2</b>	<b>26,3</b>	<b>26,4</b>

Versuch Nr.					16/1-2	16/1-3	16/1-4	13/1-1
Probenalter.					28	28	28	28
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		934,2	1934,5	2216,1	2052,8
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		824,7	1644,3	1902,8	1728,0
3	Masse Behälter	$m_B$	g		334,3	171,8	539,9	297,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	599,9	1762,7	1676,2	1755,1
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	490,4	1472,5	1362,9	1430,3
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	109,5	290,2	313,3	324,8
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>22,3</b>	<b>19,7</b>	<b>23,0</b>	<b>22,5</b>

Versuch Nr.					17/1-1	17/1-2	17/2-1	17/2-3	17/1-4
Probenalter in Tagen					28	28	28	14	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		2107,5	1974,3	1970,1	2130,5	1852,8
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1783,7	1665,3	1659,6	1792,3	1558,4
3	Masse Behälter	$m_B$	g		297,7	171,2	171,8	334,4	168,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1809,8	1803,1	1798,3	1796,1	1684,1
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1486,0	1494,1	1487,8	1457,9	1389,7
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	323,8	309,0	310,5	338,2	294,4
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>21,8</b>	<b>20,7</b>	<b>20,9</b>	<b>23,2</b>	<b>28,2</b>

Versuch Nr.					17/3-4	17/3-5	17/4-1	17/4-2	17/4-4
Probenalter.					7	3	7	14	7
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1690,7	1876,1	2580,9	2018,9	2052,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1365,5	1569,7	2179,2	1665,4	1659,6
3	Masse Behälter	$m_B$	g		171,8	172,9	702,3	173,9	193,3
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1518,9	1703,2	1878,6	1845,0	1859,2
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1193,7	1396,8	1476,9	1531,5	1466,3
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	325,2	306,4	401,7	353,5	392,9
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>27,2</b>	<b>21,9</b>	<b>27,2</b>	<b>23,1</b>	<b>26,8</b>

Versuch Nr.					18/1-2	18/1-3	18/1-4	18/1-1
Probenalter.					28	28	14	14
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		934,2	1934,5	2216,1	2261,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		824,7	1644,3	1902,8	1936,0
3	Masse Behälter	$m_B$	g		334,3	171,8	539,9	539,9
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	599,9	1762,7	1676,2	1721,6
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	490,4	1472,5	1362,9	1396,1
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	109,5	290,2	313,3	325,5
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>22,3</b>	<b>19,7</b>	<b>23,0</b>	<b>23,3</b>

## Anlage 17: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410: Proben Fischhofgasse

Versuchsreihe Fischhofgasse Nr.					1/2	1/2	1/3	2/1	2/2	2/3
Probenalter in Wochen					43	43	43	43	43	43
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1686,9	948,7	1316,6	1246,4	889,1	1113,4
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1463,6	794,4	1122,1	1062,1	782,4	962,1
3	Masse Behälter	$m_B$	g		542,9	157,5	309,4	297,2	334,4	332,5
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1144,0	791,2	1007,2	949,2	554,7	780,9
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	920,7	636,9	812,7	764,9	448,0	629,5
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	223,3	154,3	194,5	184,3	106,7	151,4
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>24,2</b>	<b>24,2</b>	<b>23,9</b>	<b>24,1</b>	<b>23,8</b>	<b>24,0</b>

Versuch Nr.					3/1	3/2	3/3	4/1	4/2	4/3
Probenalter in Wochen					43	43	43	43	43	43
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1256,4	1234,9	1144,0	1127,6	1035,6	1145,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1011,8	980,7	874,4	1016,8	842,1	875,9
3	Masse Behälter	$m_B$	g		332,5	309,4	157,5	712,5	297,2	157,5
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	923,9	925,5	986,5	415,1	738,4	987,9
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	679,3	671,3	716,9	304,3	544,9	718,4
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	244,6	254,2	269,6	110,8	193,5	271,1
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>36,0</b>	<b>37,9</b>	<b>37,6</b>	<b>36,4</b>	<b>35,5</b>	<b>37,8</b>

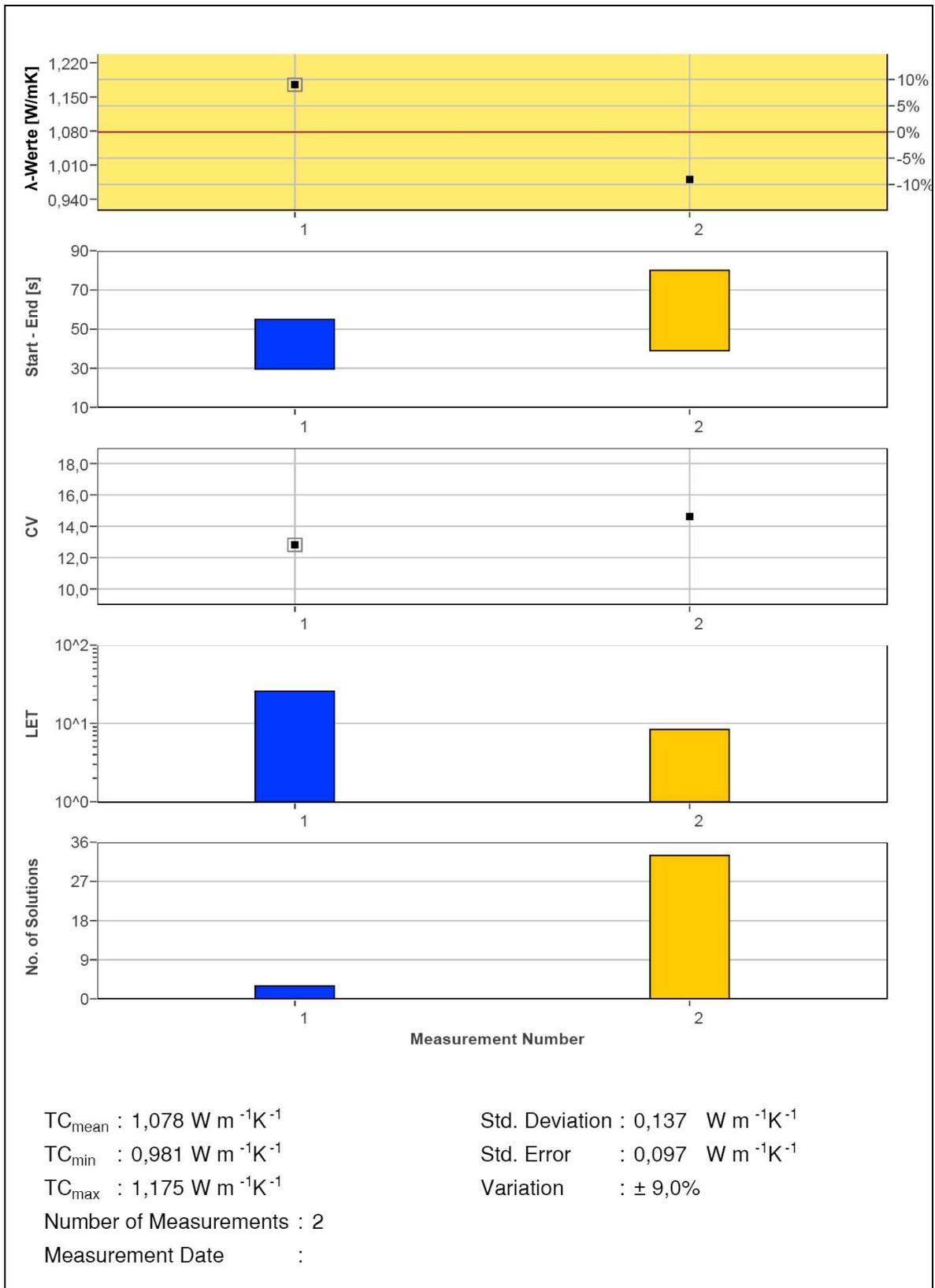
Anlage 18: Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM B 4410 nach der Wärmeleitfähigkeitsmessung der Proben 9,12,17:

Versuchsreihe Leoben Nr.					17/3-3	17/3-2	17/3-5	9/6-2	9/6-3
Probenalter					28	28	28	28	28
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1852,8	1866,0	1876,1	1448,5	1912,5
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1558,4	1562,3	1569,7	1213,9	1599,2
3	Masse Behälter	$m_B$	g		168,7	172,9	172,9	169,4	173,7
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1684,1	1693,1	1703,2	1279,1	1739,2
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1389,7	1389,4	1396,8	1044,5	1425,9
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	294,4	304,0	306,4	234,5	313,3
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>21,2</b>	<b>21,9</b>	<b>21,9</b>	<b>22,5</b>	<b>22,0</b>

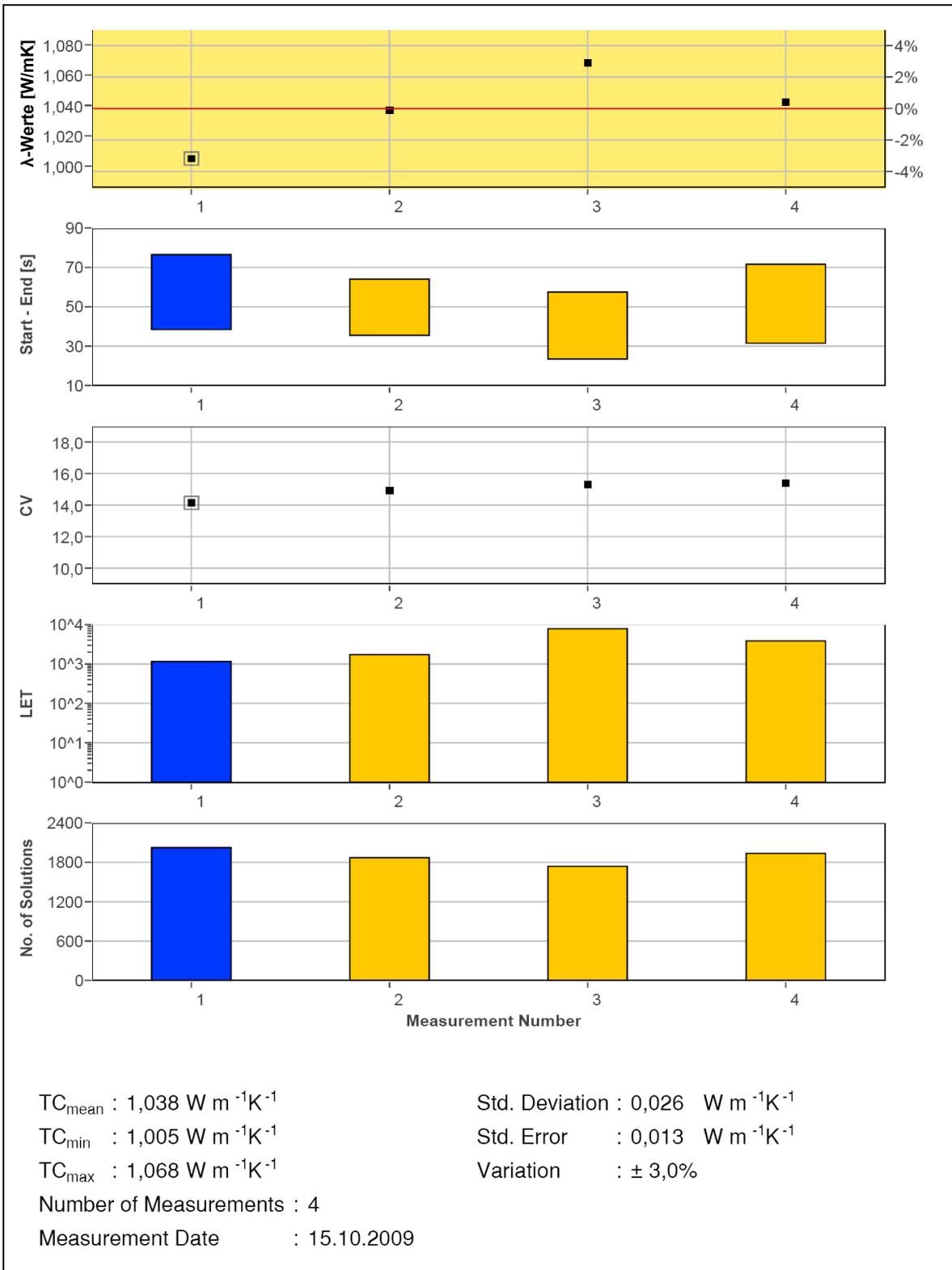
Versuchsreihe Leoben Nr.					9/6-5	12/3-3	12/3-5
Probenalter					28	28	28
1	Probe feucht + Behälter	$m_f + m_B$	g		1852,8	1856,0	1871,1
2	Probe trocken + Behälter	$m_d + m_B$	g		1558,4	1562,3	1569,7
3	Masse Behälter	$m_B$	g		168,7	172,9	172,9
4	Masse Probe feucht	$m_f$	g	1-3	1684,1	1693,1	1702,6
5	Masse Probe trocken	$m_d$	g	2-3	1389,7	1389,4	1396,8
6	Masse Wasser	$m_w$	g	4-5	294,4	303,1	307,4
7	<b>Wassergehalt</b>	w	%	6:5	<b>21,2</b>	<b>21,8</b>	<b>21,8</b>

## Anlage 19: Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte Probenreihe 9

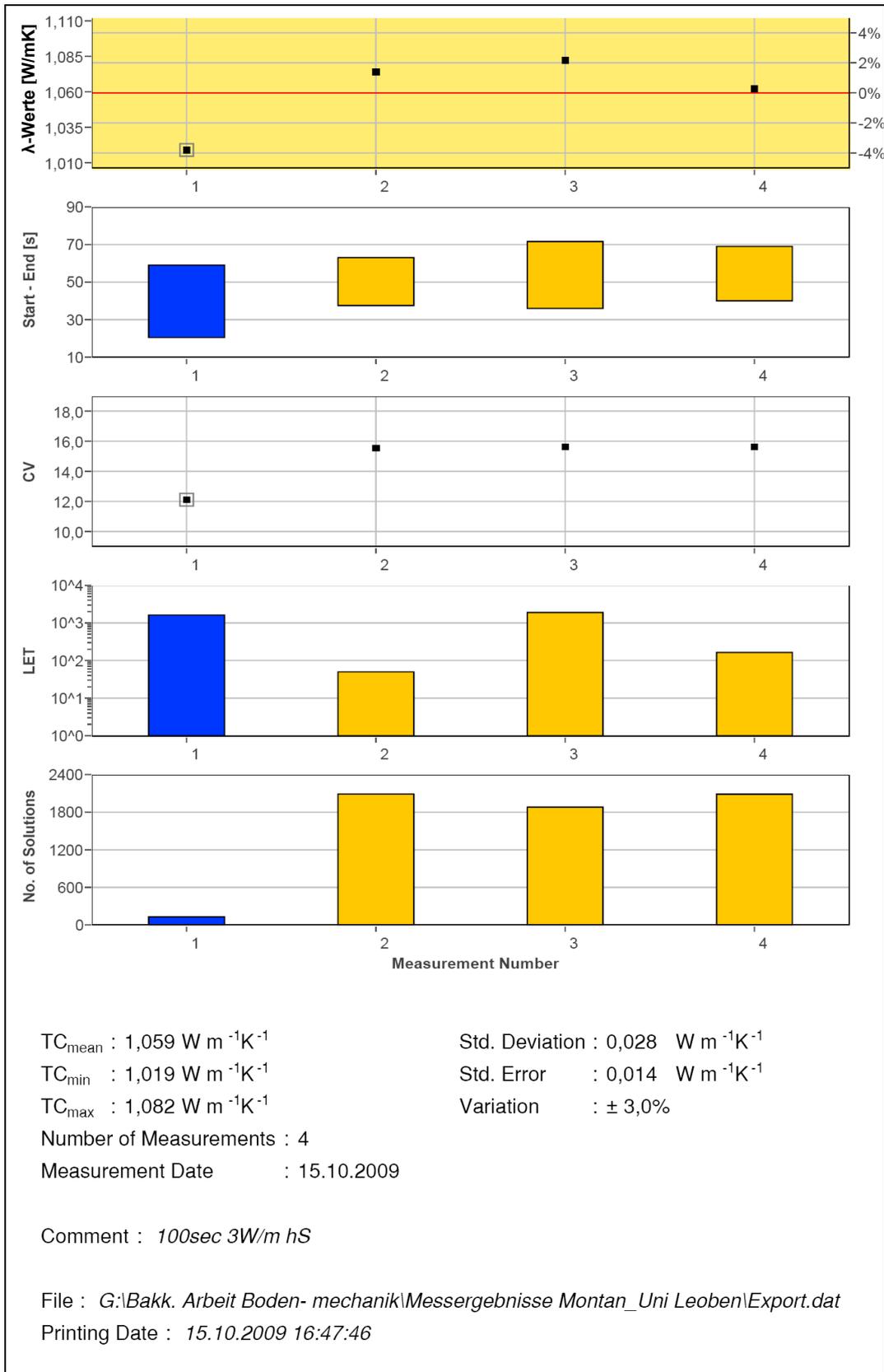
Probe **9/6-2**



Probe 9/6-3

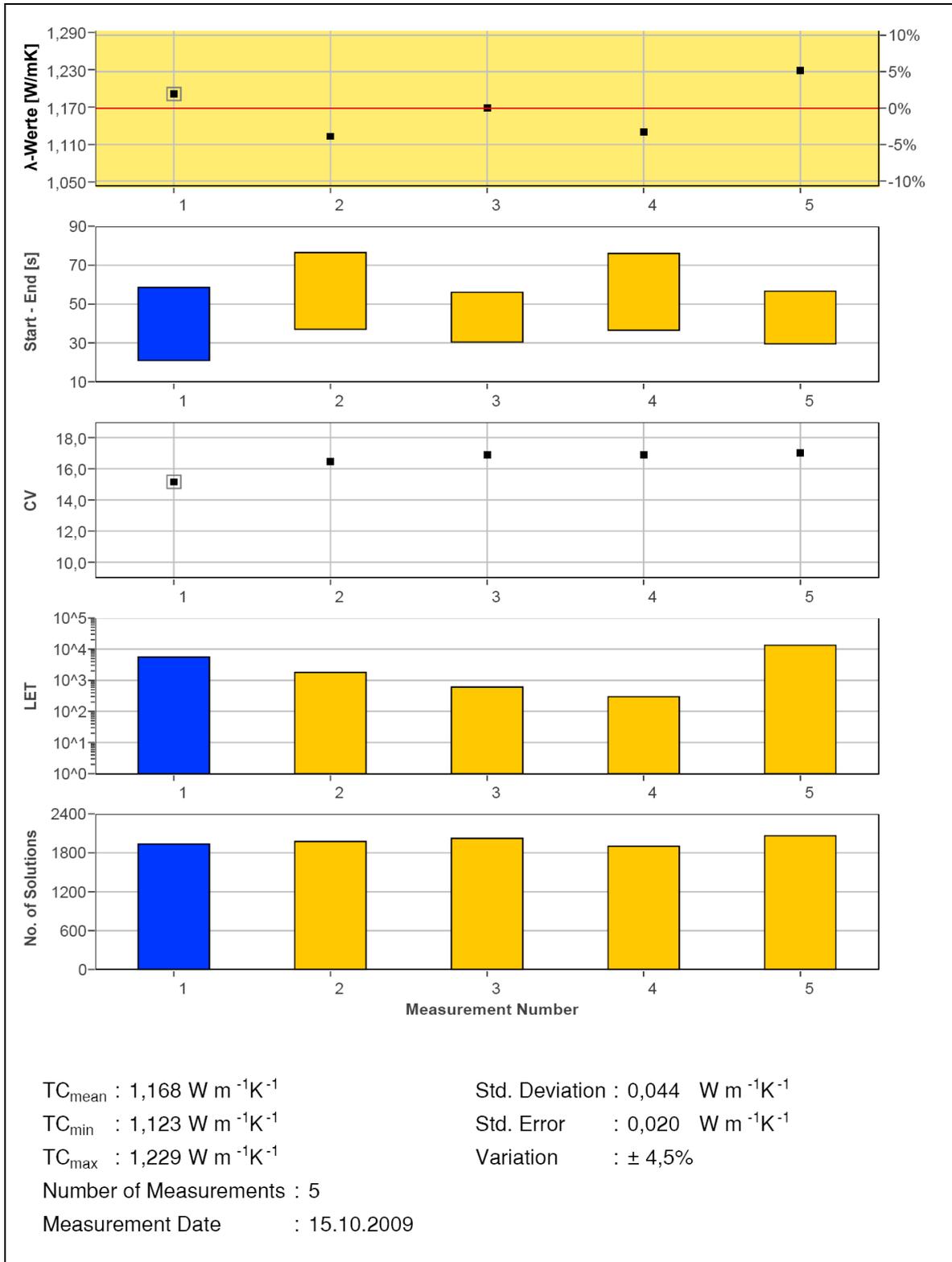


Probe 9/6-5

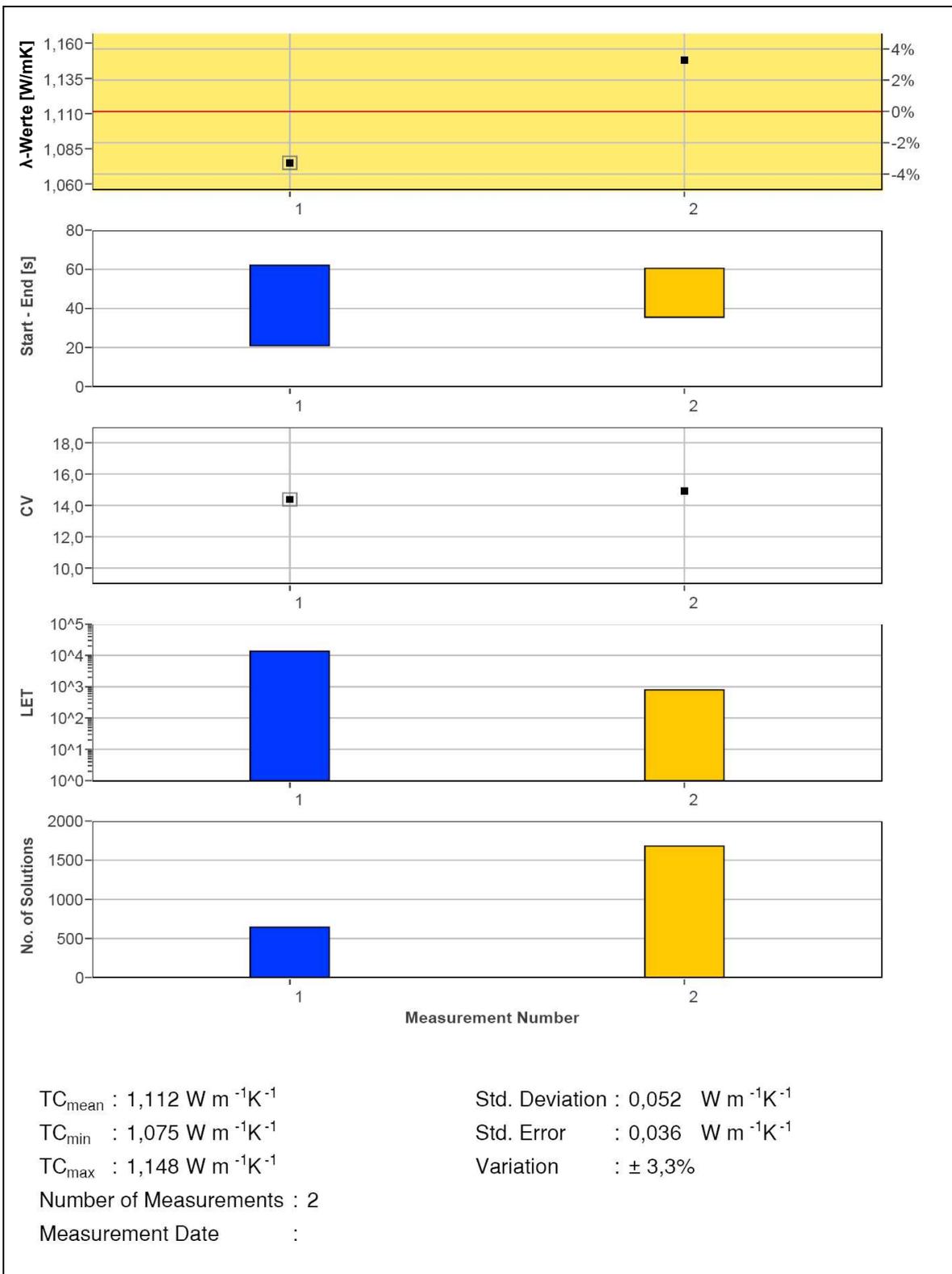


Anlage 20: Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte Probenreihe 12

Probe 12/3-3

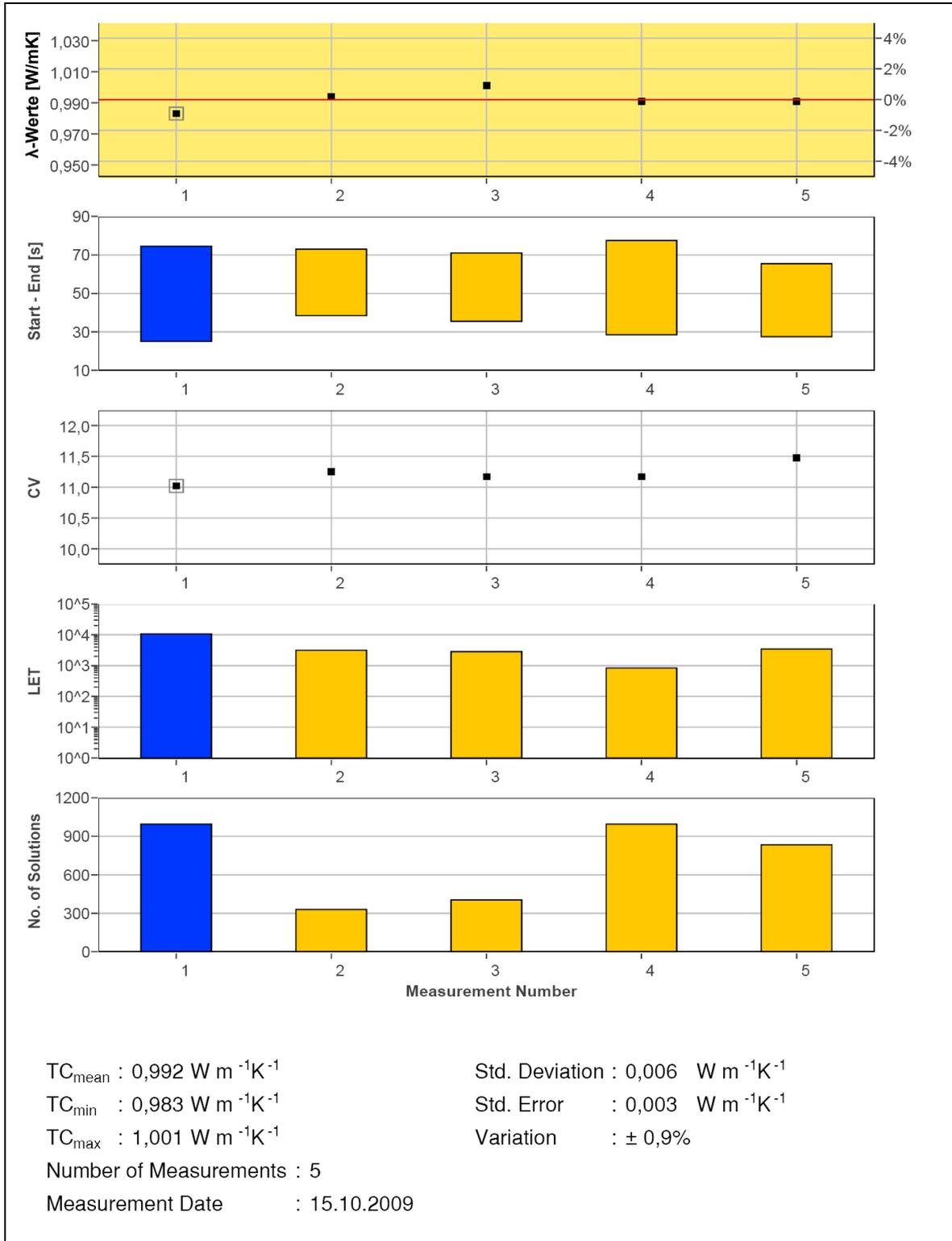


Probe 12/3-5

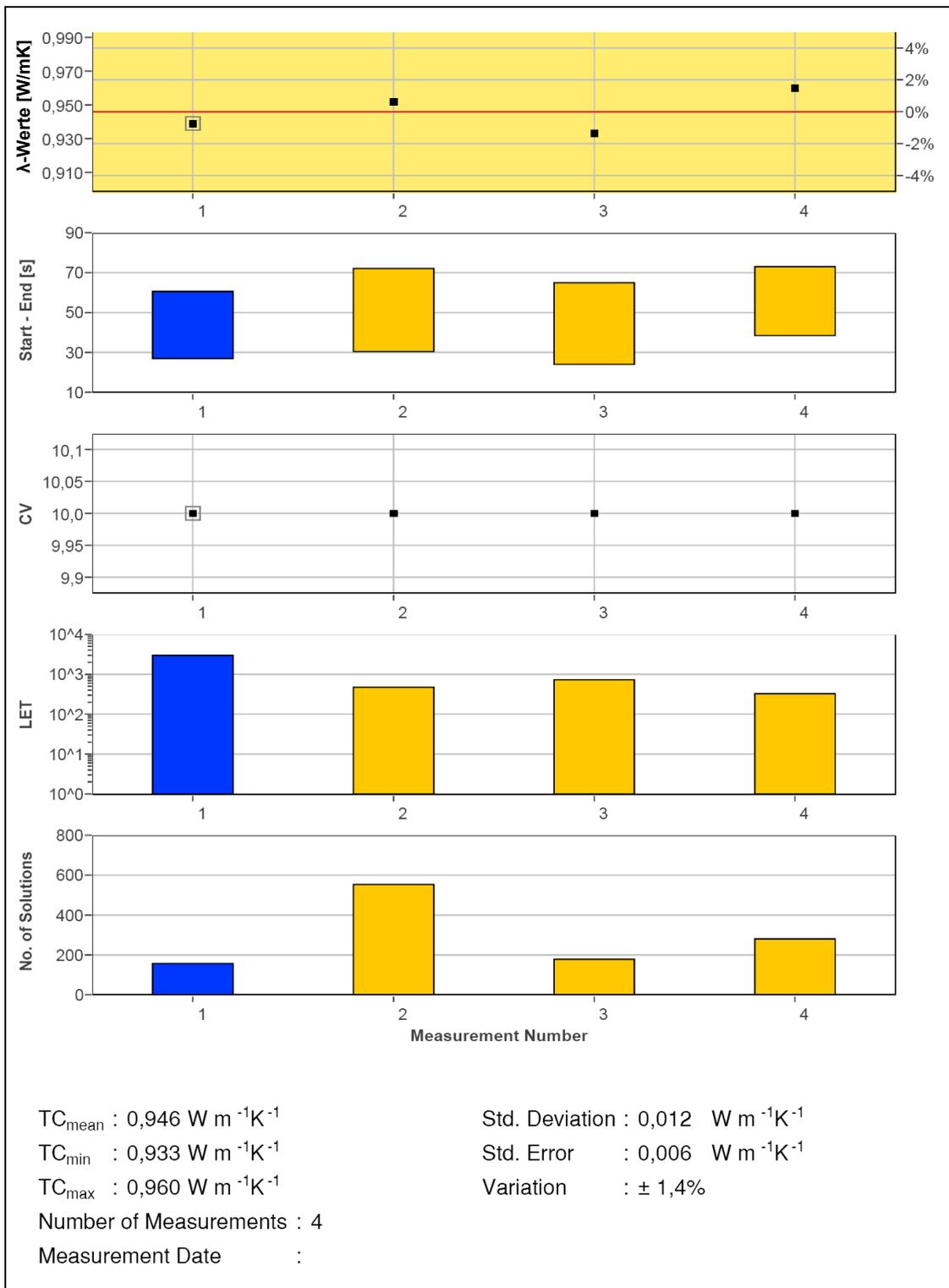


Anlage 21: Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte Probenreihe 17

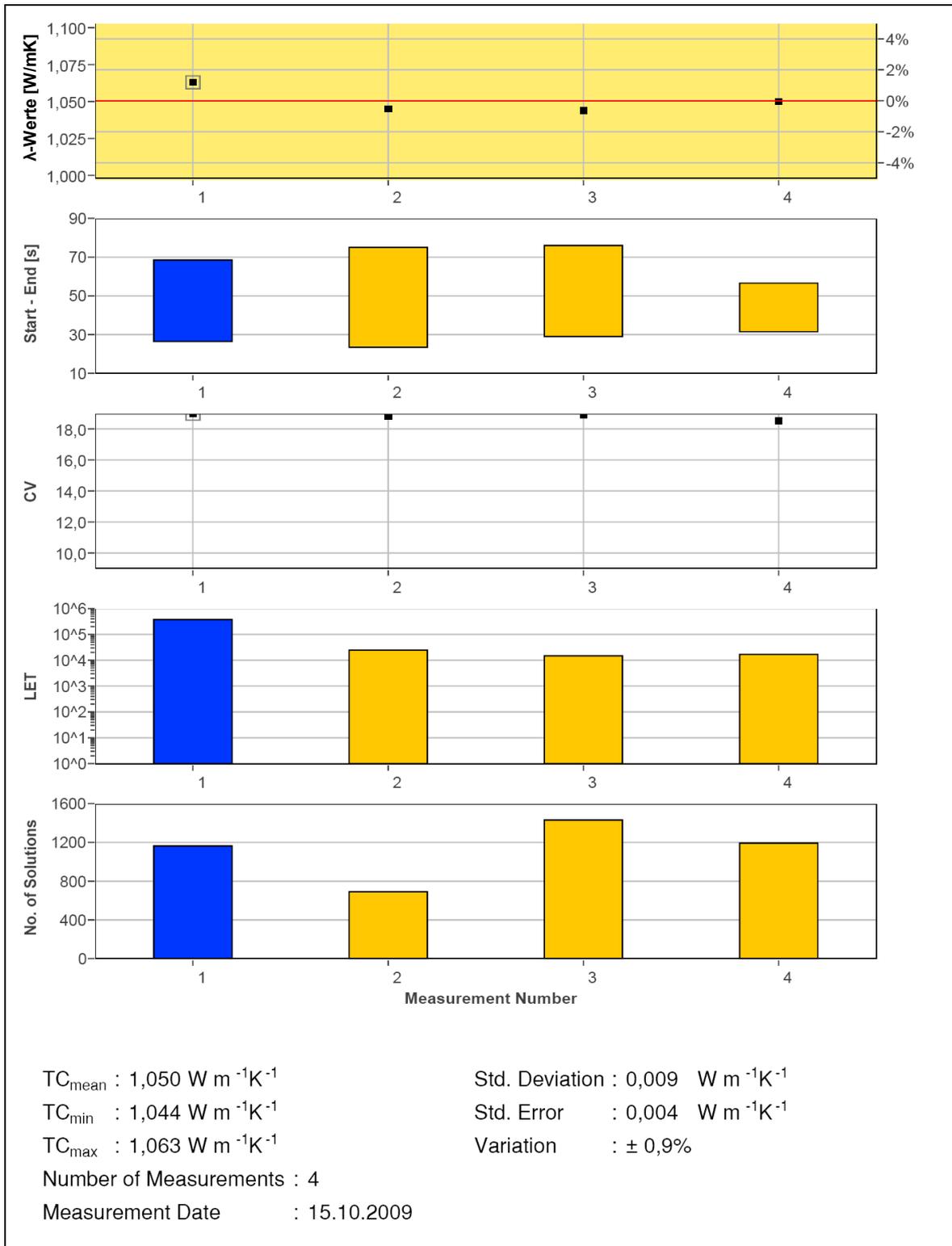
Probe 17/3-3



Probe 17/3-5



Probe 17/3-2



## Anlage 22: Formblatt K6E-Mobilbagger

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN		Firma:		Formblatt K6E					
Bau: Steirer				Datum: 12.12.2009		Seite			
Angebot Nr.: Masterarbeit				Preisbasis: 31.12.2008		1			
A	ÖBGL-Nr.: <b>3145 - 0160</b>	Gerät: <b>Mobilbagger</b>							
	Nutzl.: Ln =	m <sup>3</sup> /Stunde	Masse: <b>16,00 to</b>	mittl. NW: 159.880,24					
B	n= 5 Jahre v= 50 Monate a+v= 2,3 % rep= 2,2 %								
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur		
1		Mobilbagger	80,00	16,00 to	159.880,24	3.677,25	3.517,37		
1	A	Anbauhydraulik			5.014,43	115,55	110,46		
1	3182-0040	Tieföffel 0,40 m <sup>3</sup>		0,4	2.543,55	76,31	53,41		
C	Summe :		80,00	16,40 to	167.438,2	3.869,1	3.681,2		
	GHP - Index		131,30%		219.846,4	5.080,1	4.833,5		
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		3.048,1	3.866,8		
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%		
	Kosteneinteilung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €	
E	Beistellkosten je Monat					1.546,7	2.320,1	3.048,1	
F	Beistellkosten je Stunde				169,0 h/mon	9,15	13,73	18,04	
G	Bedienung incl. Wartung				1,10				
H	Betriebsst		Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,18		13,48		
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile								
K	Gerätekosten je Einsatz				Summe: F bis J	1,10	9,15	27,21	18,04
L	Kosten je VE = GSS/Ln								
					MLP	GZaL	GZaS	GZaG	
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 33,00	15,00%	15,00%	15,00%	
N	Gerätepreis je Einsatz				L*H	36,30	10,52	31,29	20,74
O	Preis (Lohn + Sonstiges)					46,82	52,03		
P	Preis pro Einheit					98,85			

## Anlage 23: Formblatt K6E-LKW mit Kran

Bau: Steirer		Firma:		<b>Formblatt K6E</b>					
Angebot Nr.: Masterarbeit				Datum: 11.12.2009	Seite				
				Preisbasis: 31.12.2008	2				
A	ÖBGL-Nr.: <b>2922 - 0235</b>	Gerät: <b>LKW, Dreiachser</b>							
	Nutzl.: Ln =	m <sup>3</sup> /Stunde	Masse: <b>14,00 to</b>	mittl. NW: 134.444,74					
B	n= 5 Jahre v= 55 Monate a+v= 2,1 % rep= 2,2 %								
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur		
1		LKW - 3 Achser	235,00	14,00 to	134.444,74	2.823,34	2.957,78		
1	2935-0090	Ladekran		1,38	22.237,89	511,62	489,09		
1	C	Zweischalengreifer (0,5m <sup>3</sup> )			3.706,31	85,03	81,39		
C	Summe :		235,00	15,38 to	160.388,9	3.420,0	3.528,3		
	GHP - Index		131,30%		210.590,7	4.490,4	4.632,6		
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		2.694,3	3.706,1		
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%		
	Kostenteckung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €	
E	Beistellkosten je Monat					1.482,4	2.223,7	2.694,3	
F	Beistellkosten je Stunde				169,0 h/mon	8,77	13,16	15,94	
G	Bedienung incl. Wartung				1,10				
H	Betriebsst	Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,2			43,99		
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile								
K	Gerätekosten je Einsatz				Summe: F bis J	1,10	8,77	57,15	15,94
L	Kosten je VE = GSS/Ln								
					MLP	GZaL	GZaS	GZaG	
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 33,00	15,00%	15,00%	15,00%	
N	Gerätepreis je Einsatz				L*H	36,30	10,09	65,72	18,33
O	Preis (Lohn + Sonstiges)					46,39		84,06	
P	Preis pro Einheit						130,44		

## Anlage 24: Formblatt K6E-Vibrationsplatte

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN		Firma:		Formblatt K6E				
Bau: Steirer				Datum: 10.12.2009		Seite		
Angebot Nr.: Masterarbeit				Preisbasis: 31.12.2008		3		
A	ÖBGL-Nr.: <b>3515 - 0060</b>	Gerät: <b>Vibrationsplatten, reversierbar</b>						
	Nutzl.: Ln =	m3/Stunde	Masse: <b>0,55 to</b>	mittl. NW:		15.624,66		
B	n= 4 Jahre v= 30 Monate a+v= 3,8 % rep= 2,6 %							
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur	
1	3515-0060	Vibrationsplatte	8,00	0,55 to	15.624,66	593,74	406,24	
1	E	Transporteinrichtung			2.656,19	100,94	69,06	
C	Summe :		8,00		18.280,9	694,7	475,3	
	GHP - Index		131,30%		24.002,8	912,1	624,1	
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		547,3	499,3	
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%	
	Kosteneinteilung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €
E	Beistellkosten je Monat					199,7	299,6	547,3
F	Beistellkosten je Stunde		169,0 h/mon			1,18	1,77	3,24
G	Bedienung		incl. Wartung		1,10			
H	Betriebsst	Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,125			0,94	
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile							
K	Gerätekosten je Einsatz		Summe: F bis J		1,10	1,18	2,71	3,24
L	Kosten je VE = GSS/Ln							
					MLP	GZaL	GZaS	GZaG
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 33,00	15,00%	15,00%	15,00%
N	Gerätepreis je Einsatz		L*H		36,30	1,36	3,11	3,72
O	Preis (Lohn + Sonstiges)						6,84	
P	Preis pro Einheit							



## Anlage 26: Formblatt K6E-Fugenfräse

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN			Firma:		Formblatt K6E			
Bau: Steirer					Datum: 11.12.2009	Seite		
Angebot Nr.: Masterarbeit					Preisbasis: 31.12.2008	5		
A	ÖBGL-Nr.: <b>5243 - 0014</b>	Gerät: <b>Fugenfräse</b>						
	Nutzl.: Ln =	m <sup>3</sup> /Stunde	Masse: <b>1,10 to</b>	mittl. NW:	21.874,52			
B	n= 5 Jahre v= 35 Monate a+v= 3,3 % rep= 1,8 %							
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur	
1		Fugenfräse	14,00	1,1 to	21.874,52	721,64	393,89	
C	Summe :		14,00		21.874,5	721,6	393,9	
	GHP - Index		131,30%		28.721,2	947,5	517,2	
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		568,5	413,7	
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%	
	Kosteneinteilung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €
E	Beistellkosten je Monat					165,5	248,2	568,5
F	Beistellkosten je Stunde		169,0 h/mon			0,98	1,47	3,36
G	Bedienung		incl. Wartung		1,10			
H	Betriebsst	Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,125			1,64	
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile							
K	Gerätekosten je Einsatz		Summe: F bis J		1,10	0,98	3,11	3,36
L	Kosten je VE = GSS/Ln							
					MLk	GZaL	GZaS	GZaG
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 30,00	15,00%	15,00%	15,00%
N	Gerätepreis je Einsatz		L*H		33,00	1,13	3,57	3,87
O	Preis (Lohn + Sonstiges)				34,13		7,44	
P	Preis pro Einheit				41,57			

## Anlage 27: Formblatt K6E-Straßenfertiger

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN			Firma:		Formblatt K6E			
Bau: Steirer					Datum: 11.12.2009	Seite		
Angebot Nr.: Masterarbeit					Preisbasis: 31.12.2008	6		
A	ÖBGL-Nr.: <b>5202 - 0600</b>	Gerät: <b>Straßenfertiger mit Ausziehböhlen</b>						
	Nutzl.: Ln =	m <sup>3</sup> /Stunde	Masse: <b>15,00 to</b>	mittl. NW: 226.739,24				
B	n= 6 Jahre v= 45 Monate a+v= 2,7 % rep= 2,8 %							
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur	
1		Straßenfertiger	79,00	15,00 to	226.739,24	6.121,96	6.348,70	
1	A	Rampenfahrwerk			15.988,02	431,68	447,66	
C	Summe :		79,00	15,00 to	242.727,3	6.553,6	6.796,4	
	GHP - Index		131,30%		318.700,9	8.604,9	8.923,6	
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		5.163,0	7.138,9	
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%	
	Kosteneinteilung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €
E	Beistellkosten je Monat					2.855,6	4.283,3	5.163,0
F	Beistellkosten je Stunde		169,0 h/mon			16,90	25,35	30,55
G	Bedienung		incl. Wartung		1,10			
H	Betriebsst	Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,15			11,09	
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile							
K	Gerätekosten je Einsatz		Summe: F bis J		1,10	16,90	36,44	30,55
L	Kosten je VE = GSS/Ln							
					MLP	GZaL	GZaS	GZaG
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 33,00	15,00%	15,00%	15,00%
N	Gerätepreis je Einsatz		L*H		36,30	19,43	41,90	35,13
O	Preis (Lohn + Sonstiges)				55,73		77,03	
P	Preis pro Einheit				132,77			

## Anlage 28: Formblatt K6E-LKW

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN			Firma:		Formblatt K6E			
Bau: Steirer					Datum: 10.12.2008	Seite		
Angebot Nr.: Masterarbeit					Preisbasis: 31.12.2008	7		
A	ÖBGL-Nr.: <b>2922 - 0235</b>	Gerät: <b>LKW, Dreiachser</b>						
	Nutzl.: Ln =	m3/Stunde	Masse: <b>14,00 to</b>	mittl. NW: 134.444,74				
B	n= 5 Jahre v= 55 Monate a+v= 2,1 % rep= 2,2 %							
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur	
1		LKW - 3 Achser	235,00	14,00 to	134.444,74	2.823,34	2.957,78	
C	Summe :		235,00	14,00 to	134.444,7	2.823,3	2.957,8	
	GHP - Index		109,60%		147.351,4	3.094,4	3.241,7	
D	Abminderung A+V und REP		60,00%	80,00%		1.856,6	2.593,4	
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%	
	Kosteneinteilung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €
E	Beistellkosten je Monat					1.037,4	1.556,0	1.856,6
F	Beistellkosten je Stunde		169,0 h/mon			6,14	9,21	10,99
G	Bedienung		incl. Wartung		1,10			
H	Betriebsst	Kw h*/kw h*S/l*1.2	l/kwh:	0,2			43,99	
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile							
K	Gerätekosten je Einsatz		Summe: F bis J		1,10	6,14	53,20	10,99
L	Kosten je VE = GSS/Ln							
					BMLP	GZaL	GZaS	GZaG
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 29,07	15,00%	15,00%	15,00%
N	Gerätepreis je Einsatz		L*H		31,98	7,06	61,18	12,63
O	Preis (Lohn + Sonstiges)				39,04		73,81	
P	Preis pro Einheit				112,85			

## Anlage 29: Formblatt K7-Einrichten Baustelle

<b>PREISERMITTLUNG</b>		institut für baubetrieb + bauwirtschaft  TUG		<b>Formblatt K7</b>	
Steirer Masterarbeit		Datum:	13.12.2009	Seite 1	
		Preisbasis:	31.12.2008		
Pos.-Nr., Menge, Einheit, Positionsstichwort, Kostenentwicklung je Einheit	Std/E	Lohn	Sonstiges	Einheitspreis	
<b>1.) Einrichten der Baustelle</b>					
1000 lfm Künette					
Auf und Abladen, Transport von 2 Container					
Aufwandswert 2,5 h / Container					
Lo: 2 Container x 1 Std/h x 2,5 h/Cont. X 90 €				<b>450,00</b>	
Aufbau der Container					
Aufwandswert: 1,5 Std/Container					
2 x 1,8 Std / Container	<b>3,60</b>				
Baustellensicherung					
2 Mann Zeitaufwand 5 h	<b>10,00</b>				
Lieferung LKW					
23 €/h Lohn, 20 €/h Gerät					
Fahrer 5h					
Lo: 23 € 23 x 5		<b>115,00</b>			
Gerät: 20 € 20 x 5			<b>100,00</b>		
Material: 9,6 €/lfm					
leichter Bauzaun 500 lfm, h = 2,0 m				<b>4800,00</b>	
Verkehrsschilder					
6 Stück x 35 €/Stk				<b>210,00</b>	
	<b>13,60</b>	<b>115,00</b>	<b>5560,00</b>		
MLk: 30 €		<b>17,25</b>	<b>834,00</b>		
GZ Lohn 15 %					
GZ Sonstiges 15 %		<b>132,25</b>	<b>6394,00</b>		
		<b>473,10</b>			
		<b>Lo:</b>	<b>605,30</b>		
		<b>So:</b>	<b>6394,00</b>		
		<b>PP:</b>	<b>6999,30</b>		
		<b>EP:</b>		<b>7,0 €/lfm</b>	











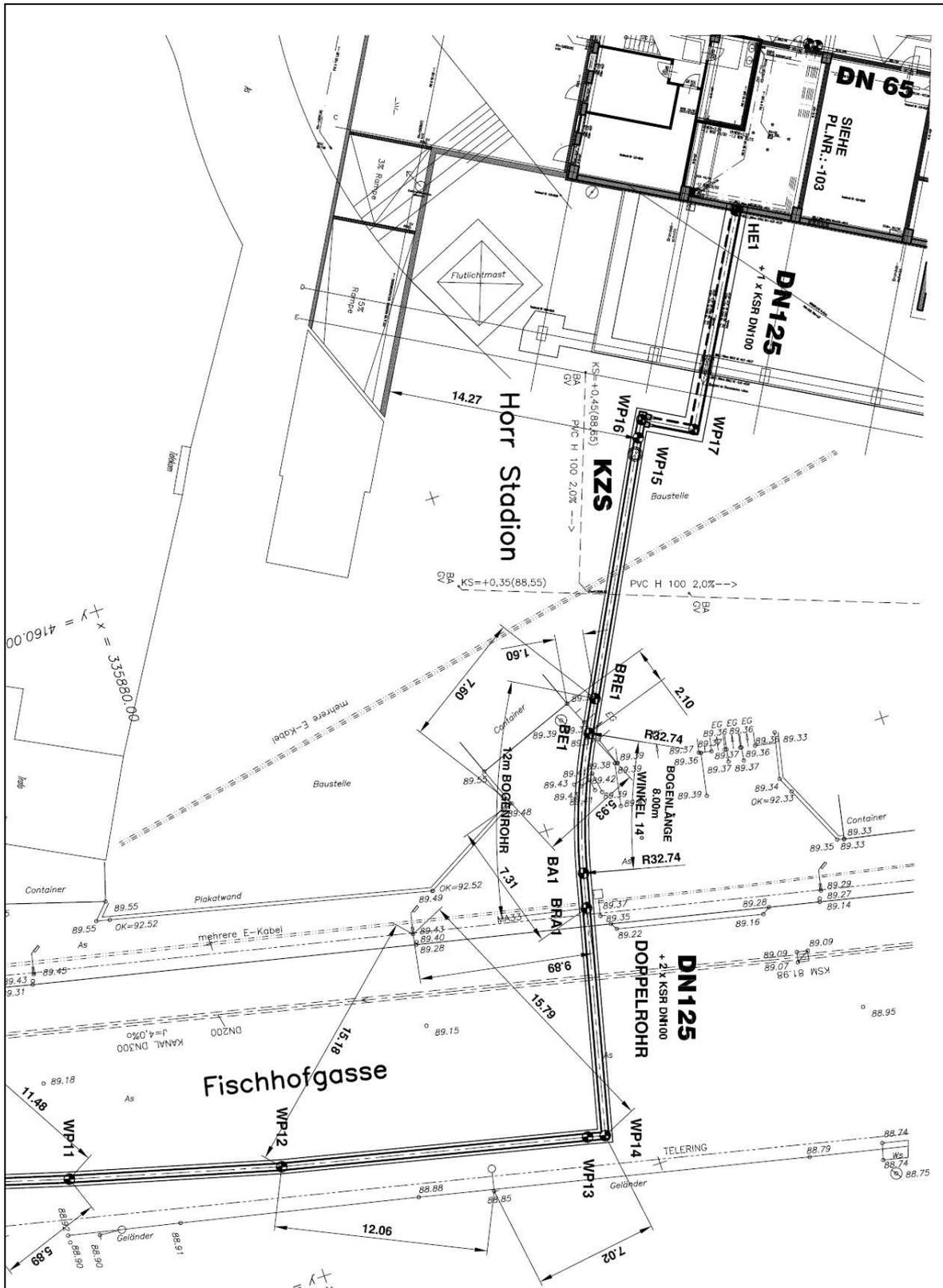








Anlage 39: Ausführungsplan Fischhofgasse



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Die Halde in Fohnsdorf in der Steiermark, Österreich .....	2
Abbildung 2.2: Übersicht über Verfüllmaterialien (nach ONR 23131, 2005).....	4
Abbildung 2.3: Vergleichende Darstellung der Kornverteilungen der Bettungsmaterialien Thermosand, Quarzsand und Recyclingsand (Henögl, 2006).....	6
Abbildung 2.4: Aufbau einer Fernwärme-Rohrkünette .....	8
Abbildung 2.5: Querschnitte von verschiedenen Kunststoffverbundmantelrohren .	9
Abbildung 3.1: Einfluss der Probekörperschlankheit auf die einaxiale Druckfestigkeit von Dichtwandmassen (Meseck, 1987) .....	17
Abbildung 4.1: Varimixer	21
Abbildung 4.2: Rührstab .....	21
Abbildung 4.3: Ausbreittisch (nach ÖNORM EN12350-5, 2009) .....	23
Abbildung 4.4: Trichter	24
Abbildung 4.5: Holzstößel .....	24
Abbildung 4.6: Ablauf des Ausbreitmaßversuches (nach ÖNORM EN 12350-5, 2009).....	24
Abbildung 4.7: Der gefüllte Trichter Abbildung 4.8: Die ausgebreitete Masse .....	25
Abbildung 4.9: 1-Liter-Mensurzylinder mit den Innenabmessungen 340 x 62,5 mm.....	29
Abbildung 4.10: Messurzylinder gefüllt mit Thermosandmischung	30
Abbildung 4.11: Messurzylinder gefüllt mit Thermosandmischung verschlossen	30
Abbildung 4.12: gelagerte SVM-Proben in Styroporschalungen.....	34
Abbildung 4.13: Presse zur Durchführung der einaxialen Druckprüfung .....	35
Abbildung 4.14: Zerstörte SVM-Probe beim Einaxialversuch .....	36
Abbildung 4.15: Geschlossener und geöffneter Trockenofen.....	38
Abbildung 5.1: Lageplan der Versuchsstrecke in der Fischhofgasse .....	41
Abbildung 5.2: Querschnitt der Versuchsstrecke in der Fischhofgasse.....	42
Abbildung 5.3: Herstellen der Schürfen.....	43
Abbildung 5.4: Rammsonde nach Beletz (nach ONR 23131, 2005 und ONR FW 110A, 1999) .....	44
Abbildung 5.5: Verwendete Rammsonde Fischhofgasse .....	45

Abbildung 5.6: Stechzylinder (von links) mit Führungszylinder und Schlaghaube nach ÖNORM B 4401-1,1980 .....	46
Abbildung 5.7: Ablauf mit Stechzylinder, Führungszylinder, Schlaghaube und Herausdrücken der Probe mit anschließendem Einaxialversuch.....	47
Abbildung 5.8: Ausstechzylinder nach ÖNORM B 4401-1, 1980.....	48
Abbildung 5.9: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/1 .....	49
Abbildung 5.10: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/2.....	49
Abbildung 5.11: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 1/3.....	50
Abbildung 5.12: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/1 g/ cm <sup>3</sup> .....	51
Abbildung 5.13: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/2.....	51
Abbildung 5.14: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 2/3.....	52
Abbildung 5.15: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/1 .....	53
Abbildung 5.16: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/2.....	53
Abbildung 5.17: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 3/3.....	54
Abbildung 5.18: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/1 .....	55
Abbildung 5.19: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/2.....	55
Abbildung 5.20: Einaxialversuch Fischhofgasse Probe 4/3.....	56
Abbildung 6.1: Abbildung der Wärmeleitung einer Halbraumsonde (Teka, 2007)	58
Abbildung 6.2: Vergleich Halbraumsonde (links) und Vollraumsonde (Pagitsch, 2009) .....	59
Abbildung 6.3: Labor des Instituts für Geophysik an der Montanuniversität.....	60
Abbildung 6.4: Halbraumsonde mit Probe	61
Abbildung 6.5: Halbraumsonde mit hydraulischer Handpumpe (Teka, 2007) .....	61
Abbildung 6.6: Einbringen der Wärmeleitcreme	61
Abbildung 6.7: Vollraumsonde.....	61
Abbildung 6.8: $\lambda$ - Diagramm (Teka, 2007).....	62
Abbildung 6.9: $\lambda$ -Werte in einer Normalverteilung nach Gauß.....	63
Abbildung 6.10: $\lambda$ -Diagramme der Probe 9/6-3 .....	64
Abbildung 6.11: $\lambda$ -Diagramme der Probe 9/6-5 .....	64
Abbildung 6.12: $\lambda$ -Diagramm der Probe 12/3-3 .....	64
Abbildung 6.13: $\lambda$ -Diagramme der Probe 17/3-5 .....	64
Abbildung 6.14: $\lambda$ -Diagramme der Probe 17/3-3 .....	65
Abbildung 6.15: $\lambda$ -Diagramme der Probe 17/3-5 .....	65
Abbildung 6.16: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und $\lambda$ -Werten.....	65
Abbildung 7.1: Verfahren der negativen Auslese der Thermosandmischungen...	67

Abbildung 7.2: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 17 .....	68
Abbildung 7.3: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 17 .....	68
Abbildung 7.4: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 12 .....	69
Abbildung 7.5: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 12 .....	69
Abbildung 7.6: Verlauf der Einaxialergebnisse der Probenreihe 9 .....	70
Abbildung 7.7: Verlauf der Wassergehalte der Probenreihe 9 .....	70
Abbildung 7.8: Einaxialversuch Probe 17/3-1.....	73
Abbildung 7.9: Einaxialversuch Probe 17/2-4.....	73
Abbildung 7.10: Einaxialversuch Probe 17/4-1.....	73
Abbildung 7.11: Einaxialversuch Probe 17/3-4.....	74
Abbildung 7.12: Einaxialversuch Probe 17/4-3.....	74
Abbildung 7.13: Einaxialversuch Probe 17/4-4.....	74
Abbildung 7.14: Einaxialversuch Probe 17/2-3.....	75
Abbildung 7.15: Einaxialversuch Probe 17/4-2.....	75
Abbildung 7.16: Einaxialversuch Probe 17/1-4.....	75
Abbildung 7.17: Einaxialversuch Probe 17/1-2.....	76
Abbildung 7.18: Einaxialversuch Probe 17/2-1.....	76
Abbildung 7.19: Einaxialversuch Probe 17/1-1.....	77
Abbildung 7.20: $\lambda$ -Wert Probe 17/3-3 .....	77
Abbildung 7.21: $\lambda$ -Wert Probe 17/3-5 .....	78
Abbildung 7.22: $\lambda$ -Wert Probe 17/3-2 .....	78
Abbildung 8.1: Aufbau des Formblattes K7, Institut für Baubetrieb u. Bauwirtschaft, TU Graz, 2009 .....	80
Abbildung 8.2: Aufteilung der kalkulierten Herstellpreise in % .....	84
Abbildung 9.1: Verfüllung der fließfähigen, stabilisierten.....	86

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Ausbreitmaßklassen (ÖNORM B 4710-1, 2007).....	14
Tabelle 4.1: Dichten $\rho_d$ der Mischungskomponenten.....	20
Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Thermosandmischungen.....	22
Tabelle 4.3: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche.....	26
Tabelle 4.4: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche, Fortsetzung von Tab. 4.3 ....	27
Tabelle 4.5: Ergebnisse der Ausbreitmaßversuche, Fortsetzung von Tab. 4.4 ....	28
Tabelle 4.6: Ergebnisse der Absetzmaßversuche.....	31
Tabelle 4.7: Ergebnisse der Absetzmaßversuche, Fortsetzung Tab. 4.6.....	32
Tabelle 4.8: Ergebnisse der Absetzmaßversuche, Fortsetzung der Tab. 4.7.....	33
Tabelle 4.9: Ergebnisse der Einaxialversuche.....	37
Tabelle 4.10: Ergebnisse der Ofentrocknung.....	39
Tabelle 4.11: Trockendichten $\rho_d$ der Mischungen 9, 12 und 17 .....	40
Tabelle 5.1: Zusammensetzung der Thermosandmischungen	
Fischhofgasse (kg).....	43
Tabelle 5.2: Zusammensetzung der Thermosandmischungen	
Fischhofgasse (Gew-%).....	43
Tabelle 5.3: Rammsondierungswerte Fischhofgasse.....	45
Tabelle 5.4: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 1 .....	48
Tabelle 5.5: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 2 .....	50
Tabelle 5.6: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 3 .....	52
Tabelle 5.7: Laborergebnisse Fischhofgasse Abschnitt 4 .....	54
Tabelle 7.1: Ausbreit- und Absetzmaßergebnisse der Probenreihe 17 .....	71
Tabelle 7.2: Laborergebnisse der Probe 17 nach 3 und 7 Tagen.....	72
Tabelle 7.3: Laborergebnisse der Probe 17 nach 14 und 28 Tagen.....	72
Tabelle 9.1: Datenblatt Thermosandmischung 17 .....	86