



Masterarbeit

zum Erwerb
des akademischen Grades Diplomingenieur
der Studienrichtung Geotechnical and Hydraulic Engineering

von

Beate Thaller, BSc

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik, Grundbau
und Numerische Geotechnik
an der Technischen Universität Graz

Thema der Masterarbeit:

Evaluierung der Bettung von Wasserleitungs- und Kanalrohren im Grazer Stadtgebiet

Betreuer:

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Begutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Im Grazer Stadtgebiet werden für Reparaturen und Neuverlegungen von Wasser- und Abwasserleitungen unterschiedliche Bettungsmaterialien verwendet. Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung und Evaluierung dieser Materialien. Um den Anwendungskontext zu verdeutlichen, werden zunächst verschiedene Methoden der Verlegung von Rohrleitungen in einem Überblick beschrieben. An den Materialien *Rundkorn* und *SSMplus* wurden Laboruntersuchen zur Ermittlung der relevanten Materialeigenschaften durchgeführt. Die ermittelten Eigenschaften werden unter Hinzunahme der üblichen Normen diskutiert. Für das Material Thermosand wird die theoretische Anwendbarkeit als Bettungsmaterial erörtert. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die im Grazer Stadtgebiet verwendeten Rohrbettungsmaterialien den Anforderungen entsprechen.

Abstract

In the city area of Graz different bedding materials are used for repairs and new installations of water and sewage pipes. This thesis deals with the investigation and evaluation of these materials. In order to clarify the application context, various methods of laying pipelines are first described in an overview. Laboratory tests were carried out on the materials *round grain* and *SSMplus* to determine the relevant material properties. The measured properties are discussed with the addition of the usual standards. For the material *thermo sand* the theoretical applicability as a bedding material is discussed. The results of the work show that the pipe bedding materials used in the city area of Graz meet the requirements.

Inhalt

1	Erdverlegung von Rohrleitungen	1
1.1	Generelle Anforderungen an das Bettungsmaterial und an die Leitungszone	1
1.2	Verlegungsmethoden	2
1.2.1	Offene Verlegungsmethode nach ÖNORM EN 1610	2
1.2.2	Grabungsarme Verlegungsmethoden	4
1.3	Bettungsmaterial	7
1.3.1	Stabilisierte Verfüllmaterialien SVM	7
1.3.2	Konventionelle Verfüllmaterialien	9
2	Versuche zum Bettungsmaterial SSMplus	10
2.1	Einaxialer Druckversuch	10
2.1.1	Grundlagen	10
2.1.2	Versuchsaufbau	12
2.1.3	Durchführung	13
2.1.4	Ergebnisse	14
2.2	Bestimmung des Wassergehaltes	23
2.2.1	Durchführung	23
2.2.2	Ergebnis	24
2.3	Bestimmung von Feucht- und Trockendichte	25

3	Versuche Bettungsmaterial Rundkorn	26
3.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung	26
3.1.1	Grundlegendes	26
3.1.2	Aufbau und Durchführung	27
3.1.3	Ergebnisse	28
3.2	Lockerste und dichteste Lagerung	31
3.2.1	Grundlegendes	31
3.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	32
3.2.3	Ergebnisse	34
3.3	Rahmenscherversuch	35
3.3.1	Theoretische Grundlagen nach ÖNORM B 4416	36
3.3.2	Aufbau und Durchführung	38
3.3.3	Ergebnisse	39
4	Thermosand	42
4.1	Entstehung	42
4.2	Wärmeleitung im Boden	42
4.3	Laboruntersuchungen am Thermosand	42

5	Rohrleitungsbau im Grazer Stadtgebiet	45
5.1	Rohrmaterialien	45
5.2	Schäden an Rohrleitungen	46
5.3	Rohrleitungsbau im Bereich Wasserversorgung	47
5.3.1	Offene Bauweise bei Neubau	47
5.3.2	Punktuelle Grabungen	47
5.4	Rohrleitungsbau im Bereich Abwasserentsorgung	48
6	Zusammenfassung	49
	Literaturverzeichnis	50
	Anhang	53

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

A_i	[m ²]	Anfangsquerschnittsfläche der Probe
E_u	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
ΔH	[m]	Änderung der Probenhöhe unter Druck
H	[m]	Anfangsprobenhöhe
P	[N]	Vertikale Belastung der Probe
S_i	[%]	Siebdurchgang
V	[m ³]	Volumen der Probe
$V_{l,d}$	[m ³]	Volumen bei lockerster und dichtester Lagerung

Kleine Buchstaben

c	[kN/m ²]	Kohäsion
d_{10}	[-]	Korngröße bei 10 % des Siebdurchgangs
d_{30}	[-]	Korngröße bei 30 % des Siebdurchgangs
d_{60}	[-]	Korngröße bei 60 % des Siebdurchgangs
m_f	[kg]	Masse der Probe (inkl. Feuchtanteil)
m_d	[kg]	Masse der getrockneten Probe
m_i	[kg]	Masse der Siebrückstände
m_0	[kg]	Gesamtmasse

Griechische Buchstaben

ε_v	[%]	vertikale Stauchung
$\Delta\varepsilon_v$	[%]	Änderung der vertikalen Stauchung
ρ	[g/cm ³]	(Feucht-)dichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
$\rho_{l,d}$	[g/cm ³]	Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung
σ	[kN/m ²]	Normalspannung
σ_v	[kN/m ²]	Vertikalspannung
$\Delta\sigma_v$	[kN/m ²]	Änderung der Vertikalspannung
τ	[kN/m ²]	Schubspannung
φ	[°]	Reibungswinkel
ω	[%]	Wassergehalt der Bodenprobe

1 Erdverlegung von Rohrleitungen

1.1 Generelle Anforderungen an das Bettungsmaterial und an die Leitungszone

Der Bau von Abwasserleitungen und Wasserversorgungssystemen stellt hohe Anforderungen an die Planung, fachgerechte Ausführung, Instandhaltung und Betriebssicherheit. Nachfolgend sind die wesentlichsten Anforderungen aufgelistet:

- **Tragfähigkeit**

Das Bettungsmaterial muss über eine ausreichende Tragfähigkeit verfügen um weitere auf den Verfüllkörper einwirkende dynamische und statische Lasten wie Verkehrslasten oder Erdlasten in Folge der Weiterverfüllung der Künette aufnehmen zu können.

- **Steifigkeit**

Nach der Verdichtung bzw. Verfestigung muss das Material einen gewissen Widerstand gegen äußere Lasten aufweisen um diese weitestgehend zusammendrückungsfrei abtragen zu können und so Verformungen an Rohren oder Setzungen an der Oberfläche zu vermeiden.

- **Wiederaufgrabbarkeit**

Unter der Wiederaufgrabbarkeit versteht man die händische Abbaubarkeit des Materials mittels Krampen oder Schaufel. Diese muss über die gesamte Nutzungsdauer sichergestellt sein, um Reparaturen oder Neuverlegungen von Rohrleitungen durchführen zu können.

- **Verträglichkeit**

Die Verträglichkeit des Bettungsmaterials zu Rohrleitungen bzw. Leitungsmaterialien muss innerhalb der Nutzungsdauer gewährleistet sein. Weiters muss die Verträglichkeit zum anstehenden Boden und die Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser gegeben sein.

- **Gleichmäßige Produktqualität**

Damit eine Rohrverlegung sinnvoll dimensioniert werden kann, muss die Qualität des Bettungsmaterials und somit die Materialeigenschaften des Bettungsmaterials homogen sein.

- **Auflager**

Das Rohrauflager muss so hergestellt werden, dass keine Punkt- oder Linienlasten auf das Rohr übertragen werden. Zur Vermeidung von Punktlasten, die zu ungleichmäßigen Rohrbeanspruchungen und in Folge zu Radialrissen des Rohres führen können, müssen Aussparungen für Muffen im Auflager hergestellt werden.

1.2 Verlegungsmethoden

1.2.1 Offene Verlegungsmethode nach ÖNORM EN 1610

Bei der offenen Verlegungsmethode wird ein Rohrgraben hergestellt. Dieser wird unter der Berücksichtigung der Standfestigkeit des Bodens mit geböschten oder lotrechten Wänden (Künetten) ausgeführt. Ab einer Grabentiefe von 1,25 m müssen die Künetten verbaut (gepölst) werden, bei nicht standfestem Boden muss die Künette bereits bei einer geringeren Tiefe gepölst werden (nach ÖNORM B 2538, 2018). Der Grabenverbau kann durch eine waagrechte oder lotrechte Pölstung hergestellt werden, welche stufenweise eingebaut wird. Abb. 1 zeigt einen typischen Querschnitt eines Rohrgrabens.

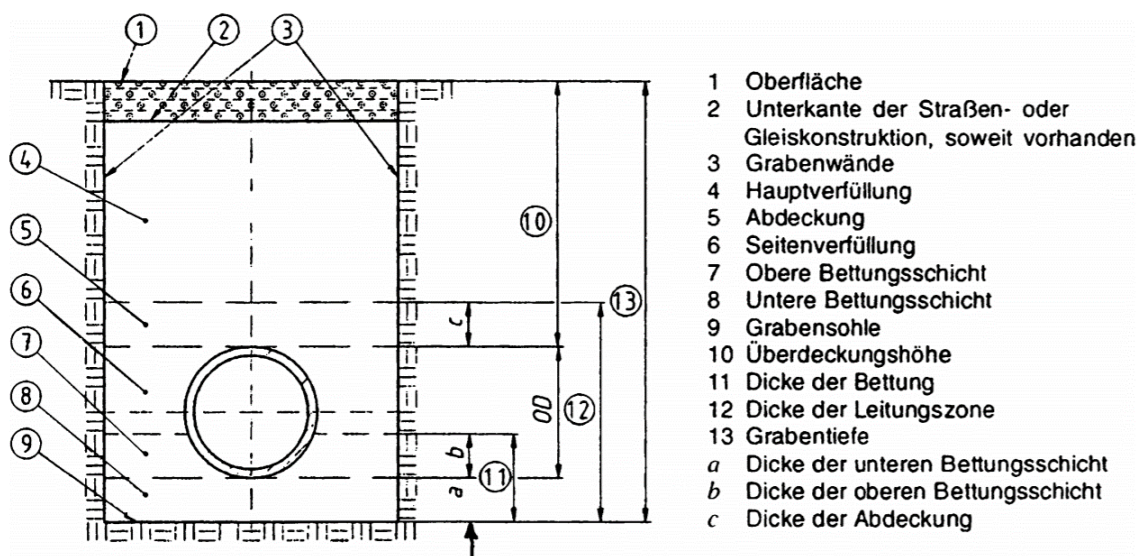


Abb. 1: Rohr, Hauptverfüllung und Leitungszone (nach Krause, 2016)

1.2.1.1 Leitungszone

Die Leitungszone besteht aus der Abdeckung, der Seitenverfüllung, der oberen und der unteren Bettungsschicht.

Die Grabensohle muss verdichtet werden um einen tragfähigen Untergrund zu schaffen. Bei gestörtem oder weichem Untergrund unter der Grabensohle muss dieser entfernt und durch ein passendes Material ausgetauscht werden.

Die untere Bettungsschicht wird mit einem Gefälle hergestellt und verdichtet. Diese muss eine Minstdicke von 100 mm bei normalen Bodenverhältnissen und von 150 mm bei Fels oder festgelagerten Böden erreichen (DIN EN 1610, 2010). Die untere Bettungsschicht für Rohrleitungen kann in vier verschiedenen Bauweisen ausgeführt werden (ÖNORM B 5012, 2015)(Abb. 2):

- **Typ 1**

Das Rohr wird direkt auf die Grabensohle verlegt. Ist kein geeigneter Boden an der Grabensohle für eine unmittelbare Rohrbettung vorhanden, wird das Material ausgehoben und durch ein geeignetes verdichtungsfähiges Bettungsmaterial ausgetauscht

- **Typ 2**

Bei dieser Einbettungsart wird die Grabensohle vorbereitet und besteht aus dem gleichen Material wie die untere und obere Bettungsschicht.

- **Typ 3**

Die Bodeneigenschaften bezüglich der Bodengruppe und Verdichtung sind in der Auflagerzone und der Seitenverfüllung unterschiedlich.

- **Typ 4**

Hier wird das Rohr auf ein Betonaufleger gebettet. Bei flexiblen Rohren ist die ausreichende Tragfähigkeit der Rohre nachzuweisen.

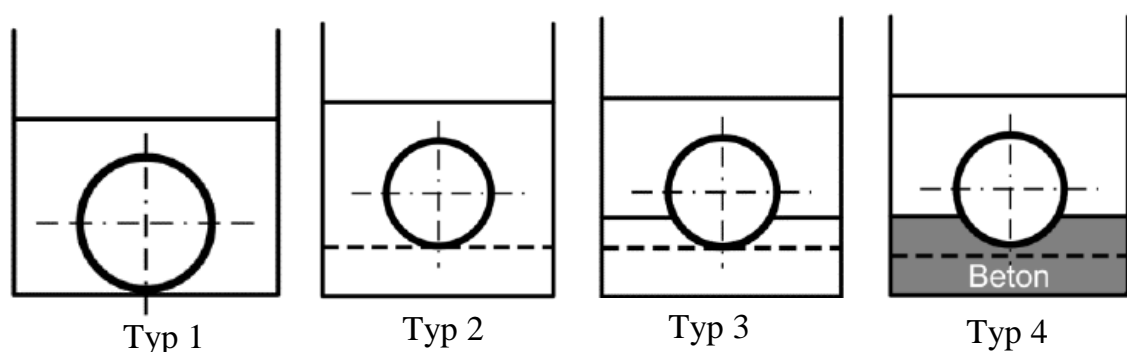


Abb. 2: Einbettungsarten (ÖNORM B 5012, 2015)

Die Höhe der oberen Bettungsschicht ist vom Auflagerwinkel, welcher zwischen 120° und 180° liegt, abhängig.

Es muss eine Überdeckungshöhe der Rohrleitung von mindestens 1,5 m eingehalten werden (nach ÖNORM B 2538), um Einwirkungen durch Umwelteinflüsse (z.B. Einfrieren oder Erwärmen des Wassers in der Rohrleitung), und mechanische Beschädigungen zu verhindern.

1.2.2 Grabungsarme Verlegungsmethoden

Grabungsarme Methoden werden vor allem im städtischen Raum zur Verlegung und Sanierung von Rohrleitungen eingesetzt. Zur Rohrsanierung werden nur zwei Kopflöcher (Start- und Zielgrube) ausgehoben, was Straßenaufbrüche sowie in weiterer Folge Verkehrsbeeinträchtigungen und Belastungen für die Bevölkerung durch Lärm und Staub reduziert und den Baumbestand schont. Der Bau einer neuen Trasse ist nicht notwendig, was vor allem im städtischen Raum einen Vorteil darstellt, da der unterirdische Bauraum begrenzt ist. Die Einsparung von Erd- und Oberflächenarbeiten und darauffolgende Verminderung der Deponiebelastung führt zu einer Baukostenreduzierung. (nach Roscher, 2018)

Um grabenlose Rohrsanierungen durchführen zu können, müssen einige Voraussetzungen gegeben sein. Für die Anwendung des Berstverfahrens muss der umgebende Boden verdrängbar sein, um die zu erneuernde Rohrleitung aufbrechen und in die Grabenverfüllung verdrängen zu können. Außerdem muss ein ausreichender Abstand von mindestens einem Meter von der zu erneuernden Rohrleitung zu Geländeoberfläche und Bauwerken gegeben sein. Bei Aufweitung der Leitung zu einem größeren Rohrdurchmesser sollte der Mindestabstand das Zehnfache des zusätzlich aufgeweiteten Maßes sein. Zu den umgebenden Leitungen ist ebenfalls generell der gleiche Abstand einzuhalten wie zur Geländeoberfläche. Bei sehr lockeren Böden sollte ein größerer Abstand eingehalten werden, da es durch die mechanische Einwirkung zu Setzungen auf Grund der Verdichtung des Bodens kommen kann. Dies gilt auch für dicht gelagerte Böden, die zu Hebungen oder erhöhten Drücken durch die Aufweitung von Rohren führen können. (nach Schad, Vogt-Breyer & Bayer, 2018)

Im Folgenden werden einige Methoden zur grabenlosen Sanierung beschrieben. Da zur Rohrsanierung im Grazer Stadtgebiet überwiegend Berstlining zum Einsatz kommt, wird diese Methode ausführlicher beschrieben.

1.2.2.1 Berstlining

Bei der Rohrerneuerung durch Berstlining wird je nach Krafteinleitung zwischen dem statischen und dem dynamischen Verfahren unterschieden (Abb. 3).

Beim statischen Berstlining wird ein Gestänge von einer hydraulisch betriebenen Lafette von der Startbaugrube durch die Rohrtrasse in die Zielbaugrube eingeschoben. Dort werden die Schneid- oder Berstwerkzeuge mit Aufweitkörper und das neu einzuziehende Rohr montiert. Beim Rückzug des Gestänges wird das Altrohr aufgebrochen und durch den Aufweitkörper in das umgebende Erdreich verdrängt.

Beim dynamischen Berstlining wird mit Hilfe einer in der Zielgrube eingebauten Zugvorrichtung der hydraulisch betriebene Berstkopf durch das Altrohr bewegt. Die bestehende Rohrleitung wird zerstört und verdrängt, gleichzeitig wird das neu zu verlegende Rohr nachgezogen und eingebaut.

Das neu verlegte Rohr kann aus Rohrsegmenten zusammenschweißt oder als Endlosrohr eingesetzt werden und muss den Belastungen des Einziehens und Biegens standhalten. Es werden Rohre aus den Materialien Polyethylen, Duktulguss oder Stahl mit gleicher oder größerer Nennweite eingebaut. Altrohre aus PE, Stahl, Blei oder Duktulguss müssen geschnitten werden, Asbest-, Grauguss-, Beton- und PVC-Rohre können mittels Berstkopf zerstört werden. (nach Roscher, 2018)

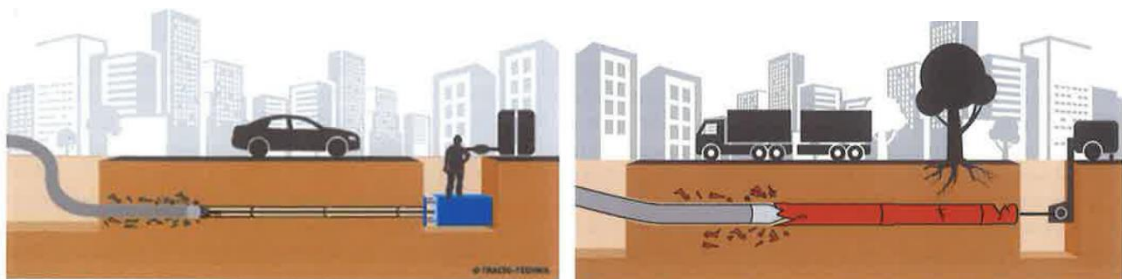


Abb. 3: Statisches (links) und dynamisches (rechts) Berstlining
(Ernst&Sohn, 2017)

1.2.2.2 Pipe-Eating

Bei diesem Verfahren wird der Bohrkopf, ausgestattet mit Meißeln und Brechern, mittels eines Pressbohrgerätes von der Startbaugrube in die Trasse des zu erneuernden Rohres gepresst. Alternativ kann der Bohrkopf auch von der Zielbaugrube gezogen werden. Das Altrohr wird überbohrt, zerstört und abgefördert. Im gleichen Arbeitsschritt wird das neue Rohr mit gleicher oder größerer Nennweite hinter dem Bohrkopf eingebaut. (nach Schad, 2018)

1.2.2.3 Close-Fit-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird ein PE-HD-Rohrstrang in das Altrohr eingebracht, ohne dass letzteres zerstört und abgefördert werden muss. Der Querschnitt des PE-HD-Rohrstranges wird hierzu in warmem Zustand C-förmig gefaltet und wieder abgekühlt. Dies verringert den Querschnitt und erleichtert somit den Einbau des Rohres. Nach dem Einbringen des Rohres wird dieses mit heißem Wasserdampf erwärmt was das Rohr wieder in seine ursprünglich runde Form bringt. Nach der Fertigstellung liegt das neue Rohr eng am Altrohr an. (nach Bosseler, 2018)

1.2.2.4 Rohrstrangling

Hier wird ein vorgefertigter flexibler Rohrstrang in die zu sanierende Rohrleitung eingebaut. Der Durchmesser des neuen Rohres ist kleiner als das Altrohr, wodurch ein Hohlraum entsteht, welcher verdämmt wird.

1.2.2.5 Schlauchlining

Um die Rohrsanierung mittels Schlauchlining durchzuführen, wird ein mit Kunstharz getränkter flexibler Schlauch in die Rohrleitung eingebracht. Dieser wird anschließend thermisch oder mit UV-Licht ausgehärtet und bildet eine neue innere Schicht. (nach Bosseler, 2018)

1.3 Bettungsmaterial

1.3.1 Stabilisierte Verfüllmaterialien SVM

Im Kanal- und Versorgungsleitungsbau werden immer häufiger stabilisierende Sandmischungen zum Verfüllen der Leitungsgräben eingesetzt. Diese können unter anderem auch für Reparaturmaßnahmen an bereits bestehenden Rohrleitungen, zur Ver- und Hinterfüllung von Hohlräumen und beim Bau von Fernwärmeleitungen verwendet werden.

Es gibt mehrere Methoden zu Herstellung der stabilisierten Verfüllmaterialien, die sich vor allem beim verwendeten Ausgangsmaterial unterscheiden (nach Kiesselbach, 1999):

- Zentrale Herstellung unter Verwendung von Ausgangsmaterialien wie Kies und Sand mit anschließendem Transport und Einbau durch Fahrmischer
- Zentrale Herstellung unter Verwendung von Recyclingmaterialien wie Gemische aus Kies, Sand und Recyclingmaterial mit anschließendem Transport und Einbau durch Fahrmischer
- Zentrale Aufbereitung des Aushubmaterials von Leitungsgräben mit anschließendem Transport und Einbau durch Fahrmischer
- Aufbereitung des Aushubmaterials der Leitungsgräben vor Ort

Das Material wird in flüssiger Konsistenz mittels Fahrmischer angeliefert und direkt eingebaut, wodurch eine gleichmäßige Qualität erreicht werden kann. Die hohe Fließfähigkeit ermöglicht ein vollständiges Ummanteln der Rohrleitungen. Es ist keine zusätzliche Verdichtung der Leitungszone notwendig, folglich wirken beim Einbau auch keine zusätzlichen Lasten auf das Rohr. Dies und die Möglichkeit einer geringeren Grabenbreite erleichtert auch den Einbau in schwerer zugänglichen Bereichen. Durch den erschütterungsarmen Einbau werden umliegende Gebäude geschont. (nach Ernst & Sohn, 2015)

Die im Grazer Stadtgebiet verwendete stabilisierte Sandmischung (SSMplus) wird von der Firma Schotter- und Betonwerk Karl Schwarzl, Unterpremstetten, hergestellt. Sie besteht aus Bindemittel, Additiven, Wasser und Füllstoffen wie Sanden, Kiesen oder Steinmehlfüllern und zeichnet sich durch eine kurze Abbindezeit von 18 Stunden aus. Versuche an SSMplus sind in Kapitel 2 beschrieben.

1.3.1.1 Anforderungen an SVM

Für stabilisierte Verfüllmaterialien gelten neben den allgemeinen Anforderungen aus Abschnitt 1.1 noch folgende Anforderungen:
(nach ONR 23131 und ONR FW 110A)

- **Wiederaufgrabbarkeit**

Die Wiederaufgrabbarkeit von SVM wird mittels der einaxialen Druckfestigkeit nachgewiesen. Diese darf nach 28 Tagen einen Wert von 0,6 N/mm² nicht übersteigen.

- **Tragfähigkeit**

Nach der Verfestigung muss das Material über eine ausreichende Tragfähigkeit verfügen. Die Tragfähigkeit wird mittels des einaxialen Druckversuchs nach ÖNORM B 4415 bestimmt und muss nach 28 Tagen Lagerungsdauer einen Mindestwert von 6 N/cm² (\cong 0,06 N/mm²) erreichen.

- **Konsistenz und Fließfähigkeit**

Bei der Einbringung des Materials in die Künette muss eine ausreichende Fließfähigkeit gewährleistet sein. Zur Bestimmung der Konsistenz werden für SVM die Konsistenzklassen nach ÖNORM B 4710-1 von Beton verwendet. Die Konsistenz wird mit dem Ausbreitmaß klassifiziert und muss eine Konsistenzklasse von F59 (fließfähig) erreichen.

- **Absetzmaß**

Das Absetzmaß beschreibt das Absondern von Wasser an der Oberfläche durch Absinken von Feststoffen. Der Absetzvorgang sollte nach 24 Stunden höchstens 2 % betragen und danach keinen nennenswerten Zuwachs aufweisen.

- **Thermische Anforderungen**

Die Wärmeleitfähigkeit des SVM muss mindestens der Wärmeleitfähigkeit eines nichtbindigen Bettungsmaterials entsprechen.

1.3.2 Konventionelle Verfüllmaterialien

Die Verfüllung der Leitungszone erfolgt mit gut verdichtbarem, körnigem, ungebundenem Material. Gemäß ÖNORM B 2538 ist das Größtkorn des Verfüllmaterials abhängig vom Durchmesser des eingebauten Rohres. Bei $DN \leq 200$ beträgt das Größtkorn 22 mm, bei $DN \geq 200$ 44 mm.

Liegt die Leitungszone unter dem Grundwasserspiegel muss der Austrag von Feinanteilen des Bettungsmaterials, welcher zu Stabilitätsverlusten führen kann, vermieden werden. Dies geschieht durch eine Umhüllung der Leitungszone mit Vlies oder durch Verwendung von Bettungsmaterial ohne Feinanteile.

2 Versuche zum Bettungsmaterial SSMplus

2.1 Einaxialer Druckversuch

2.1.1 Grundlagen

Mit dem einaxialen Druckversuch wird im Labor die einaxiale Druckfestigkeit q_u , die dazugehörige Stauchung ε_v ermittelt. Zudem kann der Elastizitätsmodul E_u berechnet werden. Der Prüfkörper wird axial belastet, die Seitendehnung ist dabei ungehindert.

Das Verformungsverhalten und die Druckfestigkeit eines Bodens lassen sich mittels dessen Spannungs-Dehnungs-Beziehung beschreiben.

Die vertikale Stauchung und die vertikale Spannung werden mit folgenden Gleichungen bestimmt (ÖNORM EN ISO 17892-7, 2018):

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_i} \quad , \quad \sigma_v = \frac{P \cdot (1 - \varepsilon)}{A_i}$$

ε_v	[%]	vertikale Stauchung
ΔH	[m]	Änderung der Probenhöhe unter Druck
H	[m]	Anfangsprobenhöhe
σ_v	[N/m ²]	Vertikalspannung
P	[N]	Vertikale Belastung der Probe
A_i	[m ²]	Anfangsquerschnittsfläche der Probe

Der Elastizitätsmodul ergibt sich nach dem Hookeschen Gesetz aus der Änderung der Spannung $\Delta\sigma$ und der Änderung der Dehnung $\Delta\varepsilon$.

$$E_u = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_v}$$

E_u	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
$\Delta\sigma_v$	[N/m ²]	Änderung der Vertikalspannung
$\Delta\varepsilon_v$	[%]	Änderung der vertikalen Stauchung

E_u beschreibt die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Bei realen Materialien ist diese nur über einen begrenzten Stauchungsbereich konstant (Hookescher Bereich). Je nach Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird bei Böden für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls die Anfangstangente, die Sekante zwischen dem Nullwert der Spannung und $q_u/3$ oder die Wendepunkt tangente herangezogen (nach von Soos & Engel, 2017) (Abb. 4).

Der Steifemodul E_s aus dem Kompressionsversuch, der Verformungsmodul E_v aus dem Plattendruckversuch und der Elastizitätsmodul E_u aus dem einaxialen Druckversuch stehen in folgender Beziehung zueinander: $E_s > E_v > E_u$. E_u ist der kleinste Wert, da durch die ungehinderte Seitendehnung der Widerstand gegen die axial wirkende Belastung am geringsten ist.

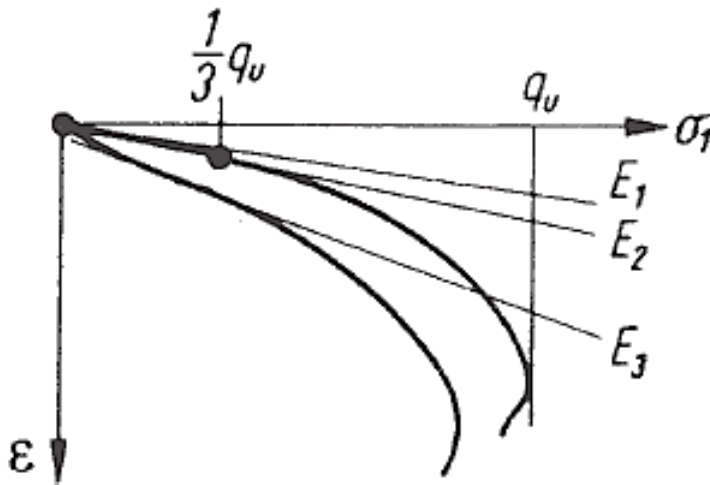


Abb. 4: Bestimmung des E-Moduls (von Soos & Engel, 2017)

2.1.2 Versuchsaufbau

Zur Durchführung von einaxialen Druckprüfungen werden eine Belastungseinrichtung und ein verarbeitender Computer benötigt. Abb. 5 zeigt die Bestandteile der Belastungseinrichtung. Zum Aufbringen der axialen Prüfkraft auf die Probe wird diese zwischen der oberen und der unteren Druckkappe eingebaut. Am Sockel befindet sich die Vorschubeinrichtung (Presse). Am Belastungsrahmen ist eine Kraftmesseinrichtung zur Messung der auf die Probe aufgebrauchte Kraft. Weiters bestimmt ein Wegaufnehmer die Verformung in axiale Richtung.

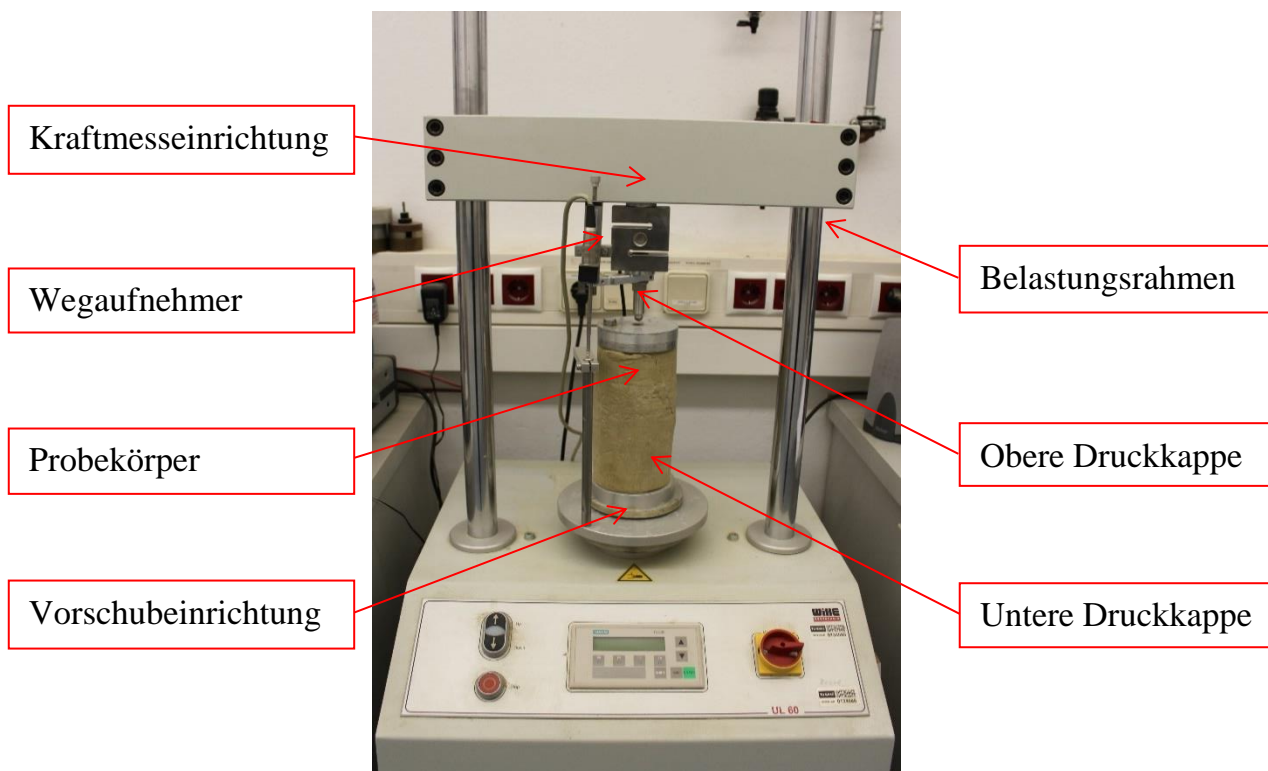


Abb. 5: Belastungseinrichtung zur Durchführung des einaxialen Druckversuchs

2.1.3 Durchführung

Es werden 6 Versuche mit unterschiedlich lange gealterten Proben durchgeführt. Um die Änderung der Festigkeit über die Zeit darzustellen, werden die Proben in einem Alter von 3, 7, 14, 28 und 35 Tagen getestet. Die Proben haben einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von 13,5 cm und werden in einem zylindrischen Styroporbehälter gelagert (Abb. 6). Dieser gibt der Probe die für die Durchführung des einaxialen Druckversuchs notwendige Form und erleichtert das Ausbauen aus der Form.



Abb. 6: In Styropor gefüllte Probe

Nach der Entfernung der Styroporhülle wird die Probe zwischen den Druckkappen eingebaut und zentrisch ausgerichtet. Die Druckversuche in der gegenständlichen Arbeit wurden mit der Software „GEOsys“ durchgeführt. Hier werden Parameter wie die Geometrie des Prüfkörpers sowie die Dehnungsrate und maximale Dehnung angegeben. Der Druckversuch wird dehnungsgeregelt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 % der Anfangshöhe des Prüfkörpers pro Minute durchgeführt. Während des Versuches wird der Verlauf der Messdaten für Kraft, Verschiebung und Zeitdauer vom Programm aufgezeichnet.

Hat die Vertikalspannung einen Maximalwert erreicht und steigt nicht weiter an bzw. fällt wieder ab, ist der Bruch des Probekörpers eingetreten. Der Druckversuch wird beendet, wenn die Probe bricht oder die Stauchung einen Wert von 15 % erreicht hat (nach ÖNORM EN ISO 17892-7, 2018).

2.1.4 Ergebnisse

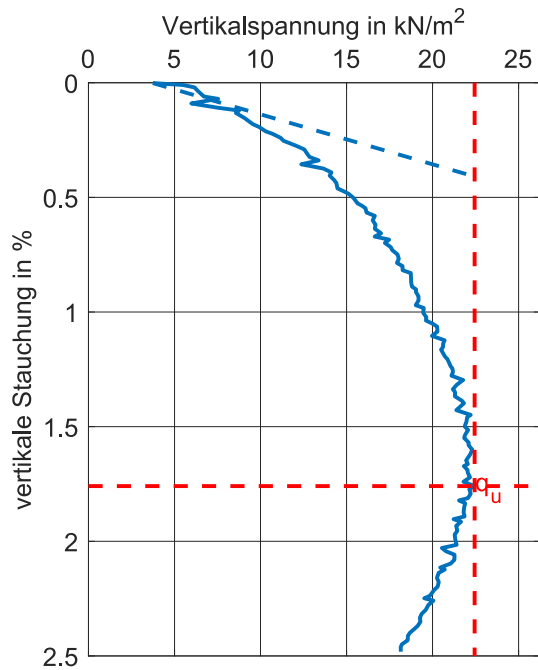


Abb. 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm
(Probenalter: 3 Tage, gestrichelte blaue
Linie zeigt E_u)

Abb. 7 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zum Druckversuch mit der 3 Tage alten Probe. Der Bruch des Probekörpers tritt bei einer Vertikalspannung von 22 kN/m^2 ($\cong 0,022 \text{ N/mm}^2$) und einer Stauchung von $1,76 \%$ ein. Da die Spannungen sich in einem sehr kleinen Bereich befinden, sind Abweichungen vom Grundverlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve gut sichtbar. Letztere sind auf die Körnigkeit des Probenmaterials zurückzuführen. Der Elastizitätsmodul liegt bei einem Wert von $5,5 \text{ MN/m}^2$.



Abb. 8: gebrochene Probe (Probenalter: 3 Tage)

Die gebrochene Probe (Abb. 8) weist abgebrochene Stellen und größere Risse vor. Dies zeigt, dass das Material noch keine hohe Festigkeit und innere Stabilität ausgebildet hat.

In Abb. 9 ist das Ergebnis des Druckversuchs mit der 7 Tage alten Probe dargestellt. Der Bruch tritt bei einer Vertikalspannung von 51 kN/m^2 ($\cong 0,051 \text{ N/mm}^2$) und einer vertikalen Stauchung von 1,12 % ein. Der Elastizitätsmodul beträgt 6 MN/m^2

Im Vergleich zur 3 Tage alten Probe sind deutlichere Risse im Bruchbild zu erkennen, was auf eine Verfestigung des Materials hinweist (Abb. 10).

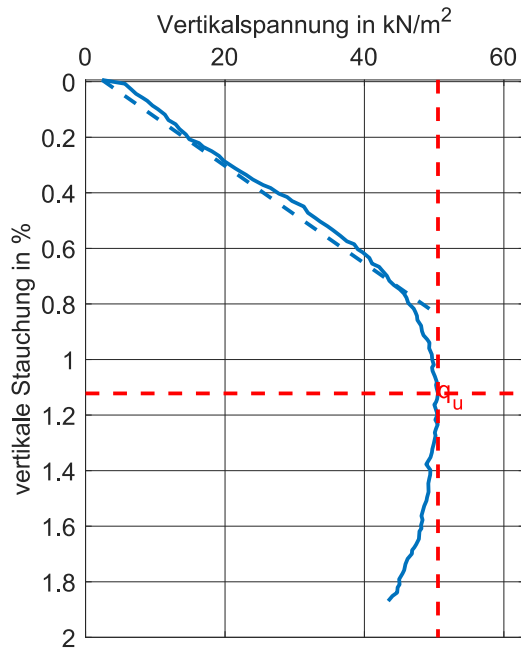


Abb. 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Probenalter: 7 Tage, gestrichelte blaue Linie zeigt E_u)



Abb. 10: gebrochene Probe (Probenalter: 7 Tage)

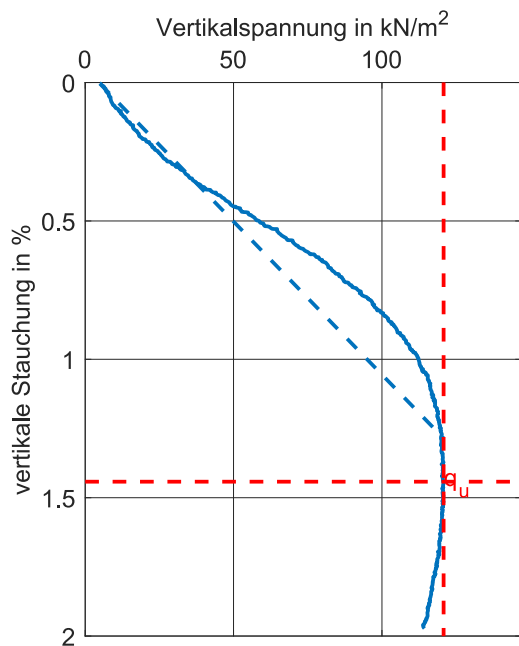


Abb. 11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm
(Probenalter: 14 Tage, gestrichelte blaue
Linie zeigt E_u)

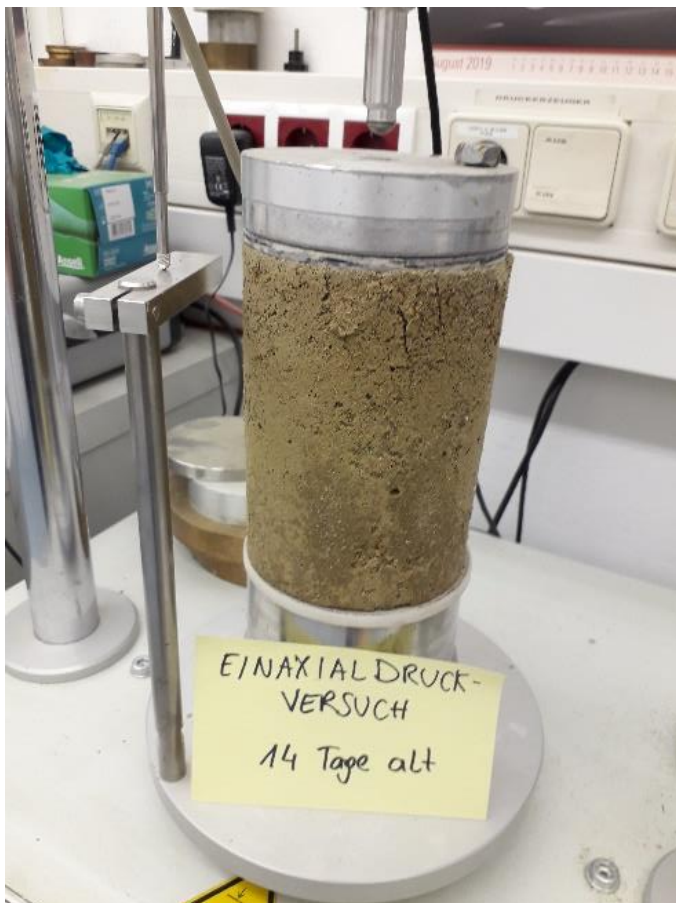


Abb. 12: gebrochene Probe (Probenalter: 14 Tage)

Die maximale Vertikalspannung der 14 Tage alten Probe beträgt 121 kN/m^2 ($\cong 0,121 \text{ N/mm}^2$) (Abb. 11). Die Bruchstauchung liegt bei einem Wert von $1,37 \%$ und der Elastizitätsmodul beträgt $9,5 \text{ MN/m}^2$.

Da es bei dieser Spannungs-Dehnungs-Kurve einen sichtbaren Wendepunkt zwischen dem links gekrümmten und rechts gekrümmten Bereich gibt, kann für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls auch die Wendetangente herangezogen werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird jedoch das Sekantenmodul verwendet.

Die Vertikalspannung beim Bruch der 21 Tage alten Probe beträgt 156 kN/m^2 ($\cong 0,156 \text{ N/mm}^2$), die dazugehörige Stauchung liegt bei $1,17 \%$ (Abb. 13). Die Spannungs-Dehnungs-Kurve weist eine größere Steigung auf, aus welcher sich ein Elastizitätsmodul von 15 MN/m^2 ergibt.

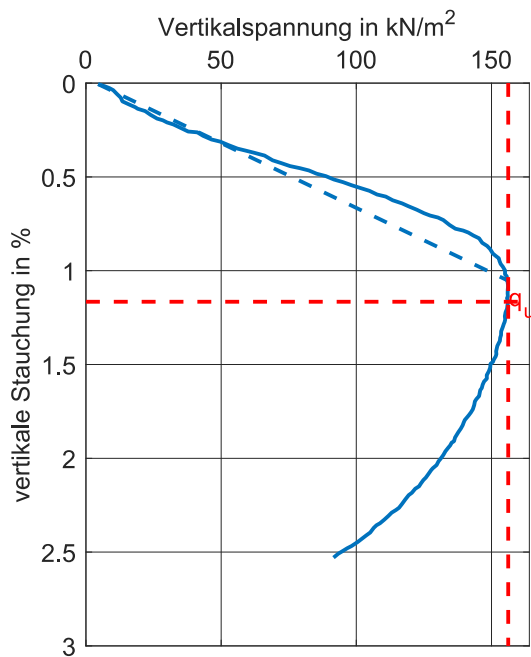


Abb. 13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Probenalter: 21 Tage, gestrichelte blaue Linie zeigt E_u)

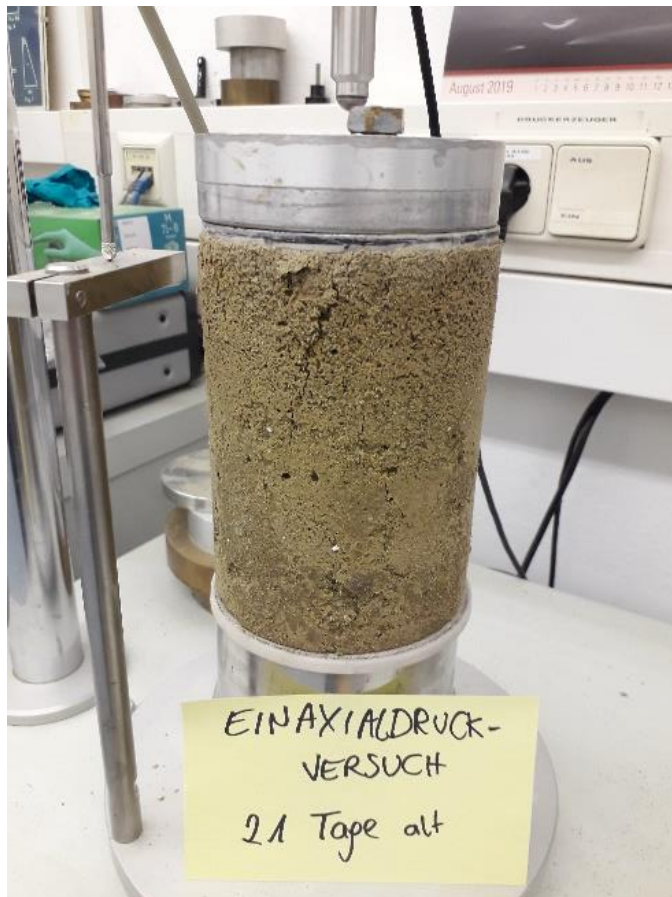


Abb. 14: gebrochene Probe (Probenalter: 21 Tage)

Die 28 Tage alte Probe erreicht eine Bruchspannung von 145 kN/m^2 ($\cong 0,145 \text{ N/mm}^2$) bei einer dazugehörigen Bruchstauchung von $1,01 \%$ (Abb. 15). Der Elastizitätsmodul ergibt sich zu 13 MN/m^2 . Es ist ersichtlich, dass sich das Material weitestgehend verfestigt hat und es zu keinen merklichen Änderungen der Werte kommt.

Auch bei der 35 Tage alte Probe ändern sich die Materialeigenschaften nur wenig im Vergleich zur 28 Tage alten Probe: Die Bruchspannung beträgt 148 kN/m^2 ($\cong 0,148 \text{ N/mm}^2$), die Bruchstauchung $1,19 \%$ (Abb. 17). Der Elastizitätsmodul erreicht einen Wert von $13,5 \text{ MN/m}^2$.

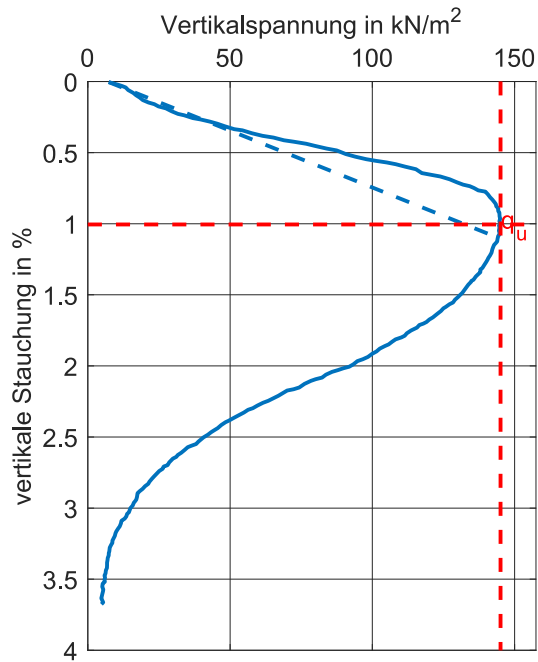


Abb. 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm
(Probenalter: 28 Tage, gestrichelte blaue
Linie zeigt E_u)

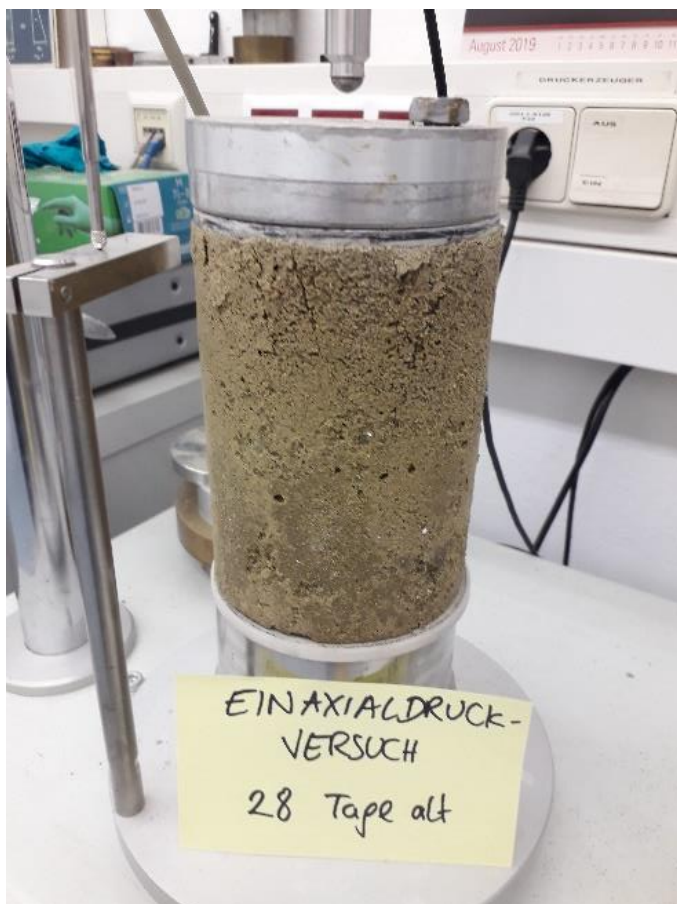


Abb. 16: gebrochene Probe (Probenalter: 28 Tage)

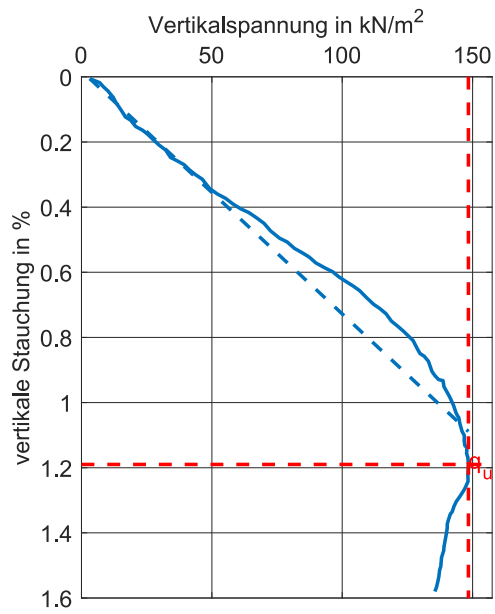


Abb. 17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm
(Probenalter: 35 Tage, gestrichelte blaue
Linie zeigt E_u)



Abb. 18: gebrochene Probe (Probenalter: 35 Tage)

2.1.4.1 Überblick

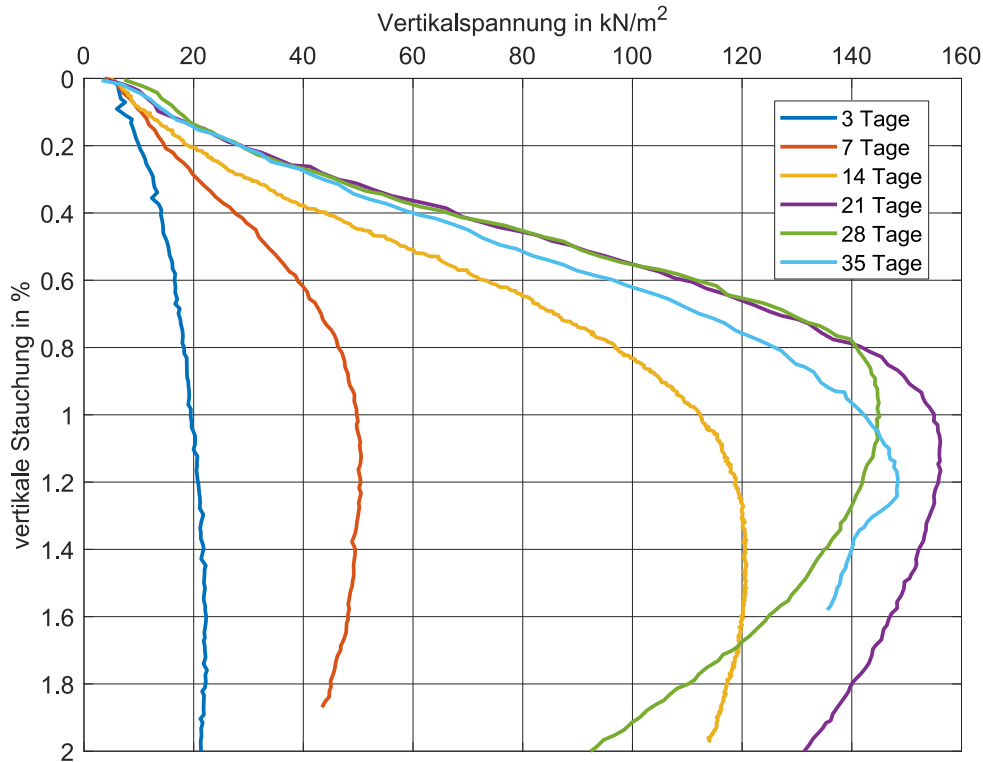


Abb. 19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Gegenüberstellung unterschiedlicher Probenalter

Um Unterschiede der Spannungs-Dehnungs-Kurven bei unterschiedlichem Probenalter deutlich zu machen, sind diese in Abb. 19 gemeinsam dargestellt. Die in Abschnitt 1.3.1.1 gestellten Anforderungen bezüglich der Wiederaufgrabbarkeit und der Tragfähigkeit werden erfüllt.

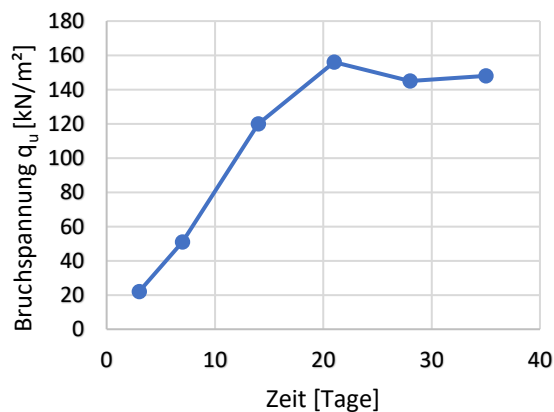


Abb. 20: Bruchspannung q_u über Probenalter

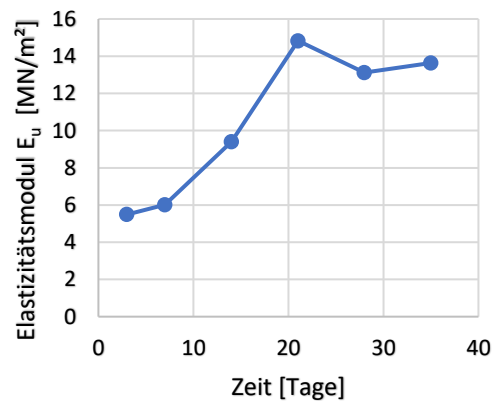


Abb. 21: Elastizitätsmodul E_u über Probenalter

Abb. 20 zeigt den zeitlichen Verlauf der Bruchspannungen q_u . Im Zeitraum von 3 bis 21 Tagen ist eine deutliche Steigung ersichtlich, ab einem Probenalter von 21 Tagen bleibt der Wert näherungsweise konstant. Dies ist auf die Verfestigung des Materials zurückzuführen, die nach 21 Tagen weitestgehend abgeschlossen ist. Der Verlauf des Elastizitätsmoduls E_u über die Zeit deckt sich mit dem der Bruchspannung mit Ausnahme dem Zeitraum von 3 bis 7 Tagen (Abb. 21). Hier ist die Steigung flacher, welche sich aus dem größeren Wert der Stauchung ergibt. Die höchste Bruchspannung tritt mit einem Probenalter von 21 Tagen auf.

2.2 Bestimmung des Wassergehaltes

2.2.1 Durchführung

Zur Ermittlung des Wassergehaltes einer feuchten Bodenprobe wird diese gewogen. Anschließend wird die Probe in einem Trockenofen bei 105°C zur Gänze getrocknet.

Dies wird durch aufeinanderfolgende Wägungen der Probe in einem zeitlichen Abstand überprüft. Weicht die Masse um weniger als 0,1 % ab ist die Bodenprobe trocken.

2.2.2 Ergebnis

Der Wassergehalt ergibt sich aus der Differenz der Massen vor und nach der Trocknung: (ÖNORM EN ISO 17892-1, 2015)

$$\omega = \frac{m_f \cdot m_d}{m_f} \cdot 100$$

ω	[%]	Wassergehalt der Bodenprobe
m_f	[g]	Masse der feuchten Probe
m_d	[g]	Masse der trockenen Probe

Abb. 22 zeigt eine Abnahme des Wassergehaltes mit zunehmendem Alter der Proben. Nach 25 Tagen stellt sich ein konstanter Wassergehalt von ca. 5 % ein.

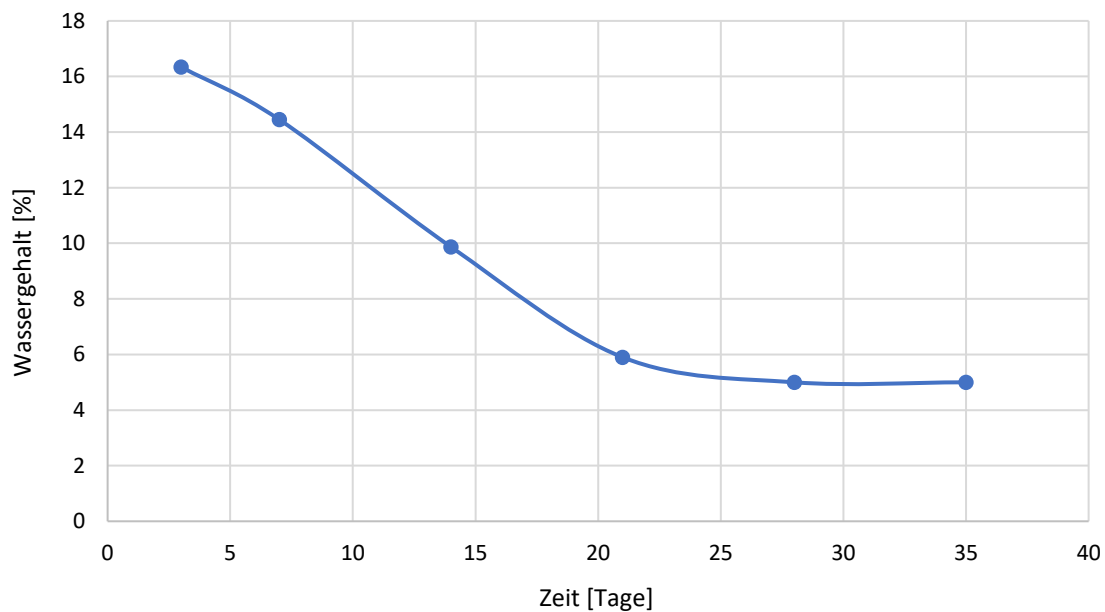


Abb. 22: Wassergehalt nach Probenalter

2.3 Bestimmung von Feucht- und Trockendichte

Die Feucht- bzw. Trockendichte berechnet sich wie folgt aus Masse und Volumen

$$\frac{m_f}{V} = \rho \quad \text{bzw.} \quad \frac{m_d}{V} = \rho_d$$

m_f	[g]	Masse der Probe (inkl. Feuchtanteil)
m_d	[g]	Masse der getrockneten Probe
V	[cm ³]	Volumen der Probe
ρ	[g/cm ³]	(Feucht-)dichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte

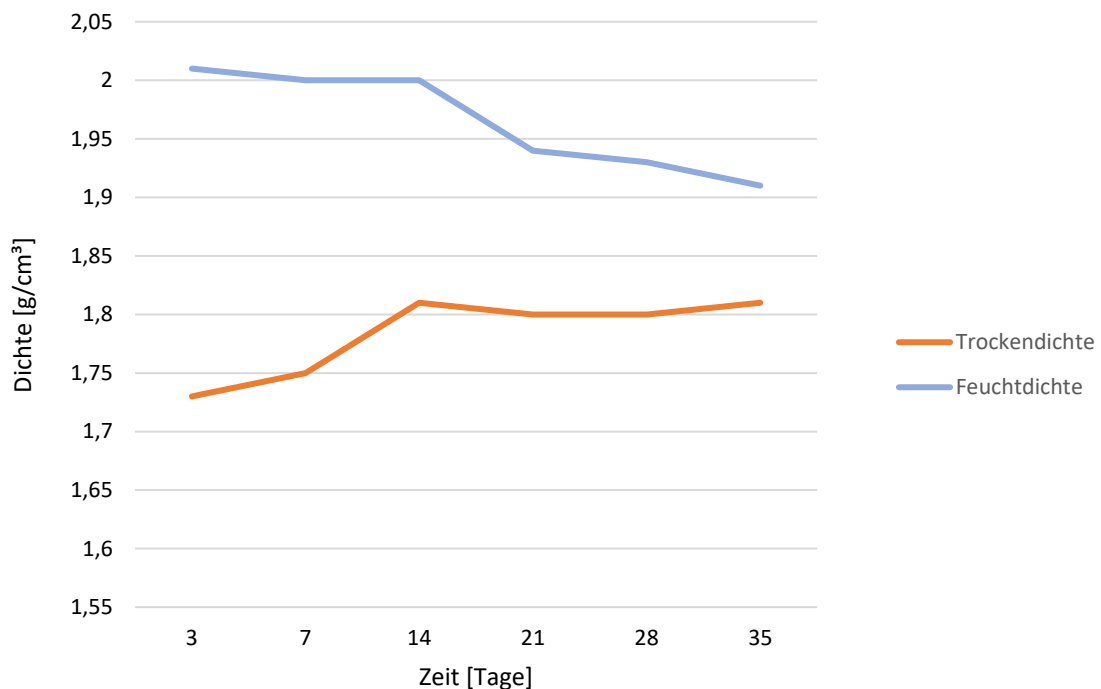


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf der Feucht- und Trockendichte

In Abb. 23 ist der zeitliche Verlauf der Feucht- und Trockendichte dargestellt. Die Feuchtdichte der 3 Tage alten Probe beträgt 2,01 g/cm³. Im Laufe des Trocknungsprozesses sinkt die Feuchtdichte monoton auf 1,91 g/cm³. Der Abfall steht in direkten Zusammenhang zum Wassergehalt. Nimmt dieser ab, nimmt auch die Masse der Probe, mit der die Dichte berechnet wird, ab.

Die Trockendichte der 3 Tage alten Probe beträgt 1,73 g/cm³. Die Trockenmassen der älteren Proben weichen von dieser nach oben ab. Es ist allerdings kein monotoner Anstieg zu beobachten. Die Messung der Trockenmasse unterliegt im Gegensatz zu der der Feuchtmasse einer deutlich größeren Messungenauigkeit, da beim einaxialen Druckversuch (unterschiedlich viel) Material verloren geht. Die Trockendichten liegen zwischen 1,81 und 1,73 g/cm³.

3 Versuche Bettungsmaterial Rundkorn

In diesem Kapitel werden die Versuche zur Bestimmung der Kornverteilung, lockersten und dichtesten Lagerung und der Scherfestigkeit des Bettungsmaterials Rundkorn beschrieben.



Abb. 24: Bettungsmaterial Rundkorn

3.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

3.1.1 Grundlegendes

Die Korngrößenverteilung, auch Sieblinie genannt, ist das Ergebnis der Korngrößenanalyse. Diese dient der Klassifizierung und Charakterisierung von Böden und ist maßgebend für Verdichtungseigenschaften, Durchlässigkeit und Festigkeit. Des Weiteren werden Korngrößenanalysen zur Qualitätssicherung von Baumaterialien durchgeführt.

Die Bodenprobe wird mittels Siebung bei grobkörnigen oder Sedimentationsanalyse bei fein- und gemischtkörnigen Böden analysiert und in verschiedene Klassen eingeteilt. Bei einem Anteil von weniger als 10 % der Körner mit einer Korngröße unter 0,063 mm ist ein Sedimentationsversuch nicht notwendig. Ist die größte Korngröße der Probe kleiner als 2 mm und weniger als 10 % der Körner überschreiten den Durchmesser von 0,063 mm nicht, muss keine vollständige Siebanalyse durchgeführt werden. (ÖNORM EN ISO 17892-4, 2017)

Das Ergebnis der Korngrößenanalyse ist eine Häufigkeitsverteilung. Auf der y-Achse der prozentuale Anteil der Gesamtmenge angegeben ist, der kleiner ist als der Korndurchmesser, welcher auf der x-Achse abgelesen werden kann. Die Skala der x-Achse ist bei der Sieblinie logarithmisch.

Die Sieblinie kann durch weitere Kenngrößen wie die Krümmungszahl C_c und die Ungleichförmigkeitszahl C_u genauer beschrieben werden. Die Eingangswerte hierfür sind d_{10} , d_{30} und d_{60} , wobei d den Korndurchmesser beschreibt, der von den Summenmassenanteilen von 10 %, 30 % und 60 % der jeweiligen Siebdurchgänge unterschritten wird.

Die **Krümmungszahl** C_c ist ein dimensionsloser Kennwert, der den Verlauf der Sieblinie im Bereich zwischen d_{10} und d_{60} beschreibt. Eine Krümmungszahl von 1 bis 3 beschreibt einen kontinuierlichen Verlauf der Sieblinie.

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

d_{10} Korngröße bei 10 % des Siebdurchgangs

d_{30} Korngröße bei 30 % des Siebdurchgangs

d_{60} Korngröße bei 60 % des Siebdurchgangs

Die **Ungleichförmigkeitszahl** C_u beschreibt die Steigung der Sieblinie im Bereich d_{10} und d_{60} .

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Für $C_u < 5$ ist die Korngrößenverteilung gleichförmig, für $5 \leq C_u < 15$ ungleichförmig und für $C_u \geq 15$ sehr ungleichförmig. (nach Kolymbas, 2019)

3.1.2 Aufbau und Durchführung

Die Korngrößenverteilung des Bettungsmaterials Rundkorn wurde mittels eines Siebversuchs bestimmt.

Vor der Siebung muss die Bodenprobe getrocknet und gewogen werden. Zur Siebung wird ein Satz mit nach unten immer feiner werdenden Analysensieben verwendet. Diese bestehen aus einem Lochblech oder Drahtgeflecht und lassen Teilchen, deren Äquivalentdurchmesser kleiner als die Maschenweite ist, durch.

Der Äquivalentdurchmesser ist ein Maß für die Größe unregelmäßig geformter Körner, ein Beispiel dafür sind verschieden geformte Körner mit unterschiedlichen Abmessungen, die jedoch alle in einen Sieb mit gleicher Maschenweite passen.

Es werden Siebschalen mit den Maschenweiten 11,2 mm, 10 mm, 8 mm, 4 mm, und 2 mm verwendet. Der Rückstand jedes einzelnen Siebes wird gewogen und dokumentiert. Der Siebdurchgang des 2 mm-Siebes wird mit einer Schale aufgefangen und erneut gesiebt. Hierfür werden Siebschalen mit Maschenweiten von 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm und 0,125 mm verwendet. (Abb. 25)

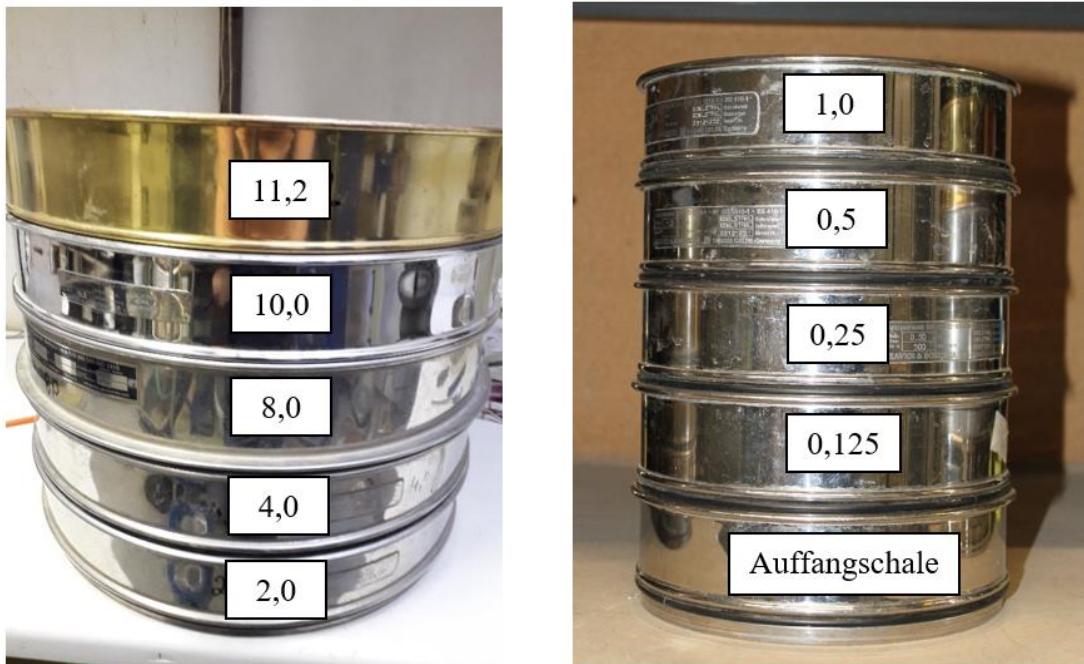


Abb. 25: Siebschalen

3.1.3 Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Aufteilung der Massenanteile des Materials deren Durchmesser jeweils kleiner ist als die dazugehörige Maschenweite des Siebes:

Tab. 1: Zusammenstellung der Siebdurchgänge

Maschenweite [mm]	Rückstand [g]	Anteil [%]
11,2	/	100,0
8,0	346,3	89,1
4,0	3085,7	3,2
2,0	3171,8	0,5
1,0	3178,5	0,3
0,5	3178,6	0,3
0,25	3179,2	0,3
0,125	3180,0	0,2
Restdurchgang	3187,8	

Zur Ermittlung der Sieblinie werden die Massenanteile des Materials der einzelnen Siebdurchgänge eingetragen. Diese ergeben sich aus der folgenden Gleichung (ÖNORM EN ISO 17892-4, 2017):

$$S_i = 100 \left(1 - \sum_{i=1}^i \frac{m_i}{m_0} \right)$$

S_i	[%]	Siebdurchgang
m_i	[g]	Masse der Siebrückstände
m_0	[g]	Gesamtmasse

Abb. 26 zeigt die Sieblinie der Messdaten aus Tab. 1. Eine steile Kurve bedeutet ein überwiegendes Vorkommen einer Korngruppe, flachere Kurven zeugen von einem verminderten Vorkommen bzw. Fehlen. Dieses Material weist einen Anteil von ungefähr 86 % der Gesamtmenge der Korngrößen im Bereich von 4 bis 8 mm vor.

Weiters kann die Krümmungszahl C_c und die Ungleichförmigkeitszahl C_u bestimmt werden. Die Krümmungszahl C_c beschreibt mit einem Wert < 1 einen nicht kontinuierlichen Verlauf der Sieblinie, welcher durch den großen Anteil an Korngrößen zwischen 4 und 8 mm zustande kommt. Die Krümmungszahl ist < 5 , daher handelt es sich um einen gleichförmigen Boden.

Tab. 2: Ungleichförmigkeitszahl und Krümmungszahl

d_{10} [mm]	d_{30} [mm]	d_{60} [mm]	C_u	C_c
4,23	4,97	6,32	1,5	0,92

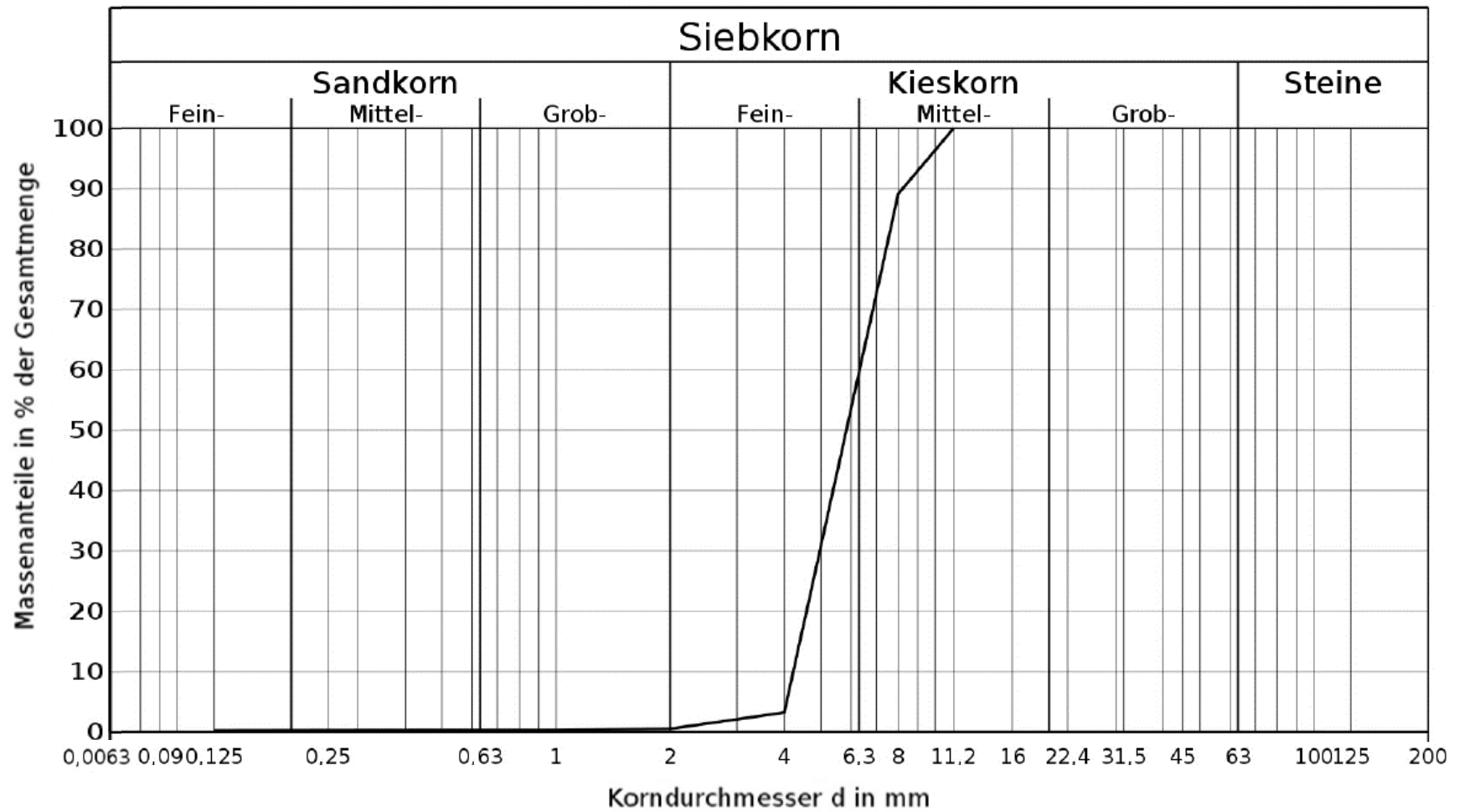


Abb. 26: Sieblinie des Bettungsmaterials Rundkorn

3.2 Lockerste und dichteste Lagerung

3.2.1 Grundlegendes

Bei diesem Versuch wird die Dichte der lockersten und dichtesten Lagerung der Bodenprobe ermittelt. Abb. 27 zeigt die lockerste und dichteste Lagerung

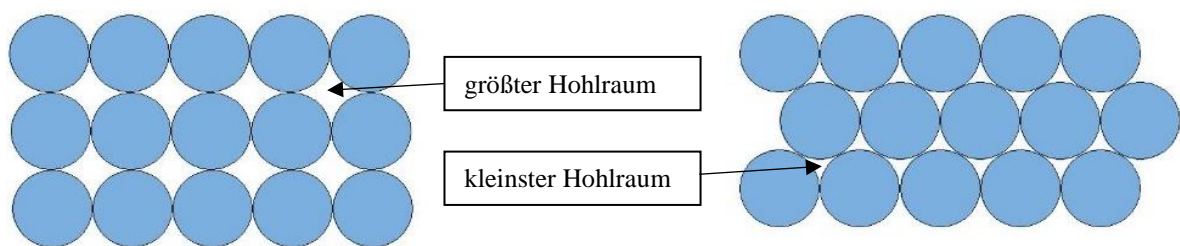


Abb. 27: Lockerste und dichteste Lagerung

Die lockerste und dichteste Lagerung wird bei bindigen und nicht bindigen Böden mit unterschiedlichen Versuchen bestimmt.

Bei bindigen Böden wird die Dichte mit dem Proctorversuch ermittelt. Die Verdichtungsfähigkeit hängt hier sehr stark vom Wassergehalt der Bodenprobe ab. Bei nicht bindigen Böden wird die Bodenprobe mittels Rütteltisch oder Schlaggabel verdichtet. Die Vorgehensweise hängt vom Durchmesser des Größtkorns und den Feinanteilen ab. Enthält die Bodenprobe ein Größtkorn von 5 mm und Feinanteile von $\leq 0,06$ mm wird der Rütteltisch zur Verdichtung verwendet. (nach DIN 18126, 1996)

3.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Bestimmung der lockersten Lagerung wird das Material mit einer Handschaufel lagenweise vorsichtig in den Versuchszylinder eingebracht (Abb. 28). Es ist darauf zu achten, dass so wenig Verdichtung wie möglich stattfindet. Das Material darf nicht frei fallen oder durch die Handschaufel zusammengedrückt werden. Ist der Zylinder vollständig gefüllt, wird der Zylinderrand mit einem Stahllineal abgeglichen und das überschüssige Material wird entfernt.



Abb. 28: Einbringen des Materials

Zur Bestimmung der dichtesten Lagerung wird der gefüllte Zylinder auf einen Rütteltisch gestellt und eingerüttelt (Abb. 29). Dadurch verdichtet sich das Material und es tritt eine Volumsänderung auf.



Abb. 29: Probe am Rütteltisch



Abb. 30: Verdichtetes Material

Nach der Verdichtung wird die Volumsänderung bestimmt. Dafür wird der Abstand vom Material zum Zylinderrand an mehreren Stellen gemessen und gemittelt (Abb. 30).

Die Dichte der lockersten und dichtesten Lagerung wird mit der folgenden Formel ermittelt:

$$\rho_{l,d} = \frac{m}{V_{l,d}}$$

$\rho_{l,d}$	[g/cm ³]	Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung
m	[g]	Masse
$V_{l,d}$	[cm ³]	Volumen bei lockerster und dichtester Lagerung

Die Massenbestimmung erfolgt durch Wägung des Materials. Zur Bestimmung des Volumens der lockersten Lagerung wird das Volumen des Zylinders ermittelt. Für das Volumen der dichtesten Lagerung wird die Höhe bei der Volumsberechnung um den vorher abgelesenen Wert reduziert. Dieser Versuch wird drei Mal durchgeführt.

3.2.3 Ergebnisse

Zur Bestimmung der Dichte der lockersten und dichtesten Lagerung wurden die Ergebnisse von 3 Versuchen gemittelt und in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tab. 3: Dichtebestimmung

Versuch	Lagerung	Masse m [g]	Volumen V [cm ³]	Dichte ρ [g/cm ³]
1	lockerste	4995,0	3269,22	1,53
	dichteste		2915,77	1,71
2	lockerste	4979,8	3269,22	1,52
	dichteste		2951,06	1,69
3	lockerste	4935,5	3269,22	1,51
	dichteste		2915,72	1,69

Somit ergibt sich eine Dichte von 1,5 g/cm³ für die lockerste Lagerung und eine Dichte von 1,7 g/cm³ für die dichteste Lagerung.

3.3 Rahmenscherversuch

Der Rahmenscherversuch dient der Ermittlung der Festigkeit eines Materials gegen Abscherung. Abb. 31 zeigt die Scherbox des Rahmenschergeräts des Geotechnischen Labors der Technischen Universität Graz, mit dem die Versuche durchgeführt wurden.



Abb. 31: Scherbox des Rahmenschergeräts

3.3.1 Theoretische Grundlagen nach ÖNORM B 4416

3.3.1.1 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit eines Bodens ist der Widerstand, den dieser einwirkenden Scherkräften entgegensetzt. Aus den ermittelten Parametern der Scherfestigkeit können Versagensformen und somit die Tragfähigkeit eines Bodens (Widerstand gegen horizontales Verschieben) oder die Stabilität von Böschungen ermittelt werden.

Die Scherfestigkeit τ_f ist der maximale Wert der Schubspannung τ mit der eine Bodenprobe belastet werden kann bis der Bruch eintritt. Sie ist abhängig von der einwirkenden Normalkraft. Ist die Scherfestigkeit erreicht, nimmt die Schubspannung bei dichten nichtbindigen oder festen bindigen Böden mit zunehmender Verschiebung ab (Abb. 32). Der konstante und somit minimale Wert der Schubspannung, wird als Restscherfestigkeit τ_r bezeichnet. Bei lockeren nichtbindigen oder weicheren bindigen Böden tritt nach dem Erreichen der maximalen Schubspannung kein Abfall ein, somit ist die Scherfestigkeit gleich der Restscherfestigkeit.

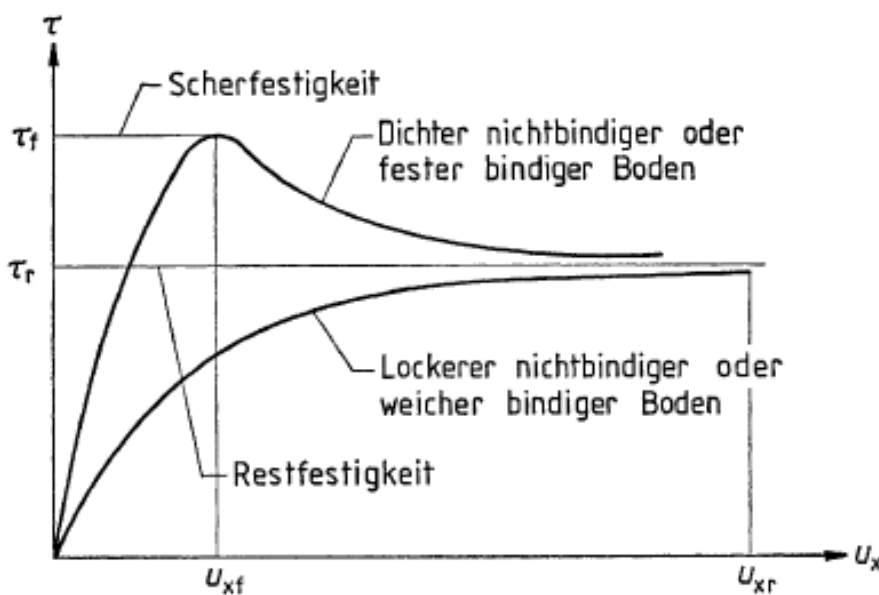


Abb. 32: Scherfestigkeit und Restscherfestigkeit (ÖNORM B 4416, 1978)

3.3.1.2 Bruchbedingung nach Mohr Coulomb

Die Coulombsche Bruchbedingung stellt eine Annäherung des Versagens- bzw. Bruchverhaltens eines Bodens dar. Die Bruchgerade ergibt sich aus den maximalen Schubspannungen τ_f (Scherfestigkeiten), die in der Gleitfläche wirken und den zugehörigen Normalspannungen σ . Der Zusammenhang der zwischen Schubspannungen und Normalspannungen ergibt sich aus

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

τ	[kN/m ²]	Schubspannung
c	[kN/m ²]	Kohäsion
σ	[kN/m ²]	Normalspannung
φ	[°]	Reibungswinkel

Es werden mindestens drei Scherversuche mit unterschiedlichen Normalspannungen und den dazugehörigen Schubspannungen benötigt um eine Bruchgerade darzustellen. (Abb. 33)

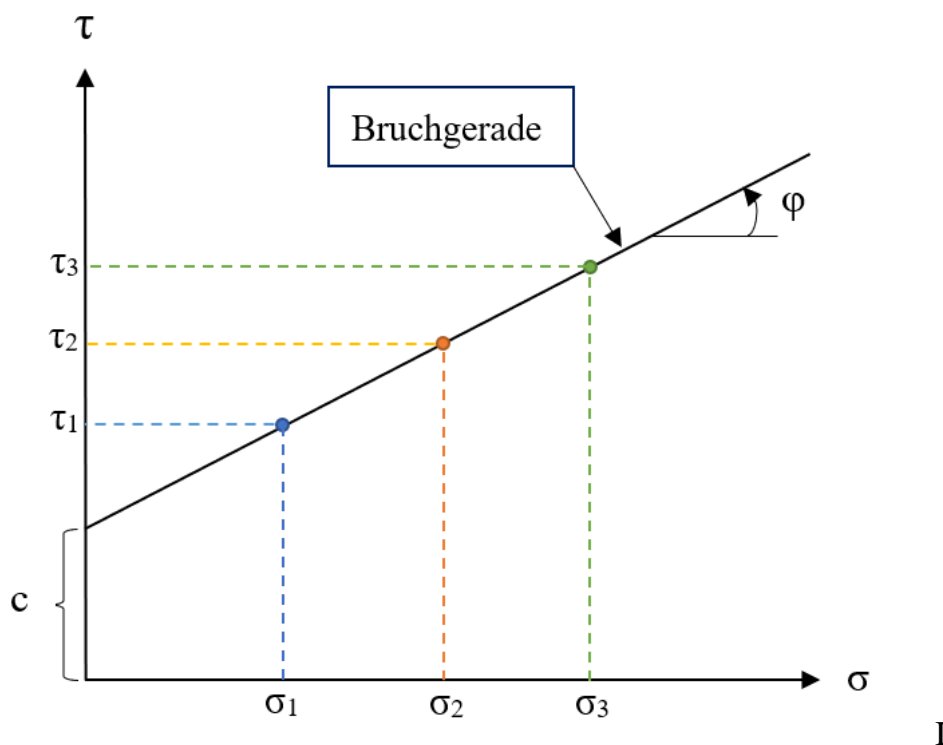


Abb. 33: Bruchbedingung nach Mohr Coulomb (nach ÖNORM B 4416, 1978)

Aus der Steigung der Bruchgeraden ergibt sich der Reibungswinkel φ . Dieser ist bei nicht-bindigen Böden abhängig vom Gefügewiderstand, dem Brechen, sowie der Dilatanz und Kontraktanz der Körner.

Der Schnittpunkt der Bruchgerade mit der y-Achse ergibt den Wert der Kohäsion c . Bei bindigen Böden beschreibt die Kohäsion den inneren Zusammenhalt der Bodenteilchen (tatsächliche Kohäsion). Bei nicht-bindigen trockenen Böden ergibt sich die Kohäsion durch den Widerstand des Verhakens der Körner, welcher am Anfang des Schervorgangs überwunden werden muss.

3.3.2 Aufbau und Durchführung

Beim Rahmenscherversuch werden zwei mit dem Probenmaterial gefüllte Rahmen aufeinandergesetzt, wobei der obere Rahmen fixiert ist und der untere Rahmen parallel zum oberen Rahmen verschoben werden kann (Abb. 34). Beide Rahmen zusammen ergeben die Scherbox. Die innere Grundfläche der Rahmen beträgt $15 \times 15 \text{ cm}$, die Höhe jedes Rahmens beträgt 10 cm . Das Probenvolumen beträgt somit $15 \times 15 \times 20 \text{ cm} = 4,5 \text{ l}$.

Durch den Rahmen wird eine seitliche Dehnung verhindert, in vertikaler Richtung kann jedoch eine Dehnung bzw. Stauchung stattfinden. Zwischen dem oberen und unteren Rahmen wird ein kleiner Spalt eingestellt um ein Verkanten der Rahmen zu verhindern. Das Material wird lagenweise in die Scherbox eingebracht und händisch vorverdichtet.

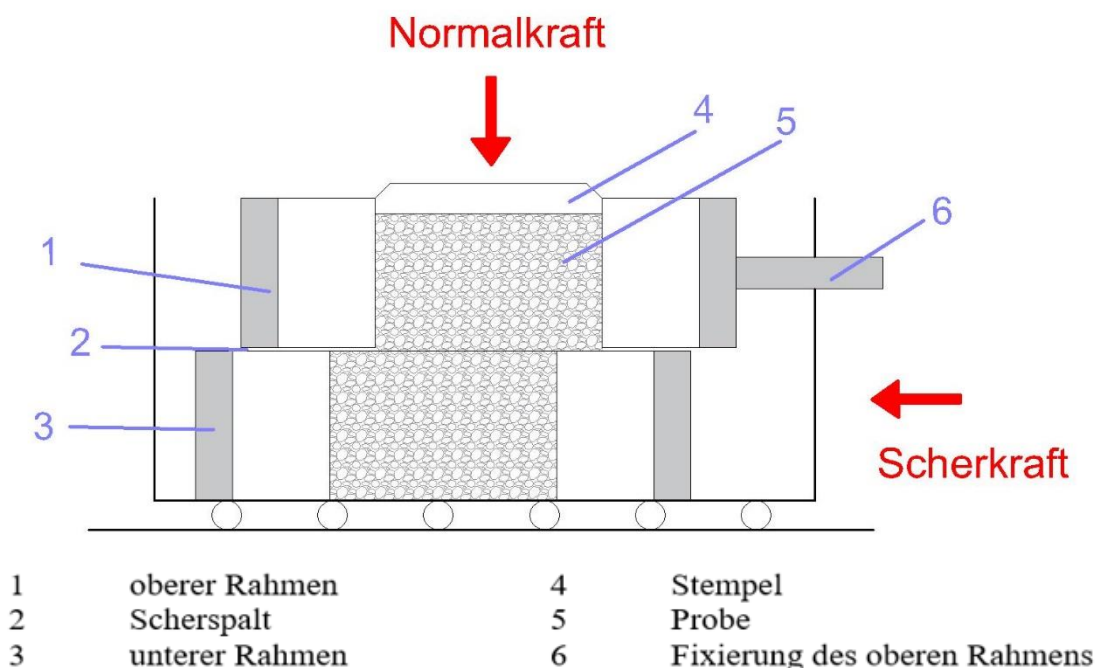


Abb. 34: Schematische Darstellung eines Rahmenschergeräts
(nach ÖNORM B 4416, 1978)

Danach wird eine konstante Normalspannung, die senkrecht zur Scherfuge wirkt, über einen Stempel auf das Material übertragen. Nach Aufbringung der Normalkraft wird der untere Rahmen mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min verschoben. Da das Material trocken ist und Porenwasser somit die Probe nicht beeinflussen kann, kann eine schnelle Geschwindigkeit gewählt werden. Durch das horizontale Verschieben des unteren Rahmens entsteht eine erzwungene Scherfläche.



Abb. 35: In die Scherbox eingebaute Probe

Der Versuch wird drei Mal mit jeweils unterschiedlichen Normalspannungen durchgeführt.

3.3.3 Ergebnisse

Die auf das Material wirkenden Normalkräfte betragen in den einzelnen Versuchen 5 kN, 10 kN und 15 kN. Diese ergeben sich nach der Umrechnung auf die Grundfläche mit $\sigma = \frac{F}{A}$ zu den Normalspannungen von 222 kN/m² (grün), 444 kN/m² (rot) und 666 kN/m² (blau) (Abb. 36).

In Abb. 36 werden die in der Gleitfläche wirkenden Schubspannungen der drei Versuchsdurchgänge über den zurückgelegten Scherweg aufgetragen. Da es sich bei der Probe um einen dichtgelagerten nicht-bindigen Boden handelt, erreicht die Schubspannung in allen drei Versuchen einen Maximalwert und sinkt im weiteren Verlauf des Schervorgangs wieder ab. Ab einem Scherweg von ca. 25 mm stellt sich eine annähernd konstante Schubspannung (Restfestigkeit) ein.

Tab. 4 zeigt eine Zusammenfassung der Werte der Scherfestigkeiten τ_f und der Restscherfestigkeiten τ_r mit den dazugehörigen Normalspannungen σ .

Tab. 4: Scherfestigkeit und Restscherfestigkeit

Normalspannung σ [kN/m ²]			
222	444	666	
220	477	615	Scherfestigkeit τ_f [kN/m ²]
160	380	520	Restscherfestigkeit τ_r [kN/m ²]

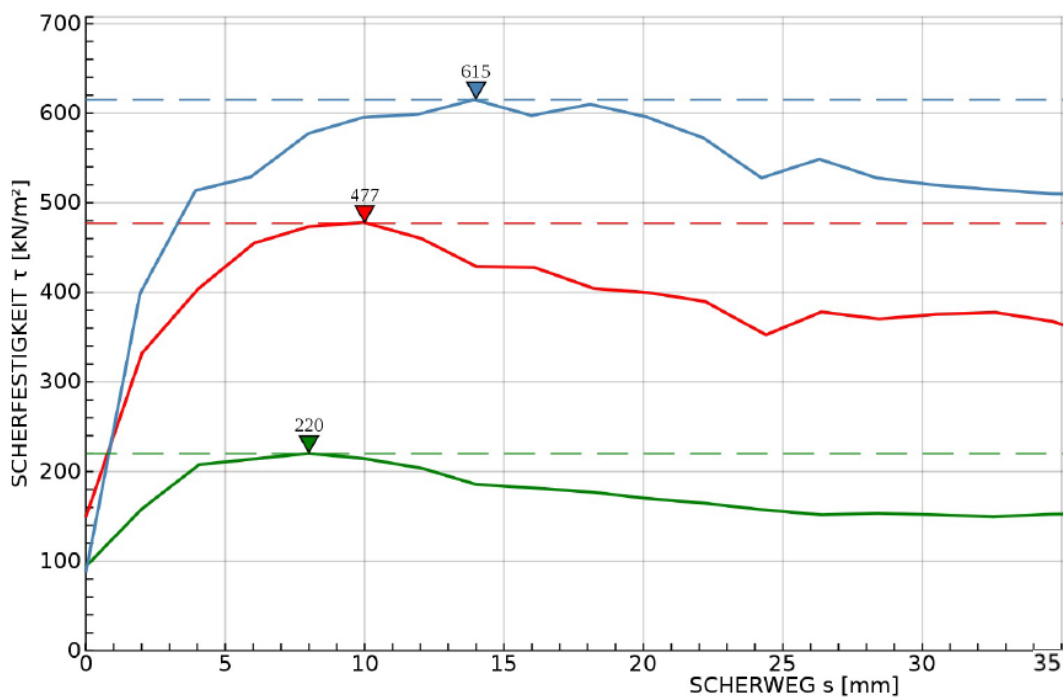


Abb. 36: Ergebnis des Scherversuchs - Scherverschiebungsdiagramm

Der Reibungswinkel und die Kohäsion können aus den Scherfestigkeiten und den dazugehörigen Normalspannungen ermittelt werden. Dazu werden diese in ein Diagramm aufgetragen (Abb. 36) und durch die Punkte wird eine Gerade gelegt. Aus der Steigung der Geraden ergibt sich ein Reibungswinkel von $\varphi = 42^\circ$. Aus dem Diagramm lässt sich eine effektive Verzahnungs-Kohäsion $c = 50$ kN/m² ablesen, die sich durch das Verhaken der Körner ergibt.

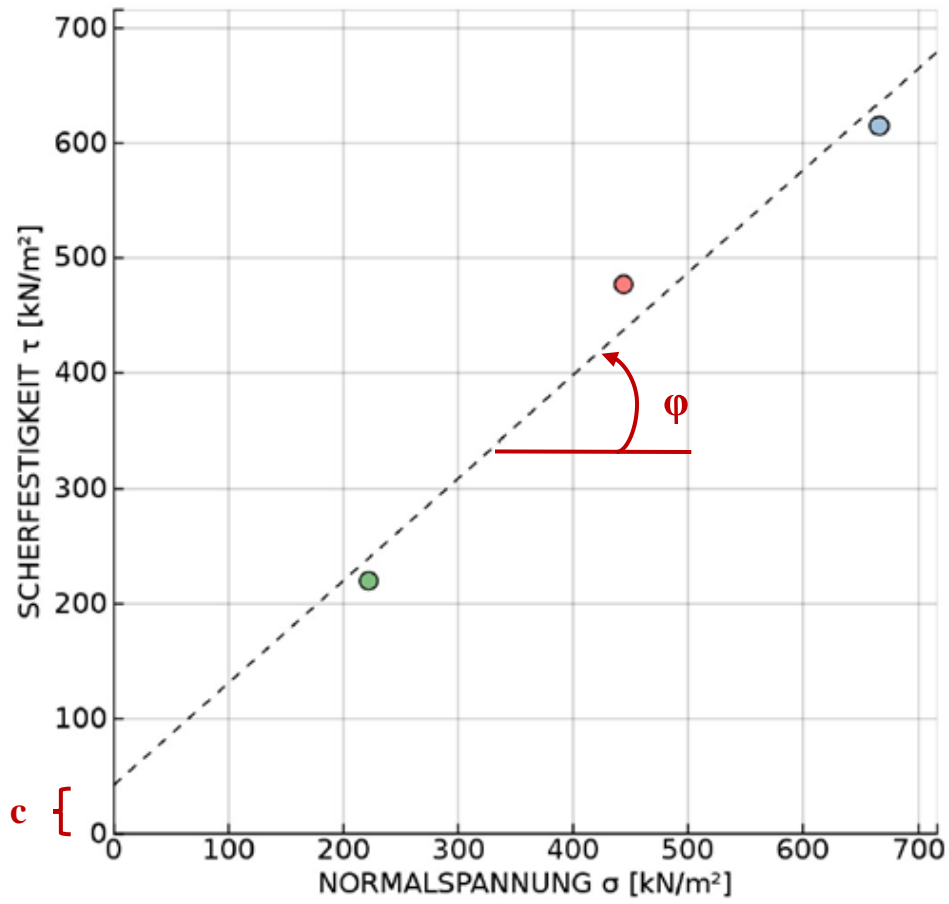


Abb. 37: Reibungswinkel und Kohäsion

4 Thermosand

4.1 Entstehung

Thermosand wird in den stillgelegten Kohlefördergebieten um Fohnsdorf abgebaut. Dieser entsteht aus Abraummateriale, welches auf Halden gelagert wird. Der Kohlerest im Material hat sich im Laufe der Jahre durch Oxidation so verwandelt, dass das Material einem gebrannten Ton (Klinker) ähnlich ist. Durch Mahlen, Sieben und Klassieren des Materials auf Korngröße 0 bis 4 mm entsteht Thermosand.

Thermosand verfügt als sandähnliches Material mit einem hohen Porenanteil über wärmedämmende Eigenschaften. Diese Materialeigenschaft und die gute Verdichtbarkeit macht Thermosand zu einem guten Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen. (Henögl & Semprich, 2003)

4.2 Wärmeleitung im Boden

Zur Wärmeübertragung existieren in der Thermodynamik folgende drei Mechanismen: die Wärmestrahlung, die Wärmeleitung und die Konvektion. Unter Wärmeleitung versteht man den Wärmefluss in einem oder zwischen zwei Medien bei einer vorliegenden Temperaturdifferenz. (Baehr & Stephan, 1996)

Der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert λ wird in W/mK angegeben und beschreibt die temperaturabhängige Eigenschaft eines Feststoffes, Energie in Form von Wärme zu übertragen. Bettungsmaterialien für Fernwärmeleitungen sollte eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Der Wassergehalt des Materials ist wichtig für die Wärmeleiteigenschaften, da Wasser eine geringere Leitfähigkeit als das Korngefüge besitzt. Ist die Probe jedoch trocken, befindet sich Luft in den Poren, welche eine noch geringere Leitfähigkeit als Wasser und somit gute wärmedämmende Eigenschaften aufweist.

4.3 Laboruntersuchungen am Thermosand

Am Institut für Bodenmechanik, Grundbau und numerische Geotechnik wurden durch umfassende Prüfungen des Thermosandes dessen Materialeigenschaften ermittelt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst: (nach Henögl & Semprich, 2003)

Zur Bestimmung der Sieblinie erfolgte eine Nasssiebung mittels einer Siebmaschine mit anschließender Schlämmanalyse der Feinteile. Dies ergab einen Schluff-Tonanteil von 22,8 Massenprozent, einen Sandanteil von 74,3 Massenprozent sowie einen Kiesanteil von 2,9 Massenprozent (Abb. 38).

Bodenmechanisch wird das Korngemisch als gering kiesiger, schluffiger Sand mit einem Größtkorn von 4 mm bezeichnet. Die Bestimmung der Korndichte ρ_s ergab einen Mittelwert von $2,78 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte ρ_d liegt bei $1,44 \text{ g/cm}^3$. Mit dem Proctorversuch wurde der optimale Wassergehalt zur Erreichung der höchsten Festigkeit des Materials mit 25,6 % bestimmt. Weiters weist der Thermosand gute Dämmeigenschaften auf Grund eines Porenanteils von ungefähr 48 % (Anteil des mit Luft und Wasser gefüllten Hohlraumvolumens) bei einem Wassersättigungsgrad von 61 % - 84 % und einem Verdichtungsgrad von 97 % auf.

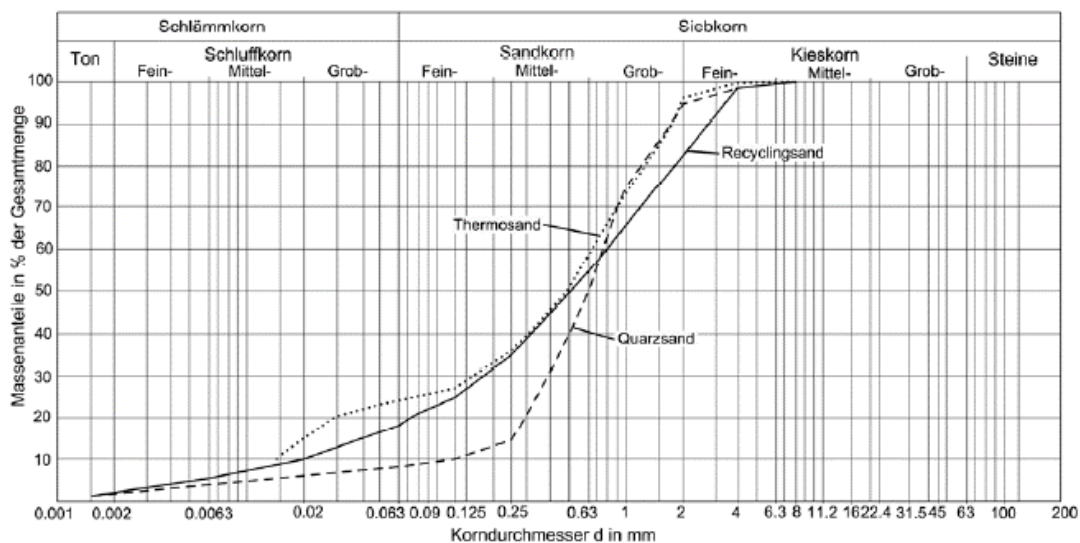


Abb. 38: Vergleichende Ergebnisse der Kornverteilungsanalysen von Thermosand, Quarzsand und Recyclingsand (Henögl, 2006)

Weiters wurden Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Ausbreitmaßes, des Absetzmaßes sowie der einaxialen Druckfestigkeit durchgeführt. (nach Steirer, 2010)

Zur Bestimmung des Ausbreitmaßes wurden 4 Versuche durchgeführt. Diese ergaben ein durchschnittliches Ausbreitmaß von 560 bis 570 mm, wodurch die Konsistenzklasse F59 nach ONR 23131 nachgewiesen werden konnte.

Das Absetzmaß der 4 Proben erreichte nach einem Tag einen Höchstwert von 1,5 % und nach 28 Tagen einen Höchstwert von 1,6 %. Dies überschreitet den Grenzwert von 2 % nach einem Tag und den Zuwachs nach 28 Tagen an die 10 % Grenze nicht.

Der Druckfestigkeitsverlauf über eine Zeitreihe von 3 bis 28 Tagen ist in Abb. 39 dargestellt. Die einaxiale Druckfestigkeit erreichte nach 28 Tagen einen Mindestwert von $6,23 \text{ N/cm}^2$ und liegt geringfügig oberhalb des geforderten Mindestwertes von 60 N/cm^2 ($\cong 0,6 \text{ N/mm}^2$).

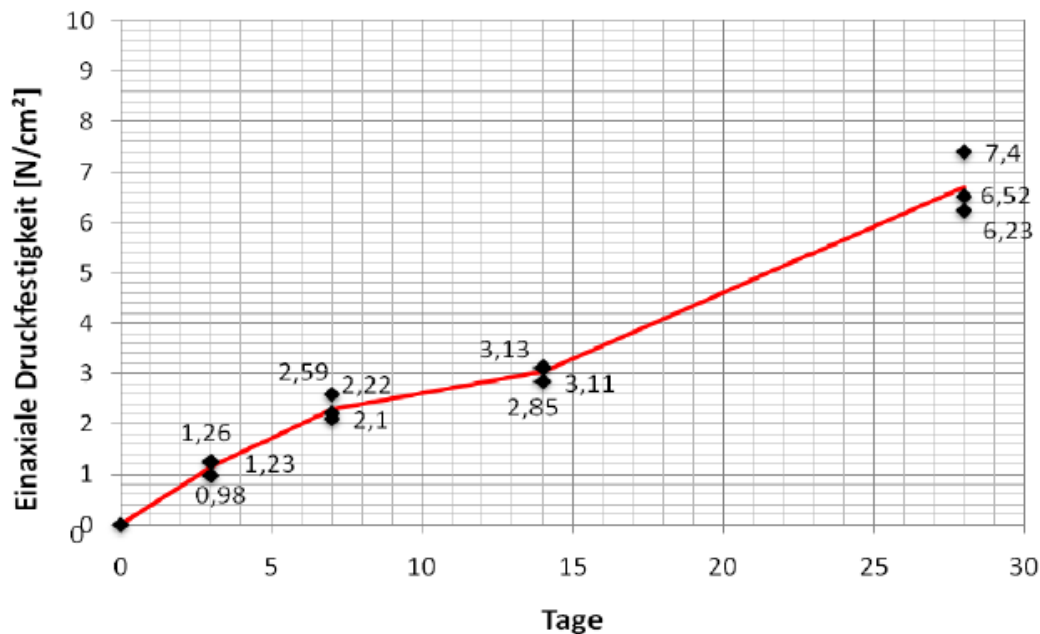


Abb. 39: Einaxiale Druckfestigkeit nach 3, 7, 14 und 28 Tagen (Steirer, 2010)

Die oben genannten Ergebnisse entsprechen den Anforderungen eines stabilisierten, fließfähigen Verfüllmaterial nach ONR 23131 (siehe Kapitel 1.3.1.1). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Thermosand als stabilisiertes Bettungsmaterial geeignet ist. Dies gilt nicht nur für die Verlegung von Fernwärmerohren. Thermosand könnte auf Grund der wärmedämmenden Eigenschaften auch im Bereich der Wasserversorgung zur Kühlung von Rohrleitungen bei warmem Untergrund eingesetzt werden.

5 Rohrleitungsbau im Grazer Stadtgebiet

5.1 Rohrmaterialien

Im Folgenden werden die im Grazer Stadtgebiet verwendeten Rohrmaterialien beschrieben: (Bölke, 2013)

- **Gussrohre**

Rohre aus duktilem Gusseisen sind plastisch verformbar und können Zugbeanspruchungen aufnehmen. Belastungen werden erst durch Verformungen abgebaut, bevor es zum Bruch kommt. Die Rohrverbindung erfolgt durch Steckmuffen und einer Längszugsicherung. Die Innenauskleidung erfolgt mit Zementmörtel, welcher gegen Korrosion und Abrieb schützt und gleichbleibende hydraulische Eigenschaften hat. Zum äußeren Oberflächenschutz wird das Rohr mit einem Zinküberzug oder einer Polyethylenumhüllung überzogen.

- **Kunststoffrohre**

Kunststoffrohre sind biegeweich und zeichnen sich durch ein geringes Gewicht, Unempfindlichkeit gegenüber Abwasser und einer hohen Flexibilität bei ausreichender Ringsteifigkeit aus. Sie bestehen aus den Materialien PE-HD (Polyethylen hoher Dichte), PVC (Polyvinylchlorid) und PP (Polypropylen). Die Verbindung der einzelnen Rohrstränge erfolgt durch Steckmuffen oder Schweißen.

- **Faserzementrohre**

Faserzementrohre (in der Vergangenheit als Asbestzementrohre ausgeführt) weisen auf Grund ihres hohen Zementgehaltes und dichten Gefüges eine hohe chemische und biologische Beständigkeit auf. Die einzelnen Rohre werden mit Kupplungen aus Faserzement oder Polypropylen mit eingelegten Dichtringen verbunden.

- **Stahlbeton**

Rohre aus Stahlbeton sind biegesteif und können in beliebigen Nennweiten und Profilarten ausgeführt werden. Die häufigste Ausführung im Bereich des Kanalbaus ist das Eiprofil. Die Rohrverbindung erfolgt mit einer Gleitringdichtung, welche eine hohe biologische und chemische Beständigkeit aufweisen muss.

5.2 Schäden an Rohrleitungen

Im Folgenden wird auf Schäden an Rohrleitungen, die in weiterer Folge zu einem Rohrbruch führen, eingegangen: (Roscher, 2018)

Eine Ursache von Schäden an Rohren ist die Materialalterung und -ermüdung sowie Schäden durch fehlerhafte Herstellung, fehlerhaft ausgeführte Rohrverbindungen oder ungeeigneten Werkstoffeinsatz.

Schäden auf Grund falscher Einbettung der Rohre und Setzungen der Grabensohle treten bei biegeweichen und biegesteifen Rohren auf. Bei biegesteifen Rohren kommt es bei Belastung zu Punktlasten im Sohl- und Scheitelbereich des Rohres und führt zu Rissen. Bei biegeweichen Rohren führt dies zu einer Verformung und einer Lastumverteilung in den umliegenden Boden. Um dies zu verhindern, muss das Rohraufleger so ausgeführt werden, dass weder Punkt- noch Linienlasten auf das Rohr übertragen werden.

Unzureichender Oberflächenschutz von metallischen Rohren gegen Korrosion führt zu Längs- und Querrissen und folglich zu einem Bruch mit Wasserverlusten. Bei Abwasserrohren tritt Korrosion durch die Reaktion des Werkstoffs mit Abwasser auf.

Eine weitere Ursache von Schäden von Abwasserleitungen ist der mechanische Verschleiß durch Feststofftransport, Kavitation oder ungeeignete Werkstoffe, was einen Abrieb des Rohres und eine Verringerung der Tragfähigkeit zur Folge hat.

Bei Wasserrohrleitungen können wechselnde Druckverhältnisse und Änderungen der Wasserqualität das Rohr schädigen.

Bereits bestehende intakte Rohrleitungen können durch Bodenbewegungen, ausgelöst durch Eingriffe wie Reparaturen, Rohrnetzerweiterungen oder benachbarte Baustellen, beschädigt werden.

5.3 Rohrleitungsbau im Bereich Wasserversorgung

5.3.1 Offene Bauweise bei Neubau

Beim Leitungsneubau in der offenen Bauweise wird die Bettung standardmäßig mit dem Bettungsmaterial Rundkorn 4/8 ausgeführt. Es werden duktile Gussrohre und PE HD-RC-Rohre (Polyethylen hoher Dichte resistance to crack) verlegt. Bei der Einbringung des Bettungsmaterials ist auf eine gute Verdichtung zu achten, um ein tragfähiges Auflager zu schaffen und Setzungen zu vermeiden. Als zusätzliche Maßnahme kann eine Rüttelflasche zur Verdichtung im Auflagerbereich herangezogen werden.

5.3.2 Punktuelle Grabungen

Bei der grabenarmen Bauweise und Reparatur von Anschlussleitungen und Schiebern sowie bei Rohrbrüchen wird das Erdreich nur punktuell aufgegraben. Die Bettung des Neurohres bzw. die Verfüllung der Kopflöcher, die bei der grabenarmen Bauweise entstehen, erfolgt mit dem Bettungsmaterial SSMplus.

Beim punktuellen Austausch von Bettungsmaterial kann es auf Grund der verschiedenen Materialeigenschaften des bestehenden und ausgetauschten Bettungsmaterials, sowie des umgebenden Bodens zu differentiellen Setzungen kommen. Die Lasten im Bereich der Verfüllung mit SSMplus werden auf Grund der Verfestigung und der höheren Steifigkeit von SSMplus bei Setzungen zu einem großen Teil vom Rohr getragen. Dies kann an den Übergängen des Bettungsmaterial oder bei Rohrverbindungen zu Schäden führen.

Zur Vermeidung differentieller Setzungen bei punktuelltem Austausch des Bettungsmaterials durch SSMplus kann dieses verlaufend eingebaut werden um einen abrupten Übergang der Bettungsmaterialien zu vermeiden.

Bei Rohrbrüchen muss darüber hinaus das ausgetretene Wasser in der Baugrube berücksichtigt werden. Zur Vermeidung von Setzungen sollte vor der Einbringung des Bettungsmaterials möglichst viel nasses Material entfernt werden. Zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen ist es sinnvoll eine dickere Bettungsschicht einzubringen.

5.4 Rohrleitungsbau im Bereich Abwasserentsorgung

Der Neubau und die Erneuerung von Abwasserleitungen erfolgt in offener Bauweise. Verlegt werden Gussrohre und Eiprofile aus Stahlbeton. Die Rohrbettung erfolgt mit Splitt 8/16, die Eiprofile werden zusätzlich auf einer Betonsauberkeitsschicht verlegt.

Die Verfüllung der Künette durch Splitt weist durch das Verkanten der Körner eine höhere Stabilität auf, was allerdings die Verdichtung des Materials erschwert. Die Vorgehensweise bei der Verdichtung kann vom Wasserleitungsbau auf den Abwasserleitungsbau übertragen werden.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war die Untersuchung von SSMplus und Rundkorn als Bettungsmaterialien in Rohrgräben bei der Verlegung von Wasser- und Abwasserleitungen. Zu diesem Zweck wurden die Materialeigenschaften des Bettungsmaterial Rundkorn und SSMplus bestimmt.

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit und der dazugehörigen Dehnung des Bettungsmaterials SSMplus über die Zeit wurden 6 Druckversuche über eine Zeitreihe von 3 bis 35 Tagen durchgeführt. Diese zeigten in Abhängigkeit mit der Bestimmung des Wassergehalts eine weitgehend abgeschlossene Verfestigung nach einem Zeitraum von 21 Tagen. Weiters erfüllt SSMplus die normativ festgelegten Anforderungen bezüglich Wiederaufgrabbarkeit und Tragfähigkeit.

Es wurde eine Korngrößenanalyse des Materials Rundkorn durchgeführt, sowie die lockerste und dichteste Lagerung bestimmt. Zur Feststellung des Widerstands gegen Scherbeanspruchung und des Reibungswinkels wurden ein Rahmenscherversuch durchgeführt. Der Reibungswinkel ergab einen für dieses Korngemisch typischen Wert von $\varphi = 42^\circ$.

Für Thermosand wurde die theoretische Anwendbarkeit als Bettungsmaterial diskutiert. Die Laboruntersuchungen zeigen, dass das Material nicht nur zur Bettung von Fernwärmeleitungen sondern in bestimmten Fällen auch zur Bettung von Wasserversorgungsleitungen herangezogen werden kann.

Abschließend wurden die im Grazer Stadtgebiet verwendeten Rohr- und Bettungsmaterialien beschrieben, sowie Ursachen von Schäden an Rohrleitungen aufgezeigt und Lösungsansätze beschrieben.

Literaturverzeichnis

- Baehr, H.-D., & Stephan, K. (1996). *Wärme- und Stoffübertragung, 2. Auflage*. Springer Verlag.
- Bölke, K.-P. (2013). *Kanalinspektion, Zustände erkennen und dokumentieren*. Springer Vieweg, Heidelberg.
- Bosseler B., D. B. (2018).
Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen. In U. H. Hans-Burkart Horlacher, *Rohrleitungen 2*.
Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- DIN 18126. (1996). Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung.
- DIN EN 1610. (2010).
Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen.
Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Ernst & Sohn. (2015).
Flüssigboden aus dem Fahrmischer - Allrounder zur Verfüllung von Leitungsgräben und Baugruben. *Ernst & Sohn Special 2015 - Kanal und Rohrleitungsbau*, S. 60-61.
- Ernst & Sohn. (2017).
Grabenlose Lösungen für die wirtschaftliche und nachhaltige Rohrerneuerung. *Ernst & Sohn Special 2017 Kanal- und Rohrleitungsbau*, 47-51.
- Henögl, O. (2006).
Bodenmechanische Eignung und Thermische Vorteile eines neuartigen Bettungssandes für Fernwärmeleitungen. 5.Kolloquium, Bauen in Boden und Fels, Tagungshandbuch 2006: Herausgeber: Prof. Dr. Ing. habil. Hermann Schad.
- Henögl, O., & Semprich, S. (2003).
"Thermosand (Fohnsdorfer Halditt)"- Bericht und Attest zur Eignungsprüfung im Labor. Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz.
- Kiesselbach, G. (1999).
Projektstudie über die Verfüllung von Künetten. Wien.

- Kolymbas, D. (2019).
Aufbau des Bodens. In *Geotechnik*.
Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Krause, T. (2016).
Bauabrechnung und Mengenermittlung. In T. Krause, & B. Ulke,
Zahlentafeln für den Baubetrieb.
Springer Vieweg, Wiesbaden.
- ÖNORM B 2538. (2018).
Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und
deren Bauteile außerhalb von Gebäuden.
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM B 2538. (2018).
*Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und
deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*. Österreichisches
Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM B 4416. (1. 6 1978).
Erd- und Grundbau; Untersuchung von Bodenproben; Grundsätze für die
Durchführung und Auswertung von Scherversuchen.
- ÖNORM B 5012. (2015).
Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen für die Wasserversorgung
und die Abwasser-Entsorgung.
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-1. (2015).
Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an
Bodenproben, Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts. Österreichisches
Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-4. (2017).
Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Laborversuche an
Bodenproben, Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-
4:2016).
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-7. (2018).
Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an
Bodenprobe, Teil 7: Einaxialer Druckversuch.
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ONR 23131. (2005).
Verfüllungen mit stabilisierten, fließfähigen Verfüllmaterialien (SVM).
Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ONR FW 110A. (1999).

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

Roscher, H. (2018).

Grundsätze der Rehabilitation von Rohrleitungssystemen. In H.-B. Horlacher, & U. Helbig, *Rohrleitungen 2 - Einsatz, Verlegung, Berechnung*. Springer Vieweg, Dresden.

Schad, H., Vogt-Breyer, C., & Bayer, H.-J. (2018).

Horizontalbohrungen und Rohrvortrieb. In K. J. Witt, *Grundbau Taschenbuch; Teil 2: Geotechnische Verfahren*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.

Steirer, B. (2010).

Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen unter Aufrechterhaltung der Wärmedämmeigenschaften. Technische Universität Graz: Masterarbeit.

von Soos, P., & Engel, J. (2017).

Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. In K. J. Witt, *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*.

Anhang

Einaxiale Druckversuche:

Probenalter	3 Tage	7 Tage	14 Tage	21 Tage	28 Tage	35 Tage
Durchmesser d [cm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Höhe h_0 [cm]	13,5	13,5	13,5	13,5	14,0	12,0
Masse m [g]	2130,8	2121,6	2115,8	2054,2	2122,15	1795,8
Volumen V [cm ³]	1060,29	1060,29	1060,29	1060,29	1099,56	942,48
Dichte ρ [g/cm ³]	2,01	2,00	2,00	1,94	1,93	1,91
Kraft F [kN]	0,18	0,40	0,96	1,24	1,15	1,18
Spannung σ [kN/m ²]	22,44	51	121	156	145	148
Dehnung ε [%]	1,76	1,12	1,37	1,17	1,01	1,19

Bestimmung des Wassergehalts:

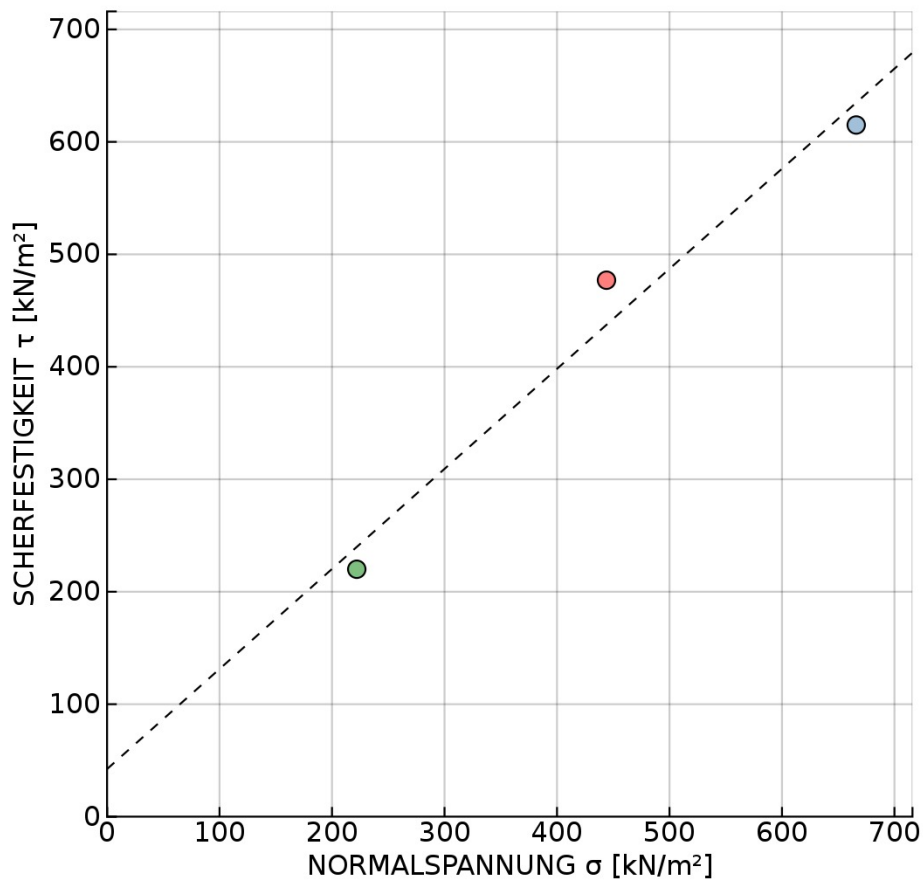
	3 Tage	7 Tage	14 Tage	21 Tage	28 Tage	35 Tage
Masse feucht m_f [g]	2135,7	2121,6	2114,4	1998,5	1348,4	1795,2
Masse trocken m_d [g]	1835,4	1853,8	1924,4	1886,6	1284,3	1706,0
Masse Wasser m_w [g]	300,3	267,8	190,0	111,9	64,1	89,2
Wassergehalt w [%]	16,34	14,45	9,87	5,93	4,99	5,23
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,73	1,75	1,81	1,80	1,80	1,81

Rahmenscherversuch:

RAHMENSCHERVERSUCH NACH ÖNORM B 4416

Büchsengröße: 150 x 150 x 20 mm

GRÖSSTKORN: < 8 mm		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
KONSOLIDIERUNGSDRUCK	σ_c kN/m ²	-	-	-
KONSOLIDIERUNGSZEIT	t_c h	-	-	-
NORMALSPANNUNG	σ kN/m ²	222	444	666
SCHERFESTIGKEIT	τ_f kN/m ²	220,0	477,0	615,0
SCHERWEG	s_1 mm	8,0	10,0	14,0
RESTSCHERFESTIGKEIT	τ_r kN/m ²	-	-	-
RESTSCHERWEG	s_2 mm	-	-	-
WASSERGEHALT nach dem Versuch	w %	-	-	-
REIBUNGSWINKEL (ϕ')	41,7 °	PROBENZUSTAND		gestört
KOHÄSION (c')	42,3 kN/m ²	SCHERGESCHWINDIGKEIT		2 mm/min
RESTSCHERWINKEL (ϕ_r)	- °	RESTSCHERGESCHWINDIGKEIT		- mm/min





INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND NUMERISCHE GEOTECHNIK
 GEOTECHNISCHES LABOR

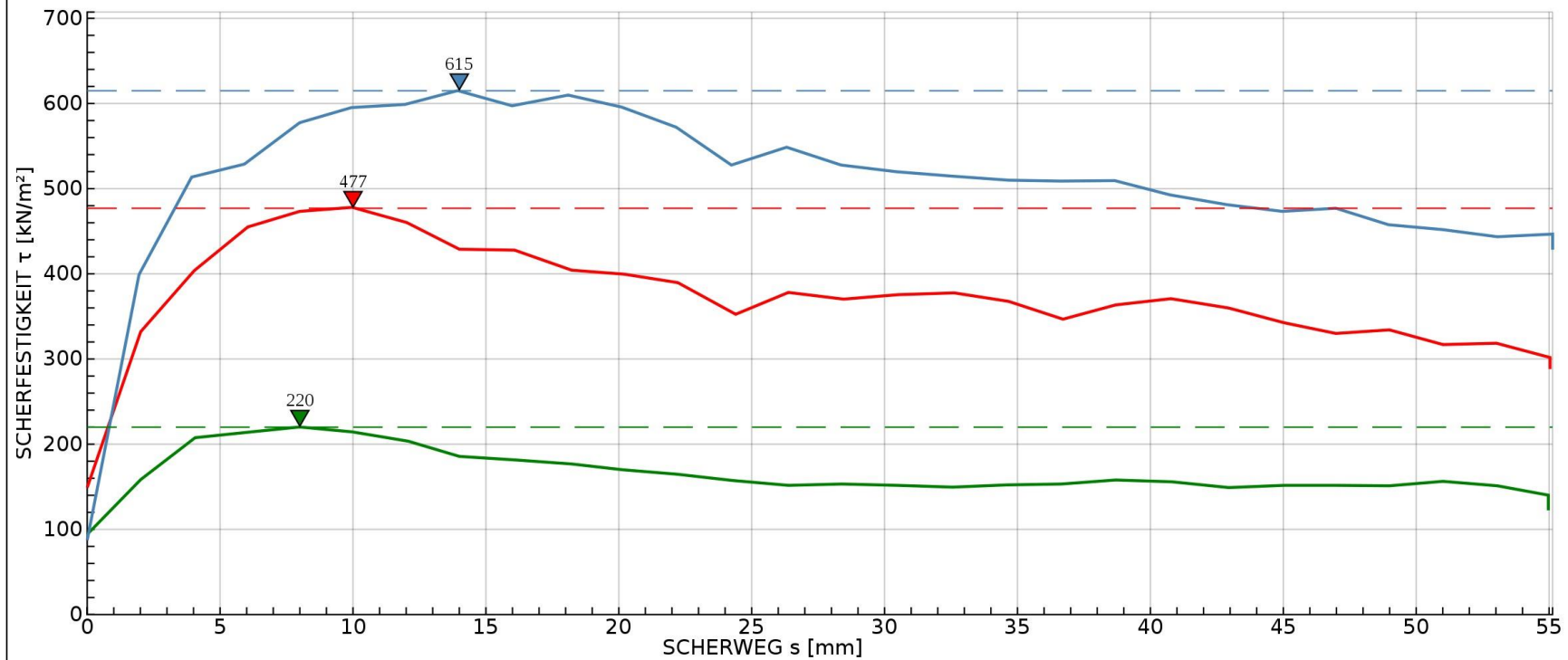
A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA
 Tel.: +43 (0) 316 873-6237 Fax.: +43 (0) 316 873-6238



IBG

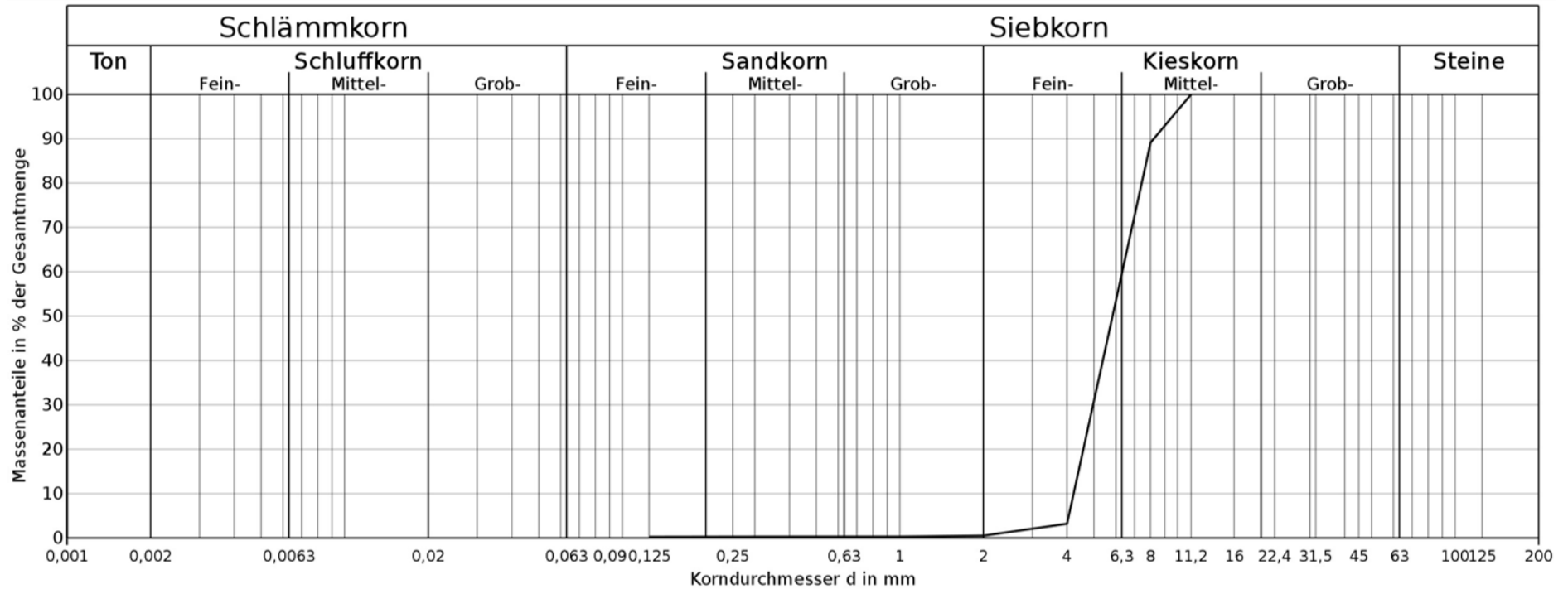
- $\sigma = 666 \text{ kN/m}^2$, $t = -h$, $\sigma_c = - \text{kN/m}^2$, gestört
- $\sigma = 444 \text{ kN/m}^2$, $t = -h$, $\sigma_c = - \text{kN/m}^2$, gestört
- $\sigma = 222 \text{ kN/m}^2$, $t = -h$, $\sigma_c = - \text{kN/m}^2$, gestört

Versuchsdatum **18.10.19 - 19.10.19**
 Schergeschwindigkeit **2 mm/min**
 Größtkorn **< 8 mm**



Bestimmung der Kornverteilung:

KÖRNUNGSLINIE



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner ϕ [mm]	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Anteile größer ϕ [mm]	Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
6947	—	2: 0,5	-	-	-	99,5	-	-	Gr	4,2255mm	4,9652mm	6,3244mm	1,50	0,92