



Johannes Mock, BSc

Einführung neuer Parameter zur Materialklassifizierung von veränderlich festen Gesteinen (Zertrümmerbarkeit und Veränderlichkeit sowie Identifizierung von quellfähigem Material)

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

des Studienganges Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht am

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

der

Technischen Universität Graz

Betreuer: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

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

Graz, September 2020

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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich jenen Personen danken, die mich während meines Studiums sowie beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben:

Für die Betreuung während der Ausarbeitung meiner Masterarbeit bedanke ich mich bei Herrn Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz, Leiter des Labors für Bodenmechanik an der Technischen Universität Graz. Des Weiteren möchte ich auch allen anderen Mitarbeitern des Labors für Bodenmechanik meinen Dank aussprechen, da ich durch sie während meiner Studienzeit praktische Erfahrung sowohl im Labor als auch auf diversen Baustellen sammeln konnte. Für Fragen betreffend der im Rahmen dieser Arbeit getätigten Versuche nahmen sie sich immer Zeit diese ausführlich zu beantworten bzw. ihre Unterstützung anzubieten.

Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher. Sie waren immer bemüht, die Studierenden bestmöglich auf die Praxis vorzubereiten, sowohl im Hörsaal als auch bei Exkursionen.

Auch den Mitgliedern des Stahlbauzeichensaals und anderen Studienkollegen gilt ein besonderer Dank für die gemeinsame Zeit in Graz.

Der herzlichste Dank gebührt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben.

Vielen Dank!

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Kurzfassung

Veränderlich feste Gesteine sind auf der gesamten Erdkruste anzutreffen – dennoch gibt es bisher nur wenige Klassifizierungsmethoden für diese besondere Art von Boden- bzw. Felsmaterialien. Deshalb wird aktuell an der Einführung neuer Parameter zur Materialklassifizierung von veränderlich festen Gesteinen gearbeitet. Die dazu notwendigen Laborversuche sollen genormt werden und zukünftig vor allem in der Normenreihe für Erdarbeiten (ÖNORM EN 16907) Erwähnung finden.

Die vorliegende Masterarbeit behandelt die Klassifizierung von Locker- und Festgestein nach aktueller Normenlage. Weiters wird auf die Besonderheiten von veränderlich festen Gesteinen und auf die Problematik der Klassifizierung solcher Gesteine eingegangen. Hauptaugenmerk wird jedoch auf die Evaluierung neuer Versuche zur Materialklassifizierung von veränderlich festen Gesteinen gelegt. Dabei handelt es sich um die Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} und I_{DGb} , des Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} sowie um die Bestimmung des Methylenblauwerts V_{BS} . Es werden positive und negative Aspekte der Versuchsdurchführung erläutert und Verbesserungsvorschläge aufgezeigt.

Grundsätzlich sind die behandelten Versuche für eine Materialklassifizierung geeignet, dennoch stellen sie nur einen weiteren kleinen Teil einer gesamtheitlichen Lösung für die Problematik von veränderlich festen Gesteinen dar.

Abstract

Hard soils/soft rocks can be found on the entire crust of the earth. However, there are only a few methods of classification when it comes to this special type of soil and rock material. Due to this reason, new parameters for the classification of hard soils/soft rocks have currently been developed. The laboratory tests for this purpose are to be standardized and shall be mentioned in the series of standards for earthworks (ÖNORM EN 16907) in the future.

The present master thesis discusses the classification of soils and rocks according to the current standards. Furthermore, the special features of hard soils/soft rocks and the problems concerning the classification of such materials are dealt with. However, the main focus is on the evaluation of new trials for the classification of hard soils/soft rocks. This includes the determination of the degradability coefficient I_{DGa} and I_{DGb} , the fragmentability coefficient I_{FR} as well as the determination of the methylene blue value V_{BS} . Positive and negative aspects of the experimental procedure are explained and suggestions for improvement are made.

The trials dealt with are fundamentally suitable for the classification of soil and rock material. Nevertheless, they only constitute a small part of an overall solution to the problems of hard soils/soft rocks.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	3
3	Definition und Klassifizierung von Lockergestein	4
3.1	Definition von Lockergestein	4
3.2	Benennung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019	5
3.3	Beschreibung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019	8
3.3.1	Beschreibung von Bodeneigenschaften	8
3.3.2	Beschreibung der unterschiedlichen Bodenarten	10
3.4	Beschreibung von Schichtung und Trennflächen	10
3.5	Klassifizierung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-2:2019	11
4	Definition und Klassifizierung von Festgestein	13
4.1	Definition von Festgestein	13
4.2	Klassifizierung von Festgestein nach ÖNORM EN ISO 14689:2019	13
4.2.1	Benennung von Fels nach ÖNORM EN ISO 14689:2019	14
4.2.2	Beschreibung des Gesteins nach ÖNORM EN ISO 14689:2019	15
4.2.3	Beschreibung des Gebirges nach ÖNORM EN ISO 14689:2019	18
4.3	Bruchindexwerte von Bohrkernen	21
4.4	Gebirgsklassifizierungssysteme	22

5	Materialklassifizierung nach ÖNORM EN 16907-2:2019	23
5.1	Allgemeines zu ÖNORM EN 16907-2:2019	23
5.2	Klassifizierung auf Grundlage nicht veränderlicher Eigenschaften	25
5.2.1	Bodengruppen	25
5.2.2	Felsgruppen	26
5.3	Klassifizierung auf Grundlage veränderlicher Eigenschaften (Zustand)	27
5.3.1	Zustandseigenschaften von Boden	27
5.3.2	Zustandseigenschaften von Fels	27
6	Veränderlich festes Gestein	28
6.1	Definition von veränderlich festem Gestein	28
6.2	Entstehung von veränderlich festem Gestein	30
6.3	Auswirkungen der Veränderlichkeit auf den Bauablauf	32
6.4	Zerfallsprozess und Abgrenzung des Begriffs zur Verwitterung	34
6.5	Klassifizierung von veränderlich festem Gestein	35
6.5.1	Klassifizierung von veränderlich festem Gestein nach ÖNORM	38
6.5.1.1	Klassifizierung nach ÖNORM EN 16907-2:2019	39
6.6	Problematik bei der Klassifizierung von veränderlich festem Gestein	42
6.6.1	Erkennung von veränderlich festem Gestein	43
6.6.2	Probenentnahme	43
6.6.3	Probenlagerung	45
6.6.4	Versuchsdurchführung und Interpretation der Ergebnisse	45

7	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	47
7.1.1	Probenmaterial	47
7.2	Versuchsdurchführung	48
7.2.1	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits- Index (Töpferton)	50
7.2.1.1	Versuchsergebnisse	52
7.2.2	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits- Index (Älterer Schlier)	55
7.2.2.1	Versuchsergebnisse	56
7.2.3	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} (Älterer Schlier)	57
7.2.3.1	Versuchsergebnisse	59
7.2.4	Lagerung unter Wasserbedeckung	60
7.2.4.1	Versuchsergebnisse	60
7.2.5	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGb}	61
7.2.6	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Metylenblau-Werts V_{BS}	62
7.2.6.1	Versuchsergebnisse	63
8	Zusammenfassung	67
9	Literatur	69
10	Anhang	73

Formelzeichen und Abkürzungen

Großbuchstaben

B	[g]	Gesamtmenge des beigegebenen Methylenblaupulvers
C _{0,063}	[%]	Anteil an Kornfraktion (hier: 0,063 mm)
D ₁₀	[mm]	Korngröße bei 10 % des Massendurchgangs bei einer Siebanalyse
D _{max}	[mm]	Durchmesser des Größtkorns
I _{DGa}	[-]	Veränderlichkeits-Index (en.: Degradability Index) ermittelt nach Methode A
I _{DGb}	[%]	Veränderlichkeits-Index (en.: Degradability Index) ermittelt nach Methode B
I _f	[mm]	Bruchindex (en.: Fracture Index)
I _{FR}	[-]	Zertrümmerbarkeits-Index (en.: Fragmentability Index)
M ₀	[g]	Feuchtmasse der zweiten Teilprobe
M ₁	[g]	Trockenmasse der zweiten Teilprobe
MB	[g/kg]	Methylenblauwert der 0/2 mm-Kornklasse
MB _F	[g/kg]	Methylenblauwert der 0/0,125 mm-Kornklasse
MB _K	[g/kg]	Methylenblauwert von Kaolinit
M _{BS}	[g/kg]	Methylenblauwert der 0/50 mm-Kornklasse
M _g	[g]	Masse des trockenen Methylenblaupulvers
M _h	[g]	Masse des feuchten Methylenblaupulvers
RQD	[%]	Fels-Güte-Bezeichnung (en.: Rock Quality Designation)
SCR	[%]	Vollständiger Kerngewinn (en.: Solid Core Recovery)
TCR	[%]	Gesamt-Kerngewinn (en.: Total Core Recovery)
U	[mm]	Verformung
[U]	[mm]	Zulässige Verformung
UCS	[MPa]	Einaxiale Druckfestigkeit (en.: Uniaxial Compressive Strength)
V	[ml]	Menge an beigegebener Methylenblaulösung
V _{B 0/5}	[g/100g]	Methylenblauwert der 0/5 mm-Kornklasse
V _{BS}	[g/100 g]	Methylenblauwert der 0/50 mm-Kornklasse
W	[%]	Wassergehalt der zweiten Teilprobe
W _b	[%]	Wassergehalt des Methylenblaupulvers

Griechische Buchstaben

σ	[MPa]	Belastung durch Baumaßnahme
$[\sigma]$	[MPa]	Gebirgsfestigkeit

1 Einleitung

Auch wenn die Besonderheiten von veränderlich festen Gesteinen im Bauwesen allgemein bekannt sind, werden diese Gesteine in den aktuellen Normen nur wenig bis gar nicht berücksichtigt. Bei falscher Materialklassifizierung bzw. fehlender Rücksichtnahme auf eine mögliche Veränderlichkeit des Materials während und nach der Bauausführung kann dies einerseits zu sicherheitsrelevanten und andererseits zu (bau-)wirtschaftlichen Problemen führen. So kann die Veränderlichkeit beispielsweise Böschungsstabilitätsprobleme im Laufe eines Baugrubenaushubs oder Hebungen und damit Risse in Gebäuden verursachen. Dadurch entstehen naturgemäß Kosten für Planänderungen, besondere Bauverfahren, Sanierungsarbeiten etc., welche es zu vermeiden gilt.

Die fehlende Normengrundlage beruht vermutlich auf der Tatsache, dass eine einheitliche Klassifizierung für alle möglichen Arten der Veränderlichkeit nicht möglich ist und je nach Bauvorhaben die Gegebenheiten anders beurteilt werden müssen. Zusätzlich können alle Arten von Gesteinen veränderliche Eigenschaften aufweisen, wodurch das Problem schwierig einzugrenzen ist. Aufgrund dieser Umstände gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Labor- und Feldversuchen, die die Veränderlichkeit unterschiedlich gut abbilden. Durch unterschiedliche Rahmenbedingungen sind die Ergebnisse aus diesen Versuchen aber oft nicht miteinander vergleichbar.

Als Autoren, welche die Problematik von veränderlich festem Gestein bereits ausführlich behandelt haben, sind z.B. Nickmann (2009) oder Kanji et al. (2020) zu nennen. Ein Überblick über die ingenieurgeologischen Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen ist in Heitfeld (1985) zu finden.

Diese Arbeit behandelt die Besonderheiten von Boden- und Felsmaterial mit veränderlichen Eigenschaften, welche bei Erdarbeiten relevant sein könnten. Um diese Materialien klassifizieren und bewerten zu können, stehen aktuell mehrere Normen, welche die Versuchsdurchführung für veränderlich feste Gesteine behandeln, in Bearbeitung. Diese Versuche sollen auch Teil der Normenreihe für Erdarbeiten (ÖNORM EN 16907) werden, da bisher lediglich auf länderspezifische Normen verwiesen worden ist. Bei den Versuchen handelt es sich um die Bestimmung des Veränderlichkeits-Index, des Zertrümmerbarkeits-Index und des Methylenblau-Werts.

Diese Kennwerte der Materialklassifizierung geben Auskunft darüber, wie sich das Material bei mehrmaligen Befeuchtungs-Trocknungs-Wechseln und bei der Verdichtung während dem Einbau verhält. Der Versuch zur Bestimmung des Methyl-enblau-Werts baut auf einer bereits eingeführten Norm (ÖNORM EN 933-9:2013) auf, behandelt jedoch eine andere Kornklasse. Mit Hilfe dieses Kennwerts können unter anderem Rückschlüsse auf die Quell- bzw. Schwellfähigkeit eines Bodens gezogen werden.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen einen Beitrag für die europäische Normung und im Speziellen für Österreich zu leisten. Es sollen die bereits einleitend erwähnten Versuche auf ihre Durchführbarkeit und Aussagekraft geprüft werden.

Zu Beginn werden in dieser Arbeit die Begriffe Lockergestein und Festgestein definiert, bevor kurz auf die Klassifizierung dieser eingegangen wird. Da die im Rahmen dieser Arbeit getätigten Versuche hauptsächlich in ÖNORM EN 16907 (Normenreihe für Erdarbeiten) behandelt werden bzw. Teil davon werden sollen, wird auch auf diese Normen eingegangen.

Auf die Besonderheiten und Problemstellungen von veränderlich festen Gesteinen wird in Kapitel 6 eingegangen. Neben der durchwegs schwierigen Definition solcher Gesteine werden auch die bisherigen Klassifizierungsmethoden und Laborversuche zur Bestimmung der Eigenschaften von veränderlich festen Gesteinen behandelt. Dadurch soll ein grober Überblick geschaffen werden, um zu verdeutlichen, warum neue Laborversuche notwendig sind bzw. warum die bisherigen Versuchsmethoden nicht ausreichend sind.

In Kapitel 7 werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche erläutert. Dabei wird das Hauptaugenmerk vor allem auf die praktische Durchführung, auf etwaige Besonderheiten oder Vorkommnisse und auf die Versuchsergebnisse gelegt.

In Kapitel 8 werden die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

Da die behandelten Normen noch in Bearbeitung stehen und in englischer Sprache verfasst wurden, findet sich im Anhang (A1-A3) eine Übersetzung dieser Texte. Ebenso sind die Versuchsprotokolle dem Anhang zu entnehmen.

3 Definition und Klassifizierung von Lockergestein

Der Begriff Boden kann mit dem Begriff Lockergestein gleichgesetzt werden, wie auch Fels mit Festgestein. Je nach Autor, Norm, etc. werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Bezeichnungen verwendet.

3.1 Definition von Lockergestein

Nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019, wird unter dem Begriff Boden eine „Anhäufung von Mineralien und/oder organischem Material, die von Hand in Wasser aufgelöst werden können“ verstanden. In Punkt 3.17 nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 wird zudem festgehalten, dass Böden aus der Verwitterung von Fels entstehen können und ein felsartiges Gefüge aufweisen können, aber eine geringere Festigkeit als Fels besitzen.

Die Österreichische Gesellschaft für Geomechanik versteht unter Lockergestein eine „Anhäufung von anorganischen und verschiedenenkörnigen Feststoffen, fallweise auch mit organischen Beimengungen, deren Eigenschaften vorwiegend durch die Kornzusammensetzung, die Lagerungsdichte und den Wassergehalt bestimmt sind.“ (ÖGG Richtlinie, 2008)

Nach Terzaghi und Peck (1961) ist Boden folgendermaßen definiert:

„Ein Boden oder Erdstoff ist ein natürliches Haufwerk aus mineralischen Körnern, das ohne Gewaltanwendung durch mechanische Mittel wie Aufschütteln in Wasser nach Korngrößen zerlegt werden kann.“

Wie ersichtlich, ist die grundsätzliche Definition von Lockergestein bzw. Boden sehr ähnlich unter den verschiedenen Autoren, Normen bzw. Richtlinien. Obwohl nur bedingt auf die geringere Festigkeit in ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 eingegangen wird, ist im Allgemeinen der Begriff Lockergestein klar definiert.

3.2 Benennung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

In der Literatur wird der Begriff der Klassifizierung oft synonym zu den Begriffen der Benennung und Beschreibung verwendet, was streng genommen nicht der Norm entspricht. Bevor die tatsächliche Klassifizierung eines Bodens durchgeführt werden kann, muss der Boden nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 benannt und beschrieben werden. Unter der Benennung versteht man die „Zuordnung eines Namens zu einem Boden auf Grundlage seiner mineralogischen Zusammensetzung, Korngrößenverteilung und/oder Plastizität und/oder organischen Bestandteile“ (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019).

Grundsätzlich wird zwischen natürlichen Böden (mineralische und organische Böden) und anthropogenen Böden unterschieden. Die Benennung für sehr grobkörnige ($D_{\max} > 63$ mm) und grobkörnige Böden (D_{\max} größer als 0,063 mm und maximal 63 mm) erfolgt dabei nach der Korngröße, jene von feinkörnigen Böden nach den plastischen Eigenschaften. Die genaue Vorgehensweise ist in Form eines Flussdiagramms in ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 dargestellt. In nachfolgender Tabelle werden die Benennungen der einzelnen Bodengruppen aufgelistet. (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

Tab. 1: Korngrößenfraktionen gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

Bodengruppe	Korngrößenfraktionen (Symbol)	Korngrößenbereich [mm]
sehr grobkörniger Boden	großer Block (lBo, en: large boulder)	> 630
	Block (Bo, en: boulder)	> 200 und ≤ 630
	Stein (Co, en: cobble)	> 63 und ≤ 200
grobkörniger Boden	Kies (Gr, en: gravel)	> 2,0 und ≤ 63
	Grobkies (cGr, en: coarse gravel)	> 20 und ≤ 63
	Mittelkies (mGr, en: medium gravel)	> 6,3 und ≤ 20
	Feinkies (fGr, en: fine gravel)	> 2,0 und ≤ 6,3
	Sand (Sa, en: sand)	> 0,063 und ≤ 2,0
	Grobsand (cSa, en: coarse sand)	> 0,63 und ≤ 2,0
	Mittelsand (mSa, en: medium sand)	> 0,20 und ≤ 0,63
	Feinsand (fSa, en: fine sand)	> 0,063 und ≤ 0,20
feinkörniger Boden	Schluff (Si, en: silt)	> 0,002 und ≤ 0,063
	Grobschluff (cSi, en: coarse silt)	> 0,02 und ≤ 0,063
	Mittelschluff (mSi, en: medium silt)	> 0,0063 und ≤ 0,02
	Feinschluff (fSi, en: fine silt)	> 0,002 und ≤ 0,0063
	Ton (Cl, en: clay)	≤ 0,002

In der Natur ist jedoch meistens ein Gemisch dieser Kornfraktionen anzutreffen, sodass eine Unterteilung in Haupt-, Neben-, und Drittanteile erfolgen muss. Um dies deutlich zu machen, wird der Hauptanteil (als Subjektiv) in Großbuchstaben und die Nebenanteile (als Adjektiv) in Kleinbuchstaben angeschrieben (z.B. sandiger KIES). Der Hauptanteil bei (sehr) grobkörnigen Böden ist maßgebend für die (bautechnischen) Eigenschaften und besitzt den größten Masseanteil im Korngrößengemisch. Kornfraktionen im Schluff- und Tonbereich beeinflussen zwar weiterhin die Materialeigenschaften, bestimmen diese aber nicht. Der Hauptanteil für feinkörnige Böden wird anhand der plastischen Eigenschaften bestimmt, anstatt durch die tatsächliche Kornfraktion. (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

Nebenanteile werden im Zuge der Benennung in ansteigender Reihenfolge hinsichtlich ihres Masseanteils dem Hauptanteil beigefügt, wie z.B.: feinkiesiger, schluffiger GROBSAND (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019).

Drittanteile spielen in bautechnischer Hinsicht eine untergeordnete Rolle, müssen aber dennoch erwähnt werden. Als Beispiel hierfür können Muschelschalenfragmente angeführt werden. (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

Bei Vorhandensein von organischem Material muss dieses ebenfalls benannt bzw. beschrieben werden. Erkennbar ist organisches Material vor allem durch die Farbe und den Geruch. Auch bei organischen Böden finden mögliche Nebenanteile Erwähnung in der Benennung (z.B.: feinsandiger TORF). (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

In Tab. 2 werden die verschiedenen Benennungen und die dazugehörigen Beschreibungen dargestellt.

Tab. 2: Benennung von organischen Böden nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

Benennung	Klasse	Beschreibung
Torf	faserig	faserige Struktur, leicht erkennbare Pflanzenreste, besitzt eine gewisse Festigkeit
	schwach faserig	Gemisch aus Pflanzenfasern und einem amorphen Pflanzenbrei
	nicht faserig (amorph)	keine erkennbare Pflanzenstruktur, breiige Konsistenz
Mutterboden oder Humus		Pflanzenreste, lebende Organismen und deren Ausscheidungen, anorganische Bestandteile
Gyttja		Sediment, das sich in nährstoffreichem Wasser absetzt und hauptsächlich aus mehr oder weniger stark zersetzten Überresten von Pflanzen und Tieren (Detritus) besteht
Dy		Sediment, das sich in nährstoffarmen Wasser absetzt und hauptsächlich aus abgeschiedenen, kolloidalen Huminstoffen (Braunschlamm) besteht

In ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 werden auch kalkhaltige, sulfidische, vulkanische, glazigene und anthropogene Böden sowie Löß behandelt, wobei auf diese Bodenarten nicht im Detail eingegangen wird.

Des Weiteren sollte die geologische Entstehungsgeschichte bei der Benennung behandelt werden, da sie hilfreiche Hinweise auf bautechnische Eigenschaften wiedergibt. Dazu zählt beispielsweise das Ablagerungsmilieu und die geologische Bezeichnung. So können bereits im Vorfeld (vor der Durchführung von Versuchen) Aussagen über die Eigenschaften des Bodens getroffen werden. Dies ist besonders bei ursprünglich vergletscherten oder tektonisch aktiven Gebieten von Interesse. (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

3.3 Beschreibung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

Unter der Beschreibung von Böden ist nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 die „Beschreibung der Art des Materials und der Eigenschaften der mineralischen (anorganischen) und/oder organischen Bestandteile sowie jeglicher Struktur, Schichtung oder Trennflächen“ gemeint.

3.3.1 Beschreibung von Bodeneigenschaften

Im Folgenden werden die zu beschreibenden Eigenschaften nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 aufgelistet und erläutert.

- **Korngrößenverteilung:**
Bei der Beschreibung der Korngrößenverteilung sind besonders fehlende Kornfraktionen anzuführen. Korngrößen können mit Hilfe einer Kornstufenschau-
lehre kontrolliert werden, mit der Ausnahme von Ton- und Schluffkörnern. Für diese ist ein Verfahren nach Anhang A aus ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 zu wählen.
- **Kornform:**
Die Kornform kann für Kies, Steine und Blöcke beschrieben werden. Dies erfolgt nach den in Tab. 3 dargestellten Parametern.

Tab. 3: Begriffe für die Bezeichnung der Kornform nach
ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

Parameter	Kornform
Eckigkeit	scharfkantig, kantig, wenig eckig (kantengerundet), sehr wenig gerundet (angerundet), gerundet, gut gerundet
Form	kubisch, flach (plattig), länglich (stängelartig)
Oberflächenstruktur	rau, glatt

- Kornfestigkeit:**
In ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 wird für die Bestimmung der Kornfestigkeit auf ÖNORM EN ISO 14689:2019 verwiesen.
- Mineralische Zusammensetzung:**
Für eine umfassende Klassifizierung kann eine petrographische Beschreibung des Bodens nützlich sein.
- Feinkornanteil:**
Der Feinkornanteil muss hinsichtlich der Dilatanz, Zähigkeit, Plastizität, Trockenfestigkeit, Griffigkeit, Kohäsion sowie nach dem Verhalten an der Luft und im Wasser beschrieben werden.
- Konsistenz:**
Die Konsistenz kann in situ und im Labor bestimmt werden. Sie wird mit den Begriffen flüssig – breiig – sehr weich/weich – weich/steif – steif/halbfest – halbfest/fest (hart) beschrieben.
- Farbgebung des Bodens:**
Die Farbe eines Bodens kann bei der Bestimmung der Zusammensetzung hilfreich sein. Die Beschreibung umfasst die Helligkeit, die Sättigung und den Farbton.
- Organischer Anteil:**
Abhängig von der Farbe, kann organischer Boden mit unterschiedlichen Begriffen beschrieben werden.

Tab. 4: Begriffe zur Beschreibung des organischen Anteils nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019

Begriff	Beispiele einer typischen Farbgebung
leicht organisch	grau
organisch	dunkelgrau
stark organisch	schwarz

- **Kalkgehalt:**
Je nach Verhalten der Bodenprobe bei Betropfen mittels zehnpromzentiger Salzsäure kann eine Aussage über den Kalkgehalt getroffen werden.
- **Zersetzungsgrad von Torf:**
Die Beurteilung des Zersetzungsgrades von Torf erfolgt entweder durch einen Ausquetschversuch oder – bei zu trockenem Material – durch Beschreibung des Aussehens.

3.3.2 Beschreibung der unterschiedlichen Bodenarten

Wie in Abschnitt 3.2 bereits angeführt, wird in ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 – wenn auch nur oberflächlich – auf andere Bodenarten (z.B. vulkanische und anthropogene Böden) eingegangen, wobei diese überwiegend nach denselben Methoden benannt und beschrieben werden müssen, wie mineralische Böden.

3.4 Beschreibung von Schichtung und Trennflächen

Im Zuge der Beschreibung der Schichtung von Böden muss einerseits der Aufbau und andererseits die räumliche Anordnung beschrieben werden, da Schichtflächen Schwächezonen darstellen können. Der Abstand der Schichtflächen wird in Millimeter angegeben. Bei Schichtflächen, welche mechanisch wirksame Bruchflächen darstellen, müssen diese nach den Kriterien für die Beschreibung von Trennflächen beschrieben werden. Eine Trennfläche trennt verschiedene Bodenarten voneinander und bildet eine Schwachstelle im Bodengefüge aus. Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 kann eine Trennfläche aufgrund der Ablagerungsbedingungen oder aufgrund von Schrumpfungsprozessen, tektonischen Vorgängen, Hangrutschungen, etc. entstehen. Wie bei Schichtflächen, ist auch bei Trennflächen der Abstand (in Millimeter) zu nennen, wobei Trennflächen auch nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 beschrieben werden sollten. (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019)

Bei Wechsellagerungen und Mischböden muss jede Schicht beschrieben werden, auch wenn sie in ihrer Ausdehnung begrenzt ist oder eine geringe Mächtigkeit aufweist (ÖNORM EN ISO 14688-1:2019).

3.5 Klassifizierung von Lockergestein nach ÖNORM EN ISO 14688-2:2019

Im Zuge der Bodenklassifizierung nach ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 wird der Boden aufgrund festgelegter Merkmale und Kriterien sowie der Entstehung in Gruppen eingeteilt. Die Böden innerhalb einer Gruppe weisen einen annähernd gleichen stofflichen Aufbau und ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der Verwendung als Baumaterial auf. Die Klassifizierung beruht dabei auf den Ergebnissen von bodenmechanischen Feld- und Laborversuchen. (ÖNORM EN ISO 14688-2:2019)

Die Bodengruppen werden nach der stofflichen Zusammensetzung durch folgende Klassifizierungsmerkmale eingeteilt (ÖNORM EN ISO 14688-2:2019):

- **Korngrößenverteilung:**

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung eines Bodens erfolgt üblicherweise mittels Siebung der gröberen Kornfraktionen und mittels Sedimentationsanalyse für feinere Kornfraktionen. Die genaue Beschreibung dieser Versuche kann aus ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 entnommen werden. Die Ergebnisse dieser Versuche werden als Körnungslinie dargestellt. Die Form dieser Körnungslinie wird durch die Krümmungszahl und Ungleichförmigkeitszahl beschrieben. In weiterer Folge kann der Körnungslinie mit Hilfe von Tabelle 2 nach ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 eine Bezeichnung zugeordnet werden.

- **Plastizität:**

Für feinkörnige Böden bzw. feinkörnige Anteile muss die Plastizität beschrieben werden. Diese setzt sich aus der Fließ- und Ausrollgrenze zusammen, welche nach ÖNORM EN ISO 17892-12:2018 zu bestimmen sind. Mittels Plastizitätsdiagramm kann eine Unterscheidung zwischen Schluff und Ton vorgenommen werden.

- **Organische Bestandteile:**

Bei der Klassifizierung von Böden mit organischen Anteilen muss zwischen organischen Böden und mineralischen Böden mit organischem Anteil unterschieden werden.

- **Chemische Bestandteile:**
Chemische Bestandteile, wie z.B. Kalk oder Sulfat, müssen in der Klassifizierung berücksichtigt werden.
- **Entstehung der Ablagerung:**
Für die Beschreibung der Entstehung der Ablagerung wird in ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 auf ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 verwiesen.

Nach ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 dürfen jedoch auch weitere Kennzahlen zur Bodenklassifizierung verwendet werden, wie z.B.:

- Bezogene Lagerungsdichte
- Natürlicher Wassergehalt
- Aktivitätszahl von Ton
- Durchlässigkeit
- Konsistenzzahl
- Quellindex
- Mineralogische Zusammensetzung

4 Definition und Klassifizierung von Festgestein

4.1 Definition von Festgestein

Nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 wird Fels als „natürliche Ansammlung oder natürliches Aggregat von Mineralkörnern, Kristallen oder mineralbasierten Partikeln, die verdichtet, verkittet oder in anderer Form verbunden sind und nicht von Hand in Wasser aufgelöst werden können“ bezeichnet, mit der Anmerkung, dass Fels im Allgemeinen eine größere Festigkeit aufweist als Boden.

Festgestein wird auch als „Mineralgemenge, dessen Eigenschaften hauptsächlich durch seine physikalisch/chemische Bindung bestimmt sind“ bezeichnet (ÖGG Richtlinie, 2008).

Als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal zu Lockergesteinen ist vermutlich die dauerhafte Festigkeit zu nennen, wobei der Begriff Dauerhaftigkeit schwierig abzugrenzen ist.

4.2 Klassifizierung von Festgestein nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Die Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels erfolgt nach ÖNORM EN ISO 14689:2019, auf Grundlage der mineralogischen Zusammensetzung, genetischen Aspekte, geologischen Struktur, Korngröße, Trennflächen und weiteren Parametern. Die Benennung und Beschreibung von Fels ist in nachfolgende Schritte und Unterpunkte unterteilt. (ÖNORM EN ISO 14689:2019)

Im Gegensatz zur Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Lockergestein wird in ÖNORM EN ISO 14689:2019 keine strikte Begriffstrennung und Begriffsdefinition vollzogen.

4.2.1 Benennung von Fels nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

- **Genetische Einheit:**

Die Unterteilung erfolgt nach der Entstehungsart, nämlich in sedimentäres, metamorphes und magmatisches Gestein sowie in Duricrust.

Unter Duricrust versteht man eine zementierte Zone in verwittertem Fels oder im Boden, welche durch pedogene Prozesse oder Verdampfungsvorgänge gebildet wird.

- **Geologische Struktur:**

Unter der geologischen Struktur wird eine Schichtung oder Schieferung sowie die Anisotropie bzw. Isotropie des Felses verstanden. Wenn keine Trennflächen vorhanden sind spricht man von massigem Fels.

Als Schieferung wird eine parallele geologische Struktur verstanden, welche im Zuge der Metamorphose entsteht. Eine Schichtung entsteht hingegen vorwiegend durch Sedimentation.

- **Korngröße:**

Angaben zur Korngröße von Fels können aus Anhang A.1 nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 entnommen werden. Dabei steht im Vordergrund, den Fels zur richtigen Gesteinsgruppe zuordnen zu können, und weniger die tatsächliche, geologisch korrekte Benennung.

- **Mineralogische Zusammensetzung:**

Bei der Benennung von Fels aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung können beispielsweise quellfähige Tonminerale, Salze usw. Erwähnung finden.

- **Poren- und Hohlraumanteil:**

Bei der Beschreibung des Poren- und Hohlraumanteils wird zwischen primären und sekundären Poren oder Hohlräumen unterschieden.

- **Geologische Formation und Alter:**

Die Erwähnung der geologischen Formation und des Alters im Rahmen der Benennung von Fels kann hilfreich für einen Gesamtüberblick der vorherrschenden Gegebenheiten sein.

4.2.2 Beschreibung des Gesteins nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

- **Farbe:**
Die Beschreibung der Farbe erfolgt nach drei Kriterien, nämlich nach der Helligkeit, der Sättigung und dem Farbton. Zu beachten ist, dass künstliche Beleuchtung die Beschreibung verfälschen kann.
- **Korngröße:**
Obwohl bereits in der Benennung von Fels die Korngröße Erwähnung findet, wird auch bei der Beschreibung des Gesteins nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 abermals auf Tabelle A.1 verwiesen.
- **Einaxiale Druckfestigkeit:**
Eine grobe Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit kann mit Hilfe der nachstehenden Tabelle vorgenommen werden. Nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 sollte Gestein mit einer einaxialen Druckfestigkeit unterhalb 0,6 MPa als Boden beschrieben und klassifiziert werden.

Tab. 5: Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Bezeichnung	Benennung durch Handprüfung	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]
außerordentlich gering	Mit dem Fingernagel ritzbar; Stücke der Größe von Kies können zwischen einem Finger und dem Daumen zerdrückt werden.	0,6 bis 1
sehr gering	Mit dem Fingernagel ritzbar; Stücke können durch einen kräftigen Handdruck zerbrochen, einfach mit einem Taschenmesser geritzt oder durch starke Schläge mit der Spitze eines Geologenhammers zerkrümelt werden.	1 bis 5
gering	Dünne Platten, Ecken oder Kanten können durch Handdruck abgebrochen, mit einem Taschenmesser nur schwer geritzt, mit einem Taschenmesser einfach zerkratzt und flache Einkerbungen durch einen starken Schlag mit der Spitze eines Geologenhammers verursacht werden.	5 bis 12,5
mäßig schwach	Dünne Platten, Ecken oder Kanten können durch starken Handdruck abgebrochen und nur schwer mit einem Taschenmesser zerkratzt werden; die in der Hand gehaltene Probe kann mit einem einzigen Schlag eines Geologenhammers zerbrochen werden.	12,5 bis 25
mäßig hoch	Kann mit einem Taschenmesser nicht mehr geschrammt oder geritzt werden; Probe kann auf einer soliden Oberfläche durch einen einzigen festen Schlag mit dem Geologenhammer zerbrochen werden.	25 bis 50
hoch	Probe benötigt mehr als einen Schlag mit dem Geologenhammer, um zu zerbrechen.	50 bis 100
sehr hoch	Probe benötigt viele Schläge mit dem Geologenhammer, um zu zerbrechen.	100 bis 250
außerordentlich hoch	Durch Schläge mit dem Geologenhammer auf die Probe lassen sich nur Splitter lösen.	mehr als 250

- **Verwitterung und Veränderung:**

In Punkt 5 von ÖNORM EN ISO 14689:2019 wird die Verwitterung und Veränderung von Gestein behandelt. Demnach müssen der Grad und das Ausmaß der Verwitterung und sämtliche Ergebnisse aus dem Verwitterungsprozess erfasst werden. Darunter fällt der Grad und das Ausmaß der Veränderung der Farbe sowie die ursprüngliche Gesteinsfestigkeit und die Änderungen der Festigkeit. In der nachfolgenden Tabelle sind die Bezeichnungen zur Beschreibung von Verwitterung und Veränderungen von Gestein angegeben.

Tab. 6: Bezeichnungen zur Beschreibung von Verwitterung/Veränderungen von Gestein nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Bezeichnung	Beschreibung
frisch	Keine sichtbaren Zeichen von Verwitterung/Veränderungen des Gesteins
verfärbt	Die Farbe des ursprünglich frischen Gesteins hat sich verändert und zeugt von Verwitterung und Veränderungen. Es sollte der Grad der Abweichung von der Farbe des frischen Gesteins angegeben werden. Wenn die Farbänderung auf bestimmte Mineralbestandteile beschränkt ist, sollte dies angegeben werden.
zerfallen	Das Gestein ist durch physikalische Verwitterung zerlegt, so dass kein Verbund mehr zwischen den Gesteinskörnern besteht. Das Gestein ist zu einem Boden verwittert/verändert, wobei die ursprüngliche Gesteinstextur noch erhalten ist. Das Gestein ist bröcklig, aber die Mineralkörner sind nicht verwittert.
zersetzt	Das Gestein ist durch die chemische Veränderung der Mineralkörner zu einem Boden verwittert, wobei die ursprüngliche Gesteinstextur noch erhalten ist. Einige oder alle Mineralkörner sind zersetzt.

- **Bestimmung des Kalkgehalts:**

Der Kalkgehalt bzw. der Gesamtkarbonatanteil wird mit Hilfe von verdünnter Salzsäure bestimmt. Je nach Intensität des Aufbrausens bei Betropfen der Probe erfolgt die Unterscheidung in kalkfreies, leicht kalkhaltiges, kalkhaltiges und stark kalkhaltiges Gestein.

- **Zerfall von Gestein:**

Einen weiteren Unterpunkt stellt der Zerfall von Gestein dar, welcher in einer neuen Umgebung nach Probenahme auftreten kann. Die Veränderlichkeit von Gestein an der Luft ist in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7: Veränderlichkeit von Gestein an der Luft nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Bezeichnung	Beschreibung
nicht veränderlich	keine Veränderungen
veränderlich	Bröckeln der Probenoberfläche
stark veränderlich	Zerfall der Probe

Die Beschreibung der Veränderlichkeit unter Wasserbedeckung erfolgt nach Tab. 8.

Tab. 8: Veränderlichkeit von Gestein unter Wasserbedeckung gemäß ÖNORM EN ISO 14689:2019

Bezeichnung	Beschreibung (nach 24 h unter Wasserbedeckung)	Grad
nicht veränderlich	keine Veränderungen	1
veränderlich	Bildung von einigen Rissen oder Bröckeln von Teilen der Probenoberfläche	2
	Bildung von vielen Rissen, zerfällt in kleine Stücke oder starkes Bröckeln der Probenoberfläche	3
stark veränderlich	Probe ist zerfallen oder Bröckeln fast der gesamten Probenoberfläche	4
	Probe ist vollständig zerfallen oder in Brei übergegangen	5

4.2.3 Beschreibung des Gebirges nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Der intakte Fels zwischen den Trennflächen wird als Gestein bezeichnet. Gestein, Trennflächen und Verwitterungszonen bilden zusammen das Gebirge, welches ebenfalls beschrieben werden muss (ÖNORM EN ISO 14689:2019):

- **Unterscheidung verschiedener Felsarten:**

Die Beschreibung der Felsarten erfolgt analog zur Benennung des Fels (siehe 4.2.1).

- **Geologische Struktur und Schichtung:**

Beispiele von Bezeichnungen für die Beschreibung der geologischen Struktur sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tab. 9: Bezeichnungen für die Beschreibung der geologischen Struktur nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Sedimentärer Fels	Metamorpher Fels	Magmatischer Fels
geschichtet	zerschert	massig
geschichtet mit Zwischenlagen	geschiefert	fließgebändert
laminiert	feinschiefrig	gefaltet
gefaltet	gebändert	gestreift
massig	gestreift	-
gradiert	gneisartig	-
-	gefaltet	-

Des Weiteren findet sich in ÖNORM EN ISO 14689:2019 eine Tabelle zur Beschreibung des Schichtflächenabstands bzw. der Schichtmächtigkeit. Diese wird in Millimeter angegeben. Wenn eine Schichtfläche auch eine Trennfläche darstellt, muss diese zusätzlich nach den Kriterien für die Beschreibung von Trennflächen beschrieben werden.

- **Trennflächen:**

Durch Trennflächen wird der intakte Fels unterteilt. An diesen Flächen herrschen je nach Art der Entstehung und vielen weiteren Parametern unterschiedliche Materialeigenschaften vor. Die Beschreibung von Trennflächen erfolgt z.B. anhand des Trennflächenabstands, der Rauigkeit, Orientierung, Öffnungsweite, Durchlässigkeit, sowie des Kluffüllungsmaterials und weiteren Parametern.

- **Verwitterung:**

In Punkt 6.5 nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 wird die Verwitterung von Gebirgen behandelt.

„Die Verwitterung führt gegebenenfalls zur Umwandlung des Fels in Boden und das Verwitterungsprofil muss mit Bezeichnungen von drei Grundeinheiten beschrieben werden: Fels, Fels und Boden (veränderlich fester Fels), Boden.“ (ÖNORM EN ISO 14689:2019)

Im Zuge der Beschreibung der Verwitterung von Gebirgen muss diese beispielsweise den Bruchzustand und die Auswirkungen auf Trennflächen umfassen. Die entstehenden Verwitterungsprodukte müssen entsprechend ÖNORM EN ISO 14688-1:2019, ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 und ÖNORM EN ISO 14689:2019 beschrieben werden.

Die Unterteilung der verschiedenen Verwitterungseinheiten für das Profil eines Fels erfolgt gemäß Tab. 10.

Tab. 10: Klassifizierung der Verwitterungsstufen von Gebirgen nach ÖNORM EN ISO 14689:2019

Bezeichnung	Beschreibung	Stufe
frisch	Kein sichtbares Zeichen von Verwitterung des Fels; möglicherweise leichte Verfärbung an den Hauptoberflächen oder Trennflächen.	0
schwach verwittert	Verfärbung weist auf Verwitterung des Fels und der Oberflächen der Trennflächen hin.	1
mäßig verwittert	Weniger als die Hälfte des Fels ist verwittert oder zersetzt. Frischer oder verfärbter Fels liegt entweder als ein zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkerne vor.	2
stark verwittert	Mehr als die Hälfte des Fels ist zersetzt oder zerfallen. Frischer oder verfärbter Fels liegt entweder als ein zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkerne vor.	3
vollständig verwittert	Der gesamte Fels ist zu Boden zersetzt und/oder zerfallen. Die ursprüngliche Gebirgsstruktur ist größtenteils noch unversehrt.	4
zersetzt	Der gesamte Fels ist zu Boden umgewandelt. Die Gebirgsstruktur und die Materialtextur sind aufgelöst. Das Volumen ist stark verändert, aber der Boden hat sich nicht wesentlich bewegt.	5

Der Vollständigkeit halber wird hier noch auf ein Schema mit mehreren Ansätzen für die Beschreibung und Klassifizierung der Verwitterung von Fels (Gestein und Gebirge) hingewiesen. Dieses findet sich in Anhang B nach ÖNORM EN ISO 14689:2019.

- **Vorhandenes Grundwasser:**

Je nach Bauvorhaben, kann eine Beschreibung des Grundwassers (z.B. Höhe des Grundwasserspiegels) von Bedeutung sein.

4.3 Bruchindexwerte von Bohrkernen

In ÖNORM EN ISO 14689:2019 finden auch Bruchindexwerte von Bohrkernen Erwähnung. Diese werden im Folgenden aufgelistet bzw. kurz beschrieben. Dabei gilt zu beachten, dass diese Indexwerte z.B. von der Bohrlochorientierung und vom Durchmesser der Bohrung abhängig sind.

Gesamtkerngewinn TCR (Total Core Recovery):

Der Gesamtkerngewinn ist nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 „die Länge eines gewonnenen Kerns (sowohl fest als auch gestört), die als prozentualer Anteil der Kernmarschlänge angegeben wird.“ Unter dem Begriff Kernmarsch bzw. Kernmarschlänge wird gemäß ÖNORM EN ISO 22475-1:2006 die „abgebohrte Bohrstrecke zwischen Ein- und Ausbau des Kernrohres“ verstanden. Als Formel ausgedrückt ergibt sich somit:

$$\text{TCR} = \frac{\text{Gesamtlänge aller Gesteinsstücke}}{\text{Kernmarschlänge}} * 100 \% \quad (1)$$

Vollständiger Kerngewinn SCR (Solid Core Recovery):

Unter dem vollständigem Kerngewinn wird gemäß ÖNORM EN ISO 14689:2019 „die Länge des als fester Zylinder gewonnenen Kerns, die als prozentualer Anteil der Kernmarschlänge angegeben wird“, verstanden. Die Formel dazu lautet:

$$\text{SCR} = \frac{\text{Länge des festen, zylinderförmigen Kerns}}{\text{Kernmarschlänge}} * 100 \% \quad (2)$$

Fels-Güte-Bezeichnung RQD (Rock Quality Designation):

Nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 ist die Fels-Güte-Bezeichnung „die addierte Länge aller Kernstücke mit mindestens einem vollem Durchmesser, die zwischen den natürlichen Brüchen mindestens 100 mm lang sind“, ausgedrückt als prozentualer Anteil der Kernmarschlänge. Dies führt zu folgender Formel:

$$\text{RQD} = \frac{\text{Gesamtlänge aller Gesteinsstücke (L > 100 mm)}}{\text{Kernmarschlänge}} * 100 \% \quad (3)$$

Bruchindex If (Fracture Index):

Der Bruchindex ist gemäß ÖNORM EN ISO 14689:2019 „der Abstand zwischen natürlichen Brüchen entlang des Kerns in Zonen von gleichmäßiger Beschaffenheit, nicht je Kernmarsch.“

4.4 Gebirgsklassifizierungssysteme

Gebirgsklassifizierungssysteme werden in ÖNORM EN ISO 14689:2019 nicht behandelt, sie sollten jedoch dort angewandt werden, wo es zweckdienlich erscheint. Bei Anwendung eines Gebirgsklassifizierungssystems, muss dies dokumentiert werden. Die Auswahl hängt von der geologischen Situation sowie von den bautechnischen Anforderungen ab. (ÖNORM EN ISO 14689:2019)

Es sollte auch eine Abwägung aller Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme im Vorhinein getroffen werden, da sonst die Realität unter Umständen im Modell falsch dargestellt wird. Bekannte Gebirgsklassifizierungssysteme sind z.B.:

- Rock Mass Rating: RMR; de.: Gebirgsbewertung, auch als RMR-Wert oder RMR-Index bezeichnet; entwickelt von Bieniawski (1989)
- Q-System: auch als Q-Wert oder Quality-Index bezeichnet; entwickelt von Barton et al. (1974)
- Rock Structure Rating: RSR; de.: Felsstrukturbewertung, auch als RSR-Wert oder RSR-Index bezeichnet; entwickelt von Wickham et al. (1972)
- Rock Mass Index: RMI, de.: Gebirgskennzahl; entwickelt von Palmström (1995)

5 Materialklassifizierung nach ÖNORM EN 16907-2:2019

5.1 Allgemeines zu ÖNORM EN 16907-2:2019

Neben den zuvor beschriebenen Normen wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 396 „Erdarbeiten“ eine eigene Normenreihe (ÖNORM EN 16907) für Erdarbeiten erarbeitet.

Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen und geologischen Bedingungen in den einzelnen Ländern ist eine einheitliche, europaweite Materialklassifizierung nicht möglich. Mit dieser Norm werden deshalb die Grundsätze und Systeme für die Klassifizierung unter Berücksichtigung nationaler Verfahren festgelegt. Länderspezifische Abweichungen zur Berücksichtigung nationaler Erfahrungswerte sind somit gestattet. Entgegen zu den bereits angeführten Normen wird auch die Bedeutung der Zertrümmerbarkeit und Veränderung (bzw. Veränderlichkeit) von Fels in dieser Norm erwähnt. Diese sind neben der Korngrößenverteilung und der Wasserempfindlichkeit wichtige Parameter der Materialklassifizierung für Erdarbeiten. Die Klassifizierung umfasst die Definition von Materialgruppen auf Basis der nicht-veränderlichen Materialeigenschaften und die Definition von Materialklassen, welche die Materialgruppen sowie veränderliche Eigenschaften beinhalten. Die Klassifizierung in Gruppen ermöglicht es eine Aussage zu treffen, welche Materialien für die Verwendung in einem Erdbauwerk geeignet sind. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

Nach ÖNORM EN 16907-2:2019 wird die Baugrunduntersuchung in drei Phasen unterteilt:

- In-situ-Zustandsbeschreibung des Bodens bzw. Fels
- Klassifizierung in Gruppen ähnlicher Materialeigenschaften auf Grundlage nicht veränderlicher Eigenschaften
- Klassifizierung auf Grundlage veränderlicher Eigenschaften

In Tab. 11 und Tab. 12, werden die Phasen der Beschreibung und Klassifizierung sowie deren Definition und Grundlage dargestellt.

Die Beschreibung erfolgt dabei grundsätzlich nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2019 und ÖNORM EN ISO 14689:2019 (ÖNORM EN 16907-2:2019).

Tab. 11: Verschiedene Phasen der Beschreibung und Klassifizierung und deren Definition, zusammengefasst aus Tabelle 1 nach ÖNORM EN 16907-2:2019

Phase	Definition
Beschreibung	Geotechnische Beschreibung von Boden und Fels zur Darstellung der Baugrundeigenschaften, die den Schwierigkeitsgrad des Lösens bestimmen und die Wiederverwendung des Aushubmaterials beeinflussen. Die genannten Merkmale können bei der Probenahme oder bei der Ausführung von Erdarbeiten zerstört werden (z.B. Schichtung, Schichtlagerung, Kluftabstände).
Klassifizierung auf Basis nicht veränderlicher Eigenschaften	Klassifizierung auf Grundlage nicht veränderlicher Eigenschaften, die nicht durch die Auswirkungen der Probenahme oder der Erdarbeiten beeinflusst werden. Zuordnung von Boden- und Felsmaterialien zu Boden-/ Felsgruppen.
Klassifizierung zusätzlich auf Basis veränderlicher Eigenschaften	Charakterisierung des Baugrunds auf Basis veränderlicher Baugrundeigenschaften, d.h. solcher Eigenschaften die sich durch Probenahme oder durch Erdbaumaßnahmen verändern können.

Tab. 12: Grundlagen für die Phasen der Beschreibung und Klassifizierung, zusammengefasst aus Tabelle 1 nach ÖNORM EN 16907-2:2019

Phase	Grundlage
Beschreibung	Feld- und Laborbeobachtung. Beschreibung von Material und Masseneigenschaften.
Klassifizierung auf Basis nicht veränderlicher Eigenschaften	Festlegen geeigneter Untersuchungen zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung und weiteren bodenphysikalischer Eigenschaften, wie z.B. Korngröße und Plastizität.
Klassifizierung zusätzlich auf Basis veränderlicher Eigenschaften	Festlegen geeigneter Untersuchungen zur Bestimmung von Wassergehalt, Festigkeit, Steifigkeit, Stabilität usw. Die zu messenden Eigenschaften sind abhängig von der Korngröße des Bodens und der Partikelstärke.

Nach ÖNORM EN 16907-2:2019 gibt es unterschiedliche Motive bzw. Beweggründe für eine Klassifizierung. Einerseits kann eine Klassifizierung stattfinden, um die Eignung des Erdbaumaterials z.B. während dem Verdichten zu evaluieren.

Je nach Vorgang (Lösen, Laden, Lagerung, etc.) werden dabei unterschiedliche Merkmale für Boden sowie Fels in Tabelle 12 nach ÖNORM EN 16907-2:2019 angegeben. Unter Merkmalen, werden nach ÖNORM EN 16907-2:2019 „Materialeigenschaften, die für eine festgelegte Verwendung relevant sein können“, verstanden. Andererseits kann eine Klassifizierung auch notwendig sein, um die Eignung des Materials in bestimmten Teilen des Bauwerks nachweisen zu können (z.B. Verwendung des Erdbaumaterials als Dränagematerial). Beispiele von Merkmalen für die Verwendung des Erdbaumaterials in Erdbauwerken finden sich in Tabelle 13 nach ÖNORM EN 16907-2:2019. Im Zuge der Klassifizierung ist zudem anzustreben, dass alle Aushubmaterialien wiederverwendet werden können. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

Eine Auflistung der für Erdbauarbeiten relevanten Versuchsnormen findet sich in Anhang A nach ÖNORM EN 16907-2:2019, wobei aber nicht zu allen Parametern europäische Normen existieren.

5.2 Klassifizierung auf Grundlage nicht veränderlicher Eigenschaften

Neben den nachfolgend beschriebenen nicht veränderlichen Eigenschaften gibt es auch weitere Eigenschaften, anhand denen eine Materialklassifizierung erfolgen kann. Diese sind z.B. (ÖNORM EN 16907-2:2019):

- Mineralogische Zusammensetzung des Korns, einschließlich der Art vorhandener Tonminerale sowie der Lithologie des Einzelkorns
- Kornform, Korndichte, Kornfestigkeit
- Maximale Trockendichte
- Empfindlichkeit gegen Frosthebung

5.2.1 Bodengruppen

Für die Materialklassifizierung von Böden finden folgende Hauptgruppen Verwendung (ÖNORM EN 16907-2:2019):

- Sehr grobkörnige Böden ($D_{\max} > 63 \text{ mm}$)
- Böden mit Korndurchmessern bis 63 mm ($D_{\max} \leq 63 \text{ mm}$) und mit maximal 2 % organischen Bestandteilen

- Organische Böden mit mehr als 2 % organischen Bestandteilen
- Anthropogene Materialien

Die genauen Bezeichnungen der einzelnen Gruppen können aus den Tabellen 2-5 nach ÖNORM EN 16907-2:2019 entnommen werden.

Alternativ können auch national anerkannte Verfahren verwendet werden. Die Klassifizierung anhand der nicht veränderlichen Eigenschaften sollte zumindest durch die Korngrößenverteilung, die Plastizität und die organischen Bestandteile erfolgen. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

5.2.2 Felsgruppen

Im Allgemeinen sind Felsmaterialien im Erdbau verwendbar, mit Ausnahme von veränderlich festem oder quellfähigem Fels. Felsmaterial kann auf Basis von Materialgruppen, auf Basis der nicht veränderlichen Eigenschaften, oder mithilfe eines anerkannten nationalen Klassifizierungssystem klassifiziert werden. Als Beispiel werden die Materialgruppen bezüglich der Festigkeit in Tab. 13 zusammengefasst. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

Tab. 13: Felsmaterialgruppen (Festigkeit), zusammengefasst nach ÖNORM EN 16907-2:2019

Felsgruppe		Druckfestigkeit [MPa]
Felsgruppensymbol	Festigkeitsbegriff	
RES	äußerst fester Fels	> 250
RVS	sehr fester Fels	100 bis 250
RS	fester Fels	50 bis 100
RMS	mittelfester Fels	25 bis 50
RW	brüchiger Fels	5 bis 25
RVW	sehr brüchiger Fels	1 bis 5
REW	äußerst brüchiger Fels	0,6 bis 1

In Tabelle 7 nach ÖNORM EN 16907-2:2019 werden die Felsgruppen für die Verwendung in Erdarbeiten nach der bezeichnenden Festigkeit unterteilt und weitere Angaben, z.B. zur geologischen Beschaffenheit oder zum Micro-Deval-Koeffizienten, gemacht. Weiters finden sich in ÖNORM EN 16907-2:2019 Tabellen für die Klassifizierung von Kreidegruppen und Salzgestein.

5.3 Klassifizierung auf Grundlage veränderlicher Eigenschaften (Zustand)

Die Klassifizierung muss die Art des Erdbauwerks sowie die Lage des Bodenmaterials im Erdbauwerk berücksichtigen. Sie ist damit maßgebend für die Qualitätsanforderungen. Zu berücksichtigen sind auch die verschiedenen Prozessphasen im Zuge von Erdbauarbeiten (Aushub, Mischen, Transport, Einbau, Verdichtung), da sich die Materialcharakterisierung je nach Phase unterscheiden kann. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

5.3.1 Zustandseigenschaften von Boden

Als Zustandseigenschaften nach ÖNORM EN 16907-2:2019 sind beispielsweise zu nennen:

- Wassergehalt
- (Un-)dränierete Festigkeit
- (Einaxiale) Druckfestigkeit
- Steifigkeit/Elastizitätsmodul
- Schwellpotential

5.3.2 Zustandseigenschaften von Fels

Bei der Klassifizierung von Fels muss diese einerseits in situ vor dem Lösen des Fels und andererseits für das gelöste Material erfolgen. Der Fels-Lösewiderstand bildet sich dabei aus einer Kombination aus den nicht veränderlichen Eigenschaften (Felsfestigkeit) und den Eigenschaften des anstehenden Felses (Trennflächenabstände, seismische P-Wellengeschwindigkeit). Gelöstes Felsmaterial kann für die Klassifizierung wie (sehr) grobkörniger Boden behandelt werden. (ÖNORM EN 16907-2:2019)

6 Veränderlich festes Gestein

6.1 Definition von veränderlich festem Gestein

Um einen groben Überblick über die Definition von veränderlich festem Gestein zu schaffen, werden im Folgenden verschiedene Autoren zitiert. Dabei ist zu beachten, dass veränderlich festes Gestein – je nach Autor – auch als Übergangsgestein, halbfestes Gestein, Hard Soil/Soft Rock oder aber nur als Soft Rock bzw. Weak Rock bezeichnet wird. Manche Autoren vollziehen hingegen eine strikte Trennung zwischen den Begriffen Hard Soil und Soft Rock. Durch die Vielzahl an Bezeichnungen wird bereits ersichtlich, welche Brisanz das Thema hat. Im Rahmen dieser Masterarbeit – wie auch allgemein im deutschen Sprachgebrauch – findet hauptsächlich der Begriff veränderlich festes Gestein Verwendung, mit der Ausnahme, die Ausdrucksweise bestimmter Autoren hervorzuheben. Der Vorteil dieses Begriffs ist der Wegfall einer Diskussion der Begriffe Hard und Soft, wie dies sonst notwendig wäre.

„Unter veränderlich festen Gesteinen versteht man vor allem Gesteine, die Ton enthalten. Wenn man diese Gesteine freilegt, zerfallen sie durch die Witterung in relativ kurzer Zeit [...]. Ihre Festigkeit kann zwar im ungestörten Zustand sehr hoch sein, trotzdem werden sie an der Luft und unter Wassereinfluss zu nicht tragfähigen Böden.“ (Pech et al. 2005)

„Im allgemeinen Sprachgebrauch der Ingenieurgeologie und Geotechnik werden veränderlich feste Gesteine vor allem durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

Festigkeit: Veränderlich feste Gesteine sind Festgesteine im Sinne der DIN EN ISO 14689-1 und weisen einen deutlichen inneren Zusammenhalt auf, der sie von Lockergesteinen unterscheidet;

Sensitivität gegenüber Wasser: Veränderlich feste Gesteine reagieren auf Veränderungen des Wassergehalts durch irreversible Schwächung des Mineralgefüges bis hin zur völligen Desintegration;

Bautechnisch relevante Reaktionszeit: Die Veränderung bzw. Zerstörung erfolgt in einer bautechnisch relevanten, kurzen Zeitspanne von bis zu wenigen Jahren.

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften nehmen die veränderlich festen Gesteine damit eine Zwischenstellung zwischen den (bindigen) Lockergesteinen und den (dauerhaft festen) Festgesteinen im engeren Sinne ein.“ (Plinninger et al. 2012)

Baud und Gambin (2014) merkten an, dass auch die Betrachtungsweise einen Unterschied in der Definition bedeuten kann: So bezeichnet die Geologie die gesamte Erdkruste als Gestein, unabhängig von ihrem physikalischen Zustand (fest, flüssig oder gasförmig). Jede Form von Gestein hat dabei ihre eigene Entstehungsgeschichte. Für die Bauindustrie ist diese Klassifizierung aber nicht zielführend, da sie viel zu ungenau ist (Baud und Gambin 2014).

Auch Terzaghi und Peck (1961) weisen auf diesen Unterschied hin:

„Für die Geologen umfaßt der Begriff ‚Gestein‘ beispielsweise alle die Erdkruste bildenden Massen, ohne Rücksicht auf den Grad der gegenseitigen Bindung der Mineralteilchen, während der Begriff ‚Boden‘ in der landwirtschaftlichen Bodenlehre nur auf den Teil der Erdkruste angewandt wird, der in der Lage ist, eine Vegetation zu entwickeln. Wenn ein Bauingenieur von Unterlagen Gebrauch macht, die auf benachbarten Wissensgebieten erarbeitet wurden, muß er sich daher versichern, daß er den Sinn der dort gebrauchten Bezeichnungen Boden und Gestein richtig erfaßt.“

He und Sun (2020) unterscheiden zudem zwischen „Geological Soft Rock“ und „Engineering Soft Rock“. Geological Soft Rock ist charakterisiert durch eine niedrige Festigkeit, hohe Porosität, schwache Zementierung und Empfindlichkeit gegenüber Verwitterung. Oftmals finden sich auch quellfähige Tonminerale im Gestein. Unter Engineering Soft Rock wird Gestein verstanden, welches während der Baumaßnahmen große Verformungen hervorruft. Diese Definition kann auch durch eine Beziehung zwischen der Materialfestigkeit und der durch die Baumaßnahmen stattfindenden „Gebirgsstörung“ ausgedrückt werden:

$$\sigma \geq [\sigma] \quad (4)$$

σ	[MPa]	Belastung durch Baumaßnahme
$[\sigma]$	[MPa]	Gebirgsfestigkeit

$$U \geq [U] \quad (5)$$

U	[mm]	Verformung
[U]	[mm]	Zulässige Verformung

Unter der Belastung durch die Baumaßnahme verstehen He und Sun (2020) eine resultierende Kraft, welche aus der Gewichtskraft, Quelldruckkraft usw. besteht.

Verformungen, welche den zuvor festgelegten (zulässigen) Wert überschreiten, werden als große Verformungen definiert.

Zusätzlich zu den Bezeichnungen in der Fachliteratur gibt es in Österreich auch lokale Bezeichnungen für veränderlich festes Gestein, wie z.B. Opok oder Schlier. Unter Opok versteht man ein „tegelartiges Sedimentgestein“ (Tischelmayer), unter Schlier „eine Art Mergel“ (Österreichisches Wörterbuch 2005). Teilweise werden – vor allem die umgangssprachlichen – Begrifflichkeiten auch untereinander vermischt, sodass eine klare Grenzziehung unmöglich erscheint.

6.2 Entstehung von veränderlich festem Gestein

In diesem Abschnitt soll kurz auf die Entstehung von veränderlich festem Gestein eingegangen werden. Da im Rahmen dieser Arbeit überwiegend die Materialklassifizierung für Erdarbeiten und weniger die geologische Entstehungsgeschichte behandelt wird, wird dieses Thema nur angeschnitten.

Grundsätzlich können veränderlich feste Gesteine metamorphe, magmatische oder sedimentäre Gesteine sein, wie in Tab. 14 dargestellt ist.

Tab. 14: Typische Arten von Soft Rock nach Kanji (2014)

Genetische Einheit	Unterklassen
Sedimentäre Gesteine	Klastisch: Tonstein, [...], Schluffstein, Sandstein, Konglomerate, Brekzien, Mergel Evaporite: Salzgestein, Carnallite, etc.; Lösliche Gesteine: Kalkstein, Dolomite, Gips, Kohle
Magmatische Gesteine	Vulkanische Konglomerate, Brekzien und Lahar; Basaltische Brekzien; Pyroklastische Ablagerungen, Vulkanasche, Tuff und Ignimbrite; Verwitterungsprodukte aus kristallinem Gestein
Metamorphe Gesteine	Tonschiefer, Phyllit, (kristalliner) Schiefer, Quarzit (schwach zementiert), Metavulkanische Ablagerungen

Nach Nickmann (2009) kann bei der Bildung von veränderlich festem Gestein zwischen einem „konstruktiven Ast“ und einem „destruktiven Ast“ unterschieden werden. Am konstruktiven Ast wird die Umwandlung von Lockergestein in Festgestein dargestellt. Die Diagenese bei bindigen Lockergesteinen dürfte die Bildung eines veränderlich festen Gesteins verursachen. Dauerhafte Festigkeit ist dann (im

Normalfall) nur unter Bedingungen der Metamorphose möglich. Nichtbindige Lockergesteine können durch Zementierung direkt in Festgesteine umgewandelt werden. Am destruktiven Ast ist hingegen die Verwitterung dargestellt. Auch sie kann – muss aber nicht – die Entstehung eines veränderlich festen Gesteins verursachen. Bei Bildung von wasserempfindlichen Mineralen im Festgestein entsteht veränderlich festes Gestein, welches bei weiterem Verwitterungsfortschritt wiederum zu Lockergestein wird. Ein direkter Übergang von Festgestein in Lockergestein ist vor allem durch mechanische Zerlegung möglich. Diese hat die Bildung von Klüftkörpern zur Folge, die bei andauernder Verwitterung in bindigen Boden oder in Grus umgewandelt werden. (Nickmann 2009)

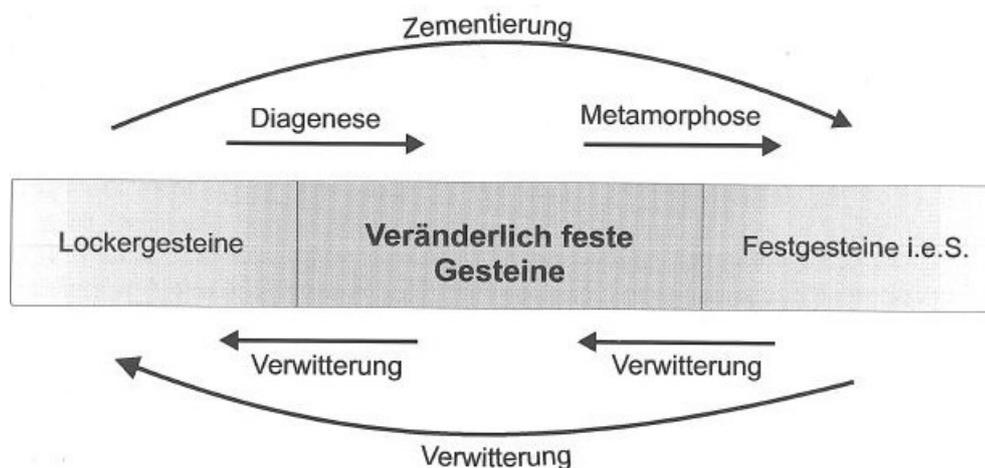


Abb. 1: Stellung der veränderlich festen Gesteine als Zwischenglied zwischen den Lockergesteinen und den Festgesteinen i. e. S. Die Übergänge zwischen den Gesteinsgruppen sind fließend. (Nickmann 2009)

In Abb. 2 werden zusätzlich die geologischen Prozesse dieses Ablaufs dargestellt

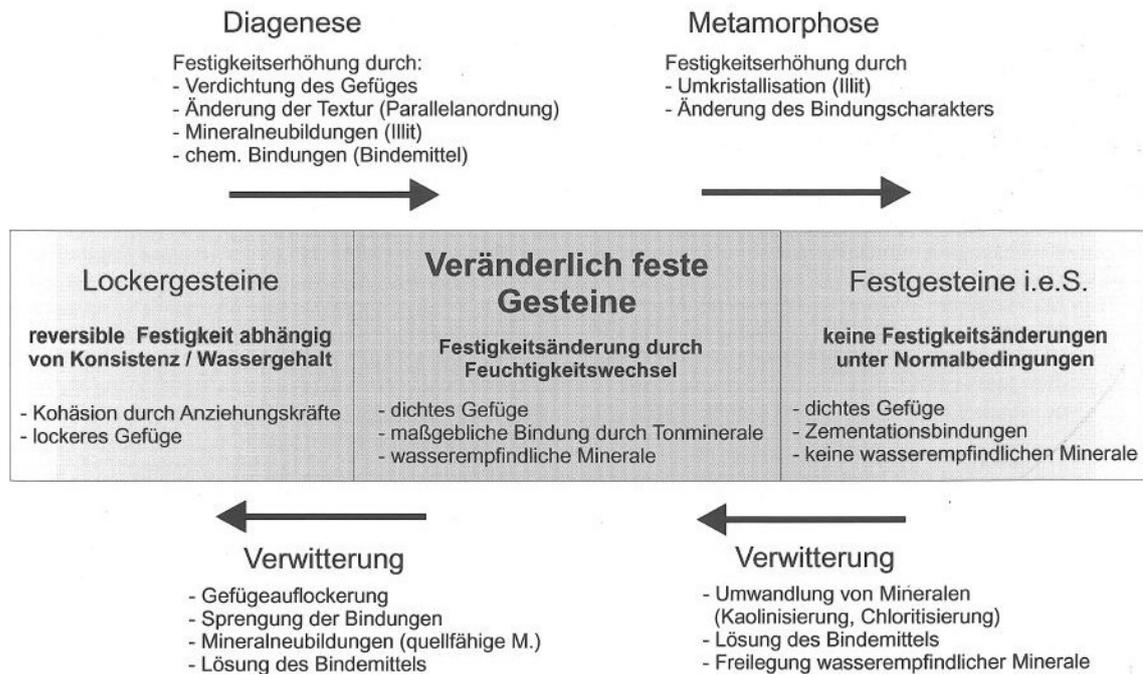


Abb. 2: Stellung und Charakterisierung der veränderlich festen Gesteine unter Berücksichtigung der geologischen Prozesse, die bei der Bildung und Zerstörung der Gesteine ablaufen. (Nickmann 2009)

Im Zuge der Verwitterung entsteht aus (dauerhaft festem) Festgestein Lockergestein. Dadurch bildet sich eine Verwitterungs- und Auflockerungszone aus, welche bei Bauvorhaben berücksichtigt werden muss – insbesondere, wenn diese Zone veränderlich-festen Charakter hat. Die Mächtigkeit dieser Zone ist von vielen Parametern abhängig, unter anderem auch von den klimatischen Bedingungen. Die Verwitterung kann aber auch zur Bildung von kompakten Schichten führen, wie z.B. Duricrust. Einen maßgebenden Einfluss auf die Auflockerung und Verwitterung üben die geologische Vorgeschichte bzw. der Spannungsverlauf und (bei Sedimentgesteinen) die Ablagerungsbedingungen aus (Einsele et al. 1985).

6.3 Auswirkungen der Veränderlichkeit auf den Bauablauf

Veränderlich festes Gestein hat sowohl auf die Planungs- als auch auf die Ausführungsphase großen Einfluss. In der Vergangenheit wurde dieser jedoch nicht immer ernst genommen, unter anderem weil es keine einheitliche Klassifizierung für veränderlich festes Gestein gibt. Abb. 3 fasst die Fehleinschätzung der Veränderlichkeit und deren Auswirkungen in den jeweiligen Bauphasen zusammen. (Nickmann 2009)

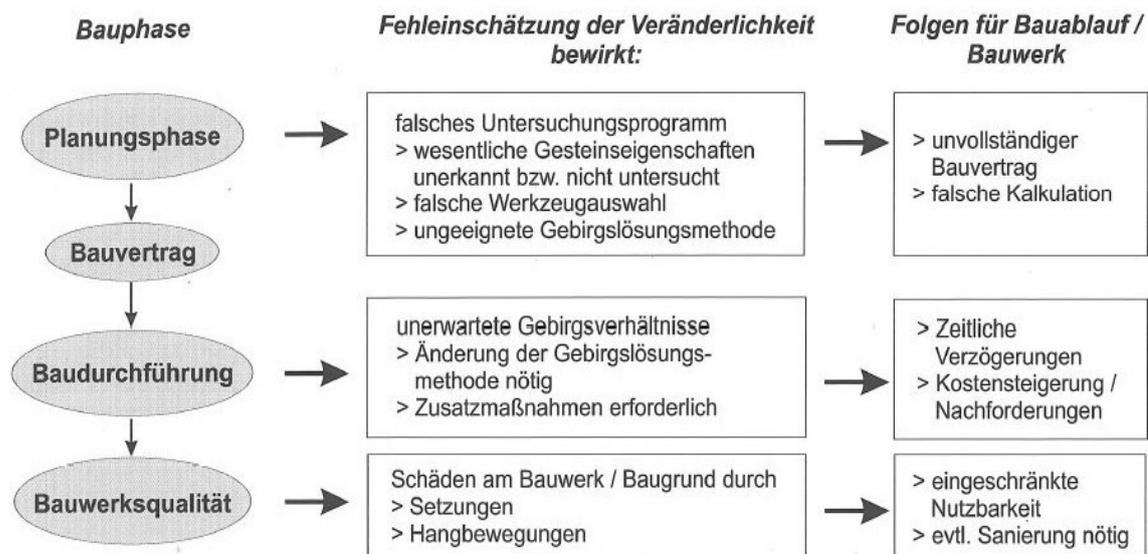


Abb. 3: Folgen der falschen Einschätzung veränderlich fester Gesteine und ihrer Eigenschaften in den verschiedenen Phasen der Bauwerkserstellung. (Nickmann 2009)

Die Berücksichtigung der Veränderlichkeit von Gesteinen spielt somit eine große Rolle für einen reibungslosen Bauablauf und eine vertragsgerechte Nutzbarkeit (Nickmann 2009).

Gemäß Nickmann (2009), sind dafür folgende Faktoren von größter Bedeutung:

- Lösbarkeit des Gesteins aus dem Gebirgsverband
- Stabilität des verbleibenden Gebirges (Ortsbrust, Hang)
- Transportfähigkeit des gelösten Materials
- Wiedereinbaufähigkeit bzw. Deponierung des Materials
- Langfristige Stabilität des wieder eingebauten Materials (z.B. in Böschungen) bzw. Verwitterungsverhalten neuer Oberflächen

Bei einem Baugrubenaushub kann beispielsweise die Lösbarkeit enorme Schwierigkeiten bereiten, wodurch schweres Gerät eingesetzt werden muss. Aufgrund der (scheinbar) relativ hohen Festigkeit des Materials kann möglicherweise auf einen Baugrubenverbau verzichtet werden und eine steile Böschung ausgeführt werden. Aufgrund der Witterung können aber Zerfallserscheinungen auftreten, welche zu einem Böschungsstabilitätsproblem führen. Auch die Wiedereinbaufähigkeit kann z.B. durch mehrmalige Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel nicht mehr gegeben sein und das Material muss anderweitig entsorgt oder deponiert werden. Eine

Vernachlässigung der Veränderlichkeit birgt somit nicht nur Gefahren hinsichtlich der Sicherheit, sondern auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einer Baustelle.

6.4 Zerfallsprozess und Abgrenzung des Begriffs zur Verwitterung

Der Abtrag von Gestein durch Erosion oder Verwitterung ist im Allgemeinen ein langsamer, stetiger Prozess. Der Zerfall hingegen findet statt, wenn die Abtragung der schützenden Gesteinsschicht sehr schnell verläuft, entweder auf natürliche Weise (Erdrutsch) oder aufgrund von Baumaßnahmen (Baugrubenaushub, Tunnelvortrieb). Dadurch werden neue Umgebungsbedingungen geschaffen, auf die das veränderlich feste Gestein reagiert. Da die für chemische Prozesse notwendige Zeit in der Regel nicht zur Verfügung steht, wirken hauptsächlich physikalisch-mechanische Kräfte, welche im Folgenden aufgelistet werden (Nickmann 2009):

- (Teil-)Austrocknung
- Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel
- Frost-Tau-Wechsel
- Quellen von Tonmineralen durch Entlastung

Da die konkreten Mechanismen des Zerfalls in der Literatur bereits ausführlich behandelt wurden, wird hier auf Nickmann (2009) und die von ihr aufgeführten Autoren verwiesen. Ebenso findet sich im Sammelwerk von Kanji et al. (2020) eine Beschreibung der Zerfallsmechanismen.

Durch die verschiedenen Zerfallsmechanismen kann in weiterer Folge auf die für die Veränderlichkeit bestimmenden Gesteinseigenschaften geschlossen werden. Diese sind in Abb. 4 dargestellt.



Abb. 4: Zusammenstellung der wichtigsten für die Veränderlichkeit relevanten Gesteinseigenschaften. (Nickmann 2009)

6.5 Klassifizierung von veränderlich festem Gestein

Wie bereits einleitend erwähnt, beruht die bisherige Klassifizierung von veränderlich festem Gestein einerseits auf bodenmechanischen und andererseits auf felsmechanischen Untersuchungsmethoden.

Häufig wird die einaxiale Druckfestigkeit (UCS) zur Grenzziehung zwischen Locker- und Festgestein herangezogen. Als obere Grenze von Soft Rock ist eine Druckfestigkeit von 25 MPa anzusehen (Kanji 2014). Nach Sadowski (2020), setzen viele Autoren die untere Grenze von Soft Rock bei 2 MPa und die obere Grenze bei ungefähr 20 MPa an. Kanji und He (2020) weisen in ihrem Sammelwerk „Soft Rock Mechanics and Engineering“ einleitend auch darauf hin, dass viele Mitglieder der ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) bei einer Diskussion über die Grenzziehung von Soft Rock anmerkten, dass auch Gebirge mit einer einaxialen Druckfestigkeit des intakten Gesteins von mehr als 25 MPa durch Zerlegung, hohe Spannungen oder schnelle Verwitterung sich wie Gebirge mit einer einaxialen Druckfestigkeit des intakten Gesteins von weniger als 25 MPa verhalten.

Im Sammelwerk „Soft Rock Mechanics and Engineering“ von Kanji et al. (2020) finden sich unzählige Werte zur einaxialen Druckfestigkeit von veränderlich festen Gesteinen. Viele Autoren verwenden auch den Begriff Hard Soil, welcher eine Druckfestigkeit von 0,5-5 MPa aufweist, obwohl der obere Grenzwert bereits wieder in den Bereich von Soft Rock fällt. Eine klare Grenzziehung zwischen Hard Soil und Soft Rock gibt es somit nicht, vielmehr ist der Bereich zwischen Boden und Fels als Übergangsbereich anzusehen und je nach Gesteinsart und Bauvorhaben individuell zu bewerten.

Neben der Problematik einer einheitlichen Grenzziehung stellt auch die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Wassergehalt Schwierigkeiten in der Klassifizierung dar.

Für Nickmann (2009) ist eine Grenzziehung nur durch die einaxiale Druckfestigkeit nicht zielführend, da diese sowohl zwischen den verschiedenen Gesteinsgruppen, als auch innerhalb einer Gesteinsgruppe stark variieren kann. Eine alleinige Abgrenzung aufgrund der Festigkeit führt demnach zu einer falschen Gesamteinschätzung des veränderlich festen Gesteins, da die Veränderlichkeit von mehreren Parametern beeinflusst wird, die je nach Gesteinsgruppe unterschiedlich stark wirken. (Nickmann 2009)

Deshalb kombinierte Nickmann (2009) im Rahmen der von ihr durchgeführten Versuche für Sedimentgesteine den modifizierten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel mit dem Kristallisationsversuch. Der modifizierte Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel besteht aus einem einfachen Wasserlagerungsversuch sowie drei Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklen. Einerseits wird die Sofortreaktion bei Wasserkontakt beschrieben, andererseits wird nach jedem Durchgang der Zerfall beschrieben und eine Siebung vorgenommen. Die Trocknungstemperatur ist bei diesem Versuch auf 60 °C festgelegt worden. Durch den mehrmaligen Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel kann auch die Beständigkeit des Gesteins beschrieben werden. Der anschließende Kristallisationsversuch beschreibt die Verwitterungsbeständigkeit und dient somit dem Nachweis der Dauerhaftigkeit. Die Ergebnisse aus diesem kombinierten Verfahren fließen in die Berechnung des sogenannten „Veränderlichkeits-Index I_V “ ein. (Nickmann 2009)

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl an Versuchen zur Bestimmung der Eigenschaften von veränderlich festem Gestein erprobt. Teilweise finden diese Versuche auch in Normen Erwähnung. Die Versuchsdurchführung wurde oftmals von bereits bestehenden Versuchen für die Klassifizierung von Locker- und Festgestein übernommen und weiterentwickelt, oder gänzlich neu konzipiert. Neben den bereits genannten Versuchen finden auch andere Versuche Anwendung bei der Klassifizierung von veränderlich festem Gestein. So kann auch mittels Pressiometerversuch eine Abgrenzung zwischen Locker- und Festgestein und damit eine

Klassifizierung erfolgen (Baud und Gambin 2014). Nachfolgend werden weitere Versuche aufgelistet:

- **Einfacher Wasserlagerungsversuch:**

Beim einfachen Wasserlagerungsversuch wird die Boden- bzw. Felsprobe eine bestimmte Zeit lang in Wasser gelagert um danach die Veränderlichkeit zu bestimmen. In ÖNORM EN ISO 14689:2019 wird dies als „Veränderlichkeit von Gestein unter Wasserbedeckung“ bezeichnet (siehe Tab. 8). Vorteilhaft bei diesem Versuch ist die einfache und schnelle Durchführbarkeit.

Nachteile sind z.B. in der Beurteilung zu finden, welche stark vom Betrachter abhängig ist. Des Weiteren stellt die einmalige Wasserlagerung eine schwache Beanspruchung dar, wodurch es zu einer Fehleinschätzung hinsichtlich der Veränderlichkeit kommen kann. Auch ist nicht klar, ob die Veränderlichkeit aufgrund der Wasserlagerung eintritt oder durch die Probenahme selbst verursacht wird. (Nickmann 2009)

- **Frost-Tau-Wechsel:**

Während dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch erfährt das Probenmaterial eine zyklische Frost-Tau-Beanspruchung. Für Gesteinskörnungen zw. 4 und 63 mm ist dieser Versuch in ÖNORM EN 1367-1:2007 beschrieben. Für die in dieser Arbeit behandelten Gesteine ist dieser Versuch aufgrund der Korngrößenbeschränkung aber nicht zielführend, jedoch finden sich in der Literatur auch Versuche für feinkörniges Material.

- **Siebtrommelversuch:**

Das Ergebnis beim Siebtrommelversuch (en.: Slake Durability Test) ist ein Index, welcher die Zerfallsbeständigkeit ausdrückt. Der Versuchsaufbau besteht aus einer rotierenden Siebtrommel mit einer Maschenweite von zwei Millimeter, welche teilweise im Wasser liegt. Die zu beprobenden Gesteine werden in die Trommel gegeben. Die Beanspruchung besteht einerseits durch das Wasser und andererseits durch Abrasion und Kollision der Probestücke.

Je nach Autor und Norm weichen die Versuchsparameter voneinander ab, wodurch die Ergebnisse nicht immer vergleichbar sind. Fragwürdig bei diesem Versuch ist, inwiefern die natürlichen Beanspruchungen im Versuch wiedergegeben werden, da z.B. eine Beanspruchung in Art einer Abrasion in der Natur wohl die Seltenheit darstellt (Nickmann 2009).

- **Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel:**

Obwohl die Beanspruchung des Boden- oder Felsmaterials durch einen bzw. mehrere Trocknungs-Befeuchtungswechsel der Beanspruchung in der Natur am nächsten kommt (z.B. während eines Baugrubenaushubs), findet dieser (noch) in keiner der vorgestellten Normen Anwendung.

Diese fehlende Normengrundlage führt wiederum zum Problem, dass es auch bei diesem Versuch keine einheitlichen Versuchsbedingungen gibt. So variiert die Trocknungstemperatur sowie die Anzahl und Dauer der Trocknungs- und Befeuchtungsvorgänge. Gerade deshalb ist es umso wichtiger, Erfahrungswerte für die Veränderlichkeit, wie sie in prEN 17542-1:2019 behandelt wird, zu generieren und diese in ÖNORM EN 16907-2:2019 (Materialklassifizierung) zu integrieren.

Als weitere Versuche kann der bereits erwähnte Kristallisationsversuch und der Methylenblau-Versuch angeführt werden, wobei letzterer in Österreich (noch) keine breite Anwendung findet.

6.5.1 Klassifizierung von veränderlich festem Gestein nach ÖNORM

Nach ÖNORM EN ISO 14689:2019 wird veränderlich festes Gestein als Festgestein betrachtet. Dennoch erfolgt die Klassifizierung von veränderlich festem Gestein – je nach Beschaffenheit und Art des Bauvorhabens – nach folgenden Normen:

- ÖNORM EN ISO 14688-1:2019: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden
Teil 1: Benennung und Beschreibung
- ÖNORM EN ISO 14688-2:2019: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden
Teil 2: Grundlagen der Bodenklassifizierung
- ÖNORM EN ISO 14689:2019: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels
- ÖNORM EN 16907-2:2019: Erdarbeiten
Teil 2: Materialklassifizierung

Die angeführten Normen entsprechen jenen Normen, welche in Kapitel 3 bis Kapitel 5 beschrieben sind.

Eine eigene Norm für die Klassifizierung von veränderlich festem Gestein gibt es nicht. Eine mögliche Klassifizierung gemäß ÖNORM EN ISO 14689:2019 kann daher durch die einaxiale Druckfestigkeit (siehe Tab. 5) erfolgen. Tab. 7 (Veränderlichkeit von Gestein an der Luft) und Tab. 8 (Veränderlichkeit von Gestein unter Wasserbedeckung) können ebenso nützlich sein, wobei eine einmalige

Wasserbedeckung eine sehr schwache Beanspruchung darstellt (siehe dazu z.B. auch Abschnitt 6.6.4 und 7.2.4). Da die Verwitterung permanent stattfindet (vgl. Abschnitt 6.4 dieses Kapitels) und diese nicht in einer bautechnisch relevanten Zeit erfolgt, ist Tab. 10 (Klassifizierung der Verwitterungsstufen von Gebirgen) aus Abschnitt 4.2.3 nur bedingt geeignet für die Beschreibung von Veränderungen beispielsweise im Laufe eines Baugrubenaushubs. Des Weiteren kann veränderlich festes Gestein auch durch Diagenese entstehen, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben ist.

6.5.1.1 Klassifizierung nach ÖNORM EN 16907-2:2019

In den folgenden Ausführungen wird aufgezeigt, wie veränderlich festes Gestein gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019 klassifiziert werden kann. Da der Veränderlichkeits-Index, Zertrümmerbarkeits-Index sowie der Methylenblauwert in dieser Norm als Kennwerte für die Materialklassifizierung dienen, werden diese näher beschrieben.

Veränderlich festes Gestein wird auch nach ÖNORM EN 16907-2:2019 den Felsmaterialien zugeordnet, wobei zwei Felsgruppen mit möglicher Veränderlichkeit angeführt werden:

- **RWV:** Sehr brüchiger Fels mit einer (einaxialen) Druckfestigkeit von 1-5 MPa. Dies kann beispielsweise verwitterter Tonstein, Schluffstein, Sandstein, Gipsstein oder Kohle sein.
- **REW:** Äußerst brüchiger Fels mit einer (einaxialen) Druckfestigkeit von 0,6-1 MPa. Dies kann beispielsweise verwitterter Tonstein, Schluffstein oder Sandstein sein.

In Tabelle 7 (Felsgruppen für die Verwendung in Erdarbeiten) nach ÖNORM EN 16907-2:2019 werden für veränderlich festen Fels unter anderem auch Werte zum Zertrümmerbarkeits-Index und Veränderlichkeits-Index angegeben. Dabei weisen vor allem die Gruppen R4 und R5 veränderlich feste oder quell- bzw. schwellfähige Eigenschaften auf. In Anhang E nach ÖNORM EN 16907-3:2019 werden Beispiele nationaler Praktiken angeführt. In Bezug auf den Zertrümmerbarkeits-Index und Veränderlichkeits-Index bestimmt nach französischer Norm (NF P 94-066) heißt es:

„Wenn der Brechbarkeitskoeffizient $I_{FR} > 7$ (NF P 94-066) ist, wird das Gestein nach dem Aushub und Einbau zu einem Boden. Wenn der Brechbarkeitskoeffizient $I_{FR} \leq 7$ und der Koeffizient der Abbaubarkeit $I_{DG} > 5$ ist, kann das Gestein als empfindlich (gegenüber Entwicklungen) bis sehr empfindlich ($I_{DG} \geq 20$)

gegenüber einer langfristigen Zersetzung angesehen werden.“ (ÖNORM EN 16907-3:2019)

Relevant ist der Zertrümmerbarkeits-Index (bzw. Brechbarkeits-Index) beispielsweise für den Dammbau.

Durch tektonische Vorgänge und chemischen Umwandlungen kommt es zur Entfestigung von Fels. Dabei findet eine Zerlegung und Auflockerung statt, welche zur Bildung von Mikrorissen beiträgt. Zusätzlich laufen exogene und endogene (z.B. hydrothermale Zersetzung) Verwitterungsprozesse ab, wodurch das Gestein weiter geschwächt wird. Bei Verwendung des entfestigten Felsmaterials als Dammbaumaterial muss sichergestellt werden, dass im Rahmen der Verdichtung keine Zertrümmerung stattfindet, welche das mechanische Verhalten des Damms beeinflussen kann. (Kast et al. 1985)

Auch Einsele et al. (1985) weisen darauf hin, dass viele Felsmaterialien, die ursprünglich festen Charakter hatten und nur durch Sprengungen lösbar sind, nach dem Lösen zerfallen können. Das dabei entstehende Material ist grundsätzlich gut einbaubar, wobei aber der weitere Zerfall des noch vorhandenen Grobkorns beurteilt werden muss.

Um dieses Materialverhalten beschreiben zu können, wird an der Einführung des Zertrümmerbarkeits-Index gearbeitet. Dieser soll vor allem in ÖNORM EN 16907-2:2019 (Materialklassifizierung) Anwendung finden.

Die folgenden Ausführungen behandeln die Quell- bzw. Schwellfähigkeit von Böden. Da sowohl in den aktuellen Normen als auch in der allgemeinen Literatur beide Begriffe verwendet werden, finden diese Bezeichnungen auch hier Erwähnung. Grundsätzlich werden die zwei Begriffe synonym verwendet.

Auch quellfähige Böden finden in ÖNORM EN 16907-2:2019 Erwähnung. Quellfähige bzw. wasserempfindliche Böden (Schwellböden), besitzen die Eigenschaft, auf Änderungen des Wassergehalts mit einer Volumenänderung zu reagieren. Von quellfähigem Material spricht man, wenn quellfähige Minerale (Tonminerale) vorhanden sind. Nickmann (2009) beschreibt die Schwellung als hygrische Dehnung/Schrumpfung, die ohne quellfähige Minerale stattfindet und für die die gleichen Überlegungen wie für die Quellfähigkeit gelten, allerdings laufen die Prozesse in abgeschwächter Form ab.

Die Volumenvergrößerung kann entweder durch Wasseraufnahme oder chemische Veränderung initiiert werden. Die dabei entstehenden Quelldrücke sind nur schwer vorhersagbar und können ihren Maximalwert erst nach Wochen oder Monaten erreichen. (Haack et al. 2019)

Auch eine Entlastung, durch Wegnahme der Auflast durch das Gebirge, kann eine Gefügezerstörung durch Quellen bewirken (Nickmann 2009). Bedingt durch den zusätzlichen Druck auf das Gestein, können Quelldrücke zu Hebungen (von z.B. Straßen) oder zum Zerfall des Gesteins führen.

Nach Müller-Vonmoos (1993) beruht die Quellung von Tonen auf der Schichtstruktur der Tonminerale, ihrer Ladung und den zum Ladungsausgleich angelagerten Kationen. Des Weiteren gliedert sich die Quellung in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt, der intrakristallinen Quellung, wird Wasser durch Hydratation der austauschbaren Kationen aufgenommen. Den zweiten Abschnitt stellt die osmotische Quellung dar, welche durch den Unterschied der Ionenkonzentration an der Tonmineraloberfläche und Porenlösung hervorgerufen wird. Im Gegensatz zur Anhydritquellung, ist die Quellung der Tone ein reversibler Vorgang. (Müller-Vonmoos 1993)

In Anhang B.10 nach ÖNORM EN 16907-3:2019 findet auch der Begriff „Aktiv-ton“ Verwendung.

Nach Einsele et al. (1985) werden Tonminerale bei der Diagenese teilweise „inaktiviert“, wodurch auch Sedimente mit (ursprünglich) aktiven Tonmineralen relativ verwitterungsresistent sein können. Bei fehlender Kornbindungsfestigkeit werden diese Minerale wieder „reaktiviert“ und eine Auflockerung eingeleitet. (Einsele et al. 1985)

Gemäß ÖNORM EN 16907-3:2019 wird das Anschwellen durch zwei Hauptfaktoren gesteuert:

- Beschaffenheit des Tons: Dazu zählt z.B. die Art der Tonminerale, die austauschbaren Kationen oder das geologische Alter
- Klimatologische Faktoren

Nach ÖNORM EN 16907-3:2019 stehen mehrere Laborversuche zur Identifizierung von quellfähigem Material zur Verfügung, welche sich in zwei Hauptgruppen unterteilen lassen:

- Indirekte (qualitative) Prüfverfahren
- Direkte Prüfverfahren

Zu den indirekten Prüfverfahren zählen beispielsweise die Röntgenstrukturanalyse zur Bestimmung der Mineralogie der Tone oder die Differenzthermoanalyse. Das Ziel bei den indirekten Prüfverfahren ist es, mögliches Anschwellen aufzuzeigen.

Als direktes Prüfverfahren kann z.B. der Freiquellversuch oder die Prüfung des Schwelldrucks im Ödometer genannt werden. (ÖNORM EN 16907-3:2019)

In ÖNORM EN 16907-2:2019 wird unter anderem der Methylenblauwert V_{BS} (auch als Bodenblauwert bezeichnet) für die Materialklassifizierung für gemischt-körnige oder feinkörnige Böden verwendet, Richtwerte dazu werden in Tabelle 3b dieser Norm angegeben. Bezüglich der Wasserempfindlichkeit gibt es nach ÖNORM EN 16907-3:2019 mehrere Angaben: so wird auf eine französische Richtlinie für Straßenbauarbeiten verwiesen, in welcher Material als wasserunempfindlich eingestuft wird, wenn V_{BS} kleiner oder gleich 0,1 g/100 g ist. An einer anderen Stelle wird festgehalten, dass Material als wasserempfindlich betrachtet werden sollte, wenn der Methylenblauwert V_{BS} größer als 0,2 % ist (ÖNORM EN 16907-3:2019).

6.6 Problematik bei der Klassifizierung von veränderlich festem Gestein

Kanji (2014) beschreibt die allgemeine Problematik auf folgende Art und Weise:

Soft Rock verursacht mehrere Probleme zugleich: Erstens, hat Soft Rock unerwünschte Eigenschaften, wie z.B. eine geringe Festigkeit, Zerfallserscheinungen, eine hohe Verformbarkeit, kurze Verwitterungszeiträume und viele weitere kritische Merkmale. Zweitens, weist Soft Rock oftmals eine Festigkeit auf, welche weder Locker- noch Festgestein zuordenbar ist. Das Gestein ist einerseits zu hart für bodenmechanische und andererseits zu weich für felsmechanische Untersuchungsmethoden. Als dritte Problemstellung sind die geologische Erkundung und Probenahme zu nennen. Des Weiteren lässt sich diese Art von Gestein nicht mit den gängigen Klassifizierungssystemen behandeln. Somit müssten entweder die bestehenden Systeme modifiziert oder neue Arten der Materialklassifizierung erfunden werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Soft Rock bzw. Soft Ground bisher wenig erforscht wurde und daher oft kein Vertrauen in die Eigenschaften besteht. Um ein ausreichendes Sicherheitsniveau garantieren zu können, werden konservative Annahmen getroffen, entgegen der Wirtschaftlichkeit. (Kanji 2014)

Die Problematik bei der Klassifizierung von veränderlich festem Gestein beginnt somit bei der Erkennung eines solchen Gesteins. Sie setzt sich fort mit der Probenentnahme, der Probenlagerung und der Bewertung der Probe, da es keine standardisierten Klassifizierungssysteme für veränderlich feste Gesteine gibt. Vielmehr beruht die bisherige Klassifizierung auf einer Kombination aus fels- und bodenmechanischen Versuchen, die jedoch die Besonderheiten von veränderlich festem Gestein nicht immer widerspiegeln. Schlussendlich stellt auch noch die

Interpretation der Ergebnisse oft Schwierigkeiten dar. Im Anschluss werden die genannten Problemstellungen getrennt voneinander behandelt.

6.6.1 Erkennung von veränderlich festem Gestein

Voraussetzung für die spätere Klassifizierung eines veränderlich festen Gesteins ist naturgemäß die Erkennung als solches. Wenn der Vorgang der Erkennung Mängel aufweist, bildet sich unweigerlich eine Fehlerkette aus, da z.B. auch die Probenentnahme und Probenlagerung falsch erfolgt. Das bedeutet aber auch, dass bereits bei der geologischen Baugrunderkundung auf die Eigenschaften von veränderlich festen Gesteinen Rücksicht genommen werden muss (z. B. Bohrverfahren, luftdichte Lagerung von Bohrkernen), wodurch wiederum höhere Kosten anfallen. Weiters können neben diagenetisch verfestigten oder verwitterten Gesteinen auch überkonsolidierte Böden veränderliche Eigenschaften aufweisen.

6.6.2 Probenentnahme

Die Auswahl des für die Probenentnahme notwendigen Geräts ist von der Probenentnahmekategorie bzw. von der gewünschten Güteklasse der Proben abhängig. Dabei wird nach ÖNORM EN ISO 22475-1:2006 zwischen der Probeentnahmekategorie A, B und C und in die Güteklasse 1-5 unterschieden (siehe Tab. 15).

Tab. 15: Güteklassen von Bodenproben für Laborversuche und erforderliche Kategorien der Probeentnahme nach Eurocode 7-Teil 2 (ÖNORM EN 1997-2:2010)

Bodeneigenschaften/Güteklassen	1	2	3	4	5
Bodeneigenschaften, die unverändert sind:					
Korngrößenverteilung	*	*	*	*	
Wassergehalt	*	*	*		
Dichte, Lagerungsdichte, Durchlässigkeit	*	*			
Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit	*				
Eigenschaften, die bestimmte werden können:					
Schichtenfolge	*	*	*	*	*
Schichtgrenzen, grobe Einteilung	*	*	*	*	
Schichtgrenzen, feine Unterteilung	*	*			
Konsistenzgrenzen, Korndichte, organische Bestandteile	*	*	*	*	
Wassergehalt	*	*	*		
Dichte, Lagerungsdichte, Porosität, Durchlässigkeit	*	*			
Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit	*				
Kategorie der Probeentnahme entsprechend EN ISO 22475-1	A				
	B				
				C	

Für die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Versuche (vgl. Kapitel 7), ist demzufolge zumindest Güteklasse 3 bzw. Kategorie A oder B notwendig. Jedenfalls ist darauf zu achten, dass das veränderlich feste Gestein nicht in Kontakt mit Wasser kommt und durch den Bohrvorgang möglichst wenig beeinflusst wird. Somit eignen sich z.B. Dreifachkernrohre für die Probengewinnung. Selbstverständlich kann das Probenmaterial auch direkt nach dem Aushub gewonnen werden, abhängig von den durchzuführenden Versuchen und Materialkennwerten, die bestimmt werden sollen.

Die Behandlung, der Transport und die Aufbewahrung von Boden- und Felsproben ist in Punkt 11 nach ÖNORM EN ISO 22475-1:2006 geregelt. Umgehend nach der Entnahme gilt zu beachten, dass die Boden- oder Felsprobe vor Witterungseinflüssen (Sonneneinstrahlung, Hitze, Frost und Regen) zu schützen ist (ÖNORM EN ISO 22475-1:2006).

Der Probentransport sollte möglichst erschütterungsarm und in dafür geeigneten Behältnissen erfolgen. Das Ausmaß der Schutzmaßnahmen ist abhängig von der Kategorie der Probenentnahme (bzw. deren Anforderungen) sowie vom Klima, vom Transportverfahren und von der Transportstrecke. (ÖNORM EN ISO 22475-1:2006)

6.6.3 Probenlagerung

Besonders der Probenlagerung kommt bei veränderlich festem Gestein eine große Bedeutung zu, da jegliche Änderung der Umgebungsbedingungen eine Änderung in den Probeneigenschaften hervorrufen kann. Dementsprechend wäre eine sofortige Versuchsdurchführung vorzuziehen, was in der Praxis jedoch nur selten möglich ist. Daher ist darauf zu achten, dass die Eigenschaften der Boden- und Felsproben während der Lagerung unverändert bleiben (ÖNORM EN ISO 22475-1:2006).

Bohrkerne müssen mit einer Folie verschlossen werden, bei Lagerung in Behältnissen (z.B. Kunststoffeimer, Gläser, Kunststoffbeutel, etc.) muss sichergestellt sein, dass diese dicht abschließen. Die Lagertemperatur sollte der Bodentemperatur (+ 6 °C bis + 12 °C) entsprechen (für besondere Zwecke), grundsätzlich ist jedenfalls eine kühle Lagerung anzustreben. Der Feuchtigkeitsgehalt sollte 85 % bis 100 % betragen. Jegliche Änderung der Umgebungsbedingungen oder etwaige Störungen an den Proben müssen im Laborbericht vermerkt werden. (ÖNORM EN ISO 22475-1:2006)

Bei größeren Bauprojekten, kann somit auch die Probenlagerung zu einem nicht außer Acht zu lassenden Kostenfaktor werden.

6.6.4 Versuchsdurchführung und Interpretation der Ergebnisse

Bevor es zur tatsächlichen Versuchsdurchführung kommt, muss zuvor ein geeigneter Versuch ausgewählt werden. Wie bereits erwähnt, gibt es eine Vielzahl an Versuchen, die aber unterschiedlich gute Ergebnisse liefern. Oft wird die Natur bei diesen Versuchen unzureichend abgebildet, sodass das Probenmaterial Beanspruchungen erfährt, welche in dieser Art nicht auf natürliche Weise stattfinden würden. Weitere Schwierigkeiten bereiten die Versuchsbedingungen, je nach Autor und behandeltem Gestein variiert beispielsweise die Trocknungstemperatur, die Dauer der Wasserlagerung oder die Anzahl an Wiederholungen eines bestimmten Vorgangs. Dadurch können die Ergebnisse aus diesen Versuchen oft nicht

miteinander verglichen werden und verlieren an Aussagekraft. Im Hinblick auf veränderlich festes Gestein verschärft sich dieses Problem umso mehr.

So gibt es z.B. Gesteine, die bei einem einmalig durchgeführten Wasserlagerungsversuch keine Reaktionen zeigen, und somit eigentlich als nicht veränderlich zu klassifizieren sind. Bei mehrmaliger Wasserlagerung zerfällt die Probe hingegen und wäre als stark veränderlich einzustufen. (Nickmann 2009)

7 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

7.1.1 Probenmaterial

Rundversuche dienen dazu, die Qualität unter verschiedenen Prüfanstalten sicherstellen und Feld- und Laborversuche weiterentwickeln zu können. Zusätzlich können Erfahrungen ausgetauscht werden und mögliche Schwachstellen in den Versuchsabläufen identifiziert werden. Voraussetzung für einen Rundversuch ist einerseits eine einheitliche Versuchsdurchführung (gegeben durch die Normen) und andererseits ein entsprechendes Boden- bzw. Felsmaterial, welches immer die gleichen Eigenschaften aufweist. So wurde auch für die im Rahmen dieser Arbeit getätigten Versuche ein Eichmaterial gesucht. Die Suche dafür gestaltete sich als langwierig, da vor allem die Bedingung eines einheitlichen Wassergehalts und einer einheitlichen „Vorgeschichte“ des Probenmaterials nur schwierig zu erfüllen ist. Da mögliche Rundversuche erst nach Veröffentlichung der Norm stattfinden können, muss auch sichergestellt sein, dass das Material auch längerfristig verfügbar ist.

Zu Beginn wurde Töpferton der Firma GEORG & SCHNEIDER GmbH u. Co. KG mit der Produktbezeichnung 254 als Eichmaterial für die Bestimmung der Zertrümmerbarkeit ausgewählt. Da aufgrund der hohen Plastizität klar war, dass eine Versuchsdurchführung nach Norm nicht möglich ist, wurden die Probestücke bei $105 \pm 5^\circ\text{C}$ bis zur Massenkonstanz getrocknet. Von Massenkonstanz spricht man, wenn die Massenänderung des Probenmaterials innerhalb eines Zeitraums von mindestens einer Stunde weniger als 0,1 % beträgt (ÖNORM EN ISO 17892-1:2015). Für die Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} war das Material nicht geeignet, da sich die Probestücke bei der zweiten Wasserlagerung innerhalb kürzester Zeit komplett auflösten. Eine Ermittlung der Korngrößenverteilung hätte zur Folge gehabt, dass bei einem Rundversuch jede Prüfanstalt dieselben Ergebnisse erzielt hätte und somit kein Vergleich möglich gewesen wäre.

Zur Bestimmung der Veränderlichkeit fiel die Wahl auf den sogenannten „Älteren Schlier“ aus Hinzenbach, Oberösterreich. Der Ältere Schlier ist zwischen dem Oligozän und dem Miozän anzusiedeln und in weiterer Folge dem Paläogen und Neogen zuordenbar. Die einaxiale Druckfestigkeit dieses Materials beträgt ca. 1 MPa. Demnach ist der Schlier im Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein einzuordnen. Betrachtet man die Aushubklassen gemäß der in Bearbeitung stehenden Norm ÖNORM EN 16907-2/A:2020, ist der Materialaushub noch mit konventionellen Maschinen möglich und das Material als Boden zu bewerten. Der

Vorteil dieses Materials besteht darin, dass es längerfristig und in größeren Mengen verfügbar ist und dabei im frischen Zustand immer die gleichen Eigenschaften aufweist.

Eine Verwendung als Eichmaterial für die Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index war im feuchten Zustand nicht möglich, da sich die einzelnen Probestücke während der Beanspruchung miteinander verbunden haben. Danach war nicht erkennbar, ob beim Lösen intakte Fragmente zerstört oder miteinander verbundene Fragmente voneinander getrennt werden. Deshalb wurde ebenfalls eine Testung nach Trocknung bis zur Massenkonstanz (bei $105 \pm 5 \text{ °C}$) durchgeführt.

Im Übrigen wurde das Material für beide Kornfraktionen verwendet, obwohl das Ergebnis der gröberen Kornfraktion damit nicht der Norm entspricht. Da aber die Suche nach einem Referenzmaterial sowie die Evaluierung der Versuchsdurchführung im Vordergrund stand, war dies nebensächlich (wie auch die Trocknung vor der Versuchsdurchführung).

Für die Bestimmung des Methylenblau-Werts MB gibt es bereits nach ÖNORM EN 933-9:2013 ein Eichmaterial, nämlich Kaolinit. Dieser kann bei bekanntem Methylenblauwert für Kaolinit (MB_K) zur Überprüfung der Methylenblaulösung verwendet werden. Des Weiteren kann bei zu geringem Feinkornanteil Kaolinit zugegeben werden, um eine Testung durchführen zu können.

Um den generellen Versuchsablauf nach prEN 17542-3:2019 evaluieren zu können, wurden zwei unterschiedliche Tragschichtmaterialien – im Folgenden als Material A und Material B bezeichnet – einer Testung unterzogen. Dabei handelt es sich gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019 um grobkörniges und gemischtkörniges Material. Da aber auch die Feinanteile von grobkörnigen Böden aktive Tonbestandteile enthalten können, wurde dieses Material als Probenmaterial ausgewählt und Versuche damit durchgeführt. Die Körnungslinien dieser Materialien können dem Anhang entnommen werden.

7.2 Versuchsdurchführung

Neben den in Tab. 16 aufgelisteten Versuchen wurden auch mehrere Vorversuche durchgeführt. Diese finden hier jedoch nicht Erwähnung. Die Versuchsprotokolle der hier angeführten Versuche finden sich im Anhang A4.

Tab. 16: Auflistung der durchgeführten Versuche

Material	Versuch	Bezeichnung	Anmerkungen
Töpferton	I _{FR}	Z_10/20_1	
Töpferton	I _{FR}	Z_10/20_2	
Töpferton	I _{FR}	Z_10/20_3	
Töpferton	I _{FR}	Z_40/80_1	
Töpferton	I _{FR}	Z_40/80_2	
Töpferton	I _{FR}	Z_40/80_3	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_4	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_4	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_5	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_6	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_7	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_8	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_9	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_10	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_11	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_10/20_12	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_5	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_6	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_7	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_8	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_9	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_10	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_11	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_12	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_13	
Älterer Schlier	I _{FR}	Z_40/80_14	
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_10/20_1	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_10/20_2	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_10/20_3	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_40/80_1	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_40/80_2	abgebrochen
Älterer Schlier	I _{DGa}	VA_40/80_3	abgebrochen

Tab. 16: Auflistung der durchgeführten Versuche (Fortsetzung)

Material	Versuch	Bezeichnung	Anmerkungen
Älterer Schlier	Veränderlichkeit bei Wasserlagerung	W_1	
Älterer Schlier	Veränderlichkeit bei Wasserlagerung	W_2	
Älterer Schlier	Korngrößenverteilung	KV_1	
Material A	V _{BS}	VBS_1	
Material B	V _{BS}	VBS_2	
Material A	Korngrößenverteilung	KV_2	
Material B	Korngrößenverteilung	KV_3	

7.2.1 Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index (Töpferton)

Vor der eigentlichen Testung wurden aus dem zuvor erwähnten Töpferton Probe­stücke beider Kornklassen hergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass innerhalb einer Kornklasse die Siebrückstände der beiden Siebe annähernd gleich sind (ca. 1 kg Trockenmasse) und so eine einheitliche Körnungslinie erstellt werden konnte.

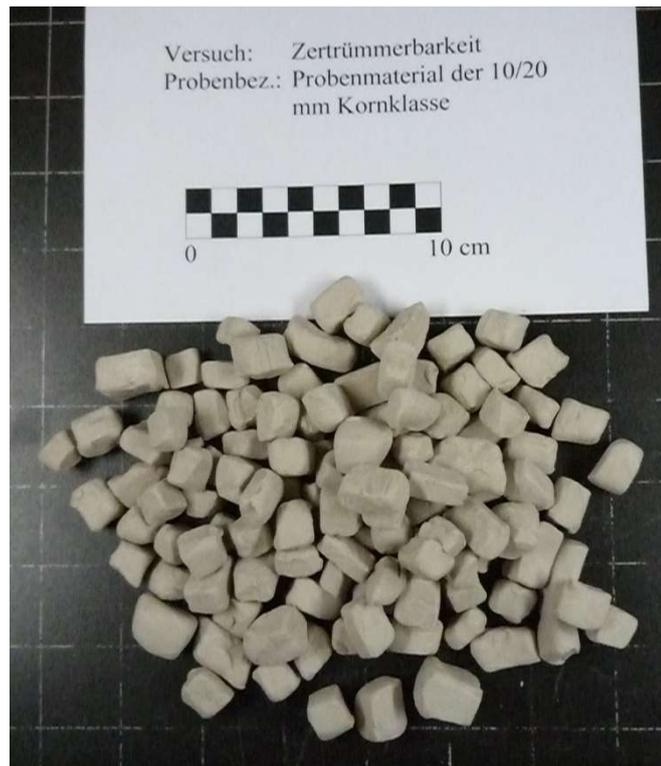


Abb. 5: Probenmaterial der 10/20 mm-Kornklasse



Abb. 6: Probenmaterial der 40/80 mm-Kornklasse

Im Anschluss wurden je Kornklasse drei Versuche durchgeführt. Die Anzahl der Schläge (100), bezogen auf die Lage des Proctorhammers zum Proctortopf, wurde folgendermaßen festgelegt: 32-18-32-18 (außen-innen-außen-innen).

7.2.1.1 Versuchsergebnisse

In Tab. 17 sind die Versuchsergebnisse aufgelistet.

Tab. 17: Versuchsergebnisse für die Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index (Töpferton)

Probenbezeichnung	I_{FR}
Z_10/20_1	34,7
Z_10/20_2	31,4
Z_10/20_3	46,5
Z_40/80_1	81,9
Z_40/80_2	95,2
Z_40/80_3	103,3

Bei der Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index für die 10/20 mm-Kornklasse stellte sich heraus, dass einige Probestücke nahezu keine Beanspruchung erfuhren. In Abb. 7 ist deutlich zu erkennen, dass die Probestücke auf der Unterseite des Proctortopfes fast ausschließlich ihre ursprüngliche Form behielten. Dadurch zeigte sich ein anderes Verhalten als bei der 40/80 mm-Kornklasse. Bei dieser behielten die unteren Probestücke teilweise zwar ihre Form, hatten jedoch viele Risse, wodurch sie beim Herausnehmen zerbrachen.



Abb. 7: Unterseite des Proctortopfes. Es ist nahezu keine Zertrümmerung vorhanden.

Die Probestücke in der Mitte des Proctortopfes bildeten einen kompakten Körper, welcher vermutlich einen Großteil der Energie absorbierte. Der Rand dieses Gebildes wurde jedoch ebenfalls nur mäßig beansprucht, wie in Abb. 8 erkennbar ist. Eine mäßige Zertrümmerung am Rand kann durch das Verfahren erklärt werden, da der Proctorhammer technisch bedingt einen bestimmten Abstand zum Proctortopf aufweisen muss. Zusätzlich bleiben aufgrund der Geometrie des Proctorhammers Teile des Probenmaterials unbeanspruch.

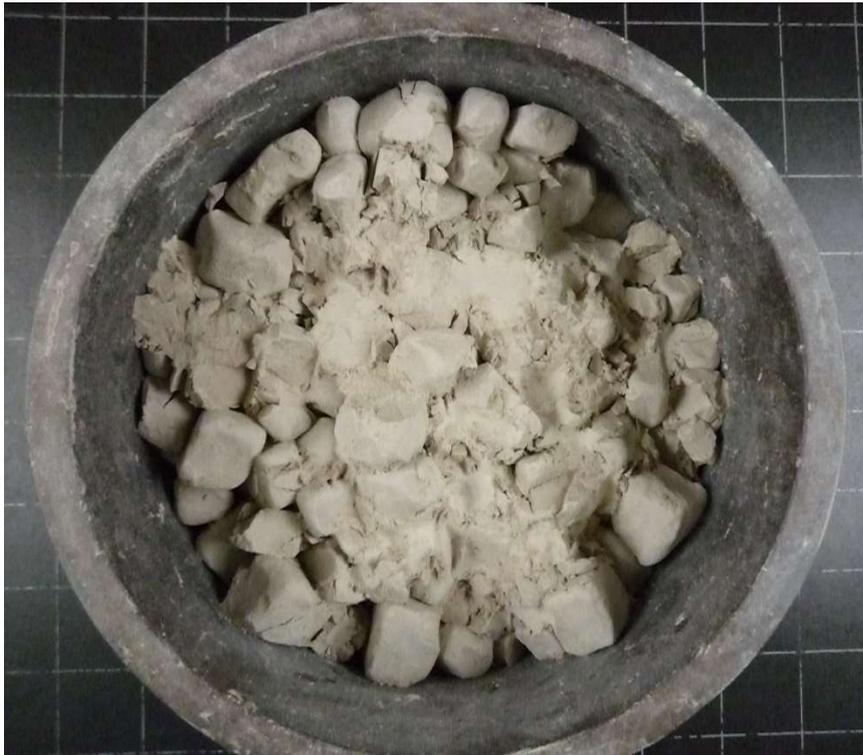


Abb. 8: Bildung eines kompakten Bodenkörpers in der Mitte des Proctortopfes

Für die 40/80 mm-Kornklasse gibt es zwei Punkte zu nennen, welche möglicherweise zu Unterschieden in den Ergebnissen führen können.

Je nach Größe und Geometrie der Probestücke schlug der Proctorhammer teilweise direkt auf eine Ecke oder Kante, sodass die gesamte Energie konzentriert in das Probestück eingeleitet wurde, wodurch dieses in viele kleine Stücke zerbrach.

Wenn die Probestücke aufgrund ihrer Form gut schichtbar waren, entstand ein kompakter, verdichteter Klumpen, der nur schwer aus dem Proctortopf lösbar war. Dieser konnte nur durch einen zusätzlichen Schlag mittels Hammers zum Zerbröseln gebracht werden. Auch eine Presse zum Auspressen der Probestücke könnte hier hilfreich sein.

Nach Auswertung der Körnungslinien wurde deutlich, dass das Material nicht als Eichmaterial geeignet ist. Obwohl sich der ermittelte Zertrümmerbarkeits-Index bei einer größeren Anzahl an Versuchen um einen Wert einpendeln könnte, sprachen mehrere Gründe gegen eine weitere Verwendung des Töpfertons. Der Töpferton zerfällt nämlich während der Beanspruchung in zu kleine Fragmente, wodurch relativ viel Material in den feineren Sieben zurückbleibt. Zusätzlich sind die Ergebnisse stark vom Laboranten abhängig, da auch bei schonender Handsiebung bereits ein geringer Kraftaufwand ausreicht, um die Fragmente zu zerdrücken.

7.2.2 Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index (Älterer Schlier)

Zu Beginn wurde wieder für beide benötigten Kornklassen entsprechendes Probenmaterial abgesiebt. Wie bereits erwähnt, konnte nur mit getrocknetem Material der Zertrümmerbarkeits-Index bestimmt werden.



Abb. 9: (Getrocknetes) Probenmaterial der 10/20 mm-Kornklasse



Abb. 10: (Getrocknetes) Probenmaterial der 40/80 mm-Kornklasse

Auch hier wurde wieder darauf geachtet, eine möglichst einheitliche, ursprüngliche Körnungslinie zu erstellen. Die Verteilung der Schläge mittels Proctorhammer entspricht jener welche in Abschnitt 7.2.1 beschrieben ist. Im Gegensatz zum Töpferton löste sich das Material aus dem Proctortopf wesentlich einfacher.

7.2.2.1 Versuchsergebnisse

Auch bei diesem Material wiesen die Probestücke der kleineren Kornfraktion weniger Zertrümmerung auf als jene der größeren Kornfraktion. Grundsätzlich ist auch hier wieder die Geometrie ausschlaggebend, wie viel Kraft auf das jeweilige Probestück einwirkt. Bei Lagerung auf mehreren Ecken oder Kanten erfährt das Probestück weniger Beanspruchung und zerfällt dadurch in weniger Einzelteile. In Tab. 18 und Tab. 19, finden sich die Ergebnisse des Zertrümmerbarkeits-Index beider Kornklassen.

Tab. 18: Versuchsergebnisse für die Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index (Älterer Schlier) von der 10/20 mm-Kornklasse

Probenbezeichnung	I _{FR}
Z_10/20_4	4,1
Z_10/20_5	4,0
Z_10/20_6	4,3
Z_10/20_7	4,1
Z_10/20_8	4,0
Z_10/20_9	4,3
Z_10/20_10	4,6
Z_10/20_11	4,5
Z_10/20_12	4,2

Für die Verwendung als Eichmaterial (10/20 mm-Kornfraktion) wäre dieses Material im getrockneten Zustand geeignet.

Tab. 19: Versuchsergebnisse für die Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index (Älterer Schlier) von der 40/80 mm-Kornklasse

Probenbezeichnung	I _{FR}
Z_40/80_5	29,0
Z_40/80_6	29,7
Z_40/80_7	24,8
Z_40/80_8	45,7
Z_40/80_9	41,0
Z_40/80_10	19,7
Z_40/80_11	17,4
Z_40/80_12	21,9
Z_40/80_13	13,9
Z_40/80_14	20,6

Obwohl die Körnungslinien des „intakten“ Materials nahezu ident sind, gibt es große Abweichungen unter den einzelnen Werten, sodass das Material nicht als Eichmaterial verwendet werden kann. Über die genaue Ursache dieser Abweichungen können nur Vermutungen angestellt werden. Naheliegend ist aber, dass die Geometrie der Boden- bzw. Gesteinsfragmente einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Ebenso könnte sich eine Vorschwächung des Materials (z.B. durch den Lösevorgang) bei der 40/80 mm-Kornfraktion stärker auswirken als bei der 10/20 mm-Kornfraktion.

7.2.3 Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} (Älterer Schlier)

Auf den folgenden Abbildungen ist ein Teil des Probenmaterials beider benötigten Kornklassen dargestellt. Dabei handelt es sich um die Proben mit den Bezeichnungen VA_10/20_1 und VA_40/80_1.

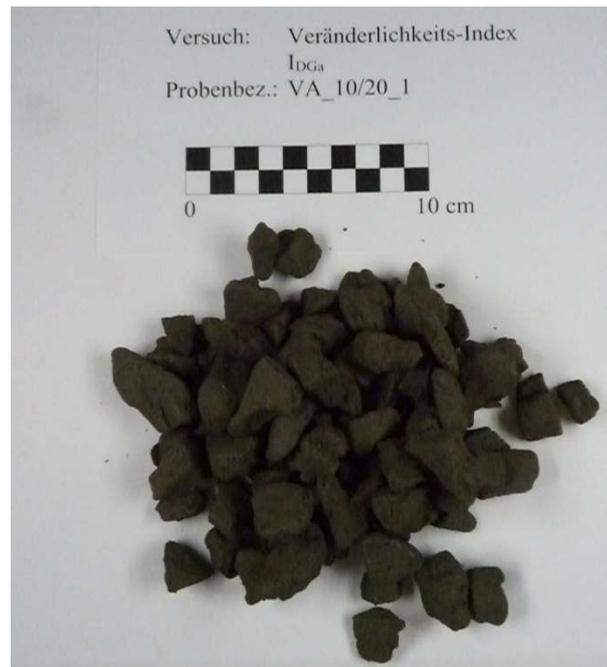


Abb. 11: Probenmaterial der 10/20 mm-Kornklasse

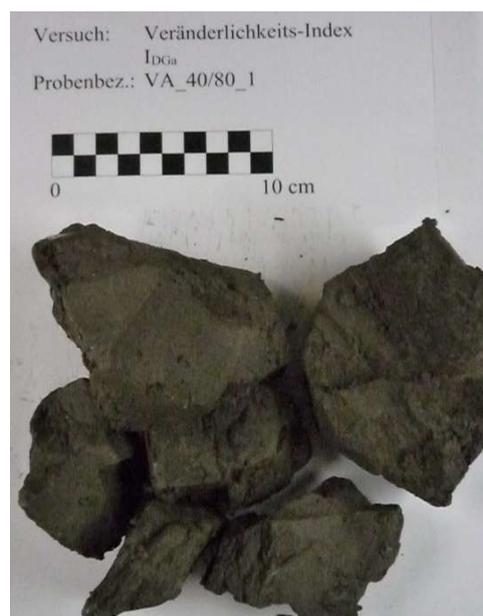


Abb. 12: Probenmaterial der 40/80 mm-Kornklasse

Während der ersten Wasserlagerung lösten sich bereits lockere Bodenteilchen auf der Oberfläche der Probestücke, teilweise lösten sich auch größere Stücke ab. Die Trocknung verursacht keine weiteren Zerfallserscheinungen, sie führt aber zur Bildung von (Mikro-)Rissen. Nach einer kurzen Abkühlphase wurden die Probestücke wiederum im Wasser gelagert, wodurch sofort Zerfallserscheinungen auftraten. Bis zum Ende der zweiten Wasserlagerung waren keine ursprünglichen Formen mehr erkennbar, außer bei einem Probestück der 40/80 mm-Kornfraktion, wo noch eine leichte Schichtung zu sehen war.

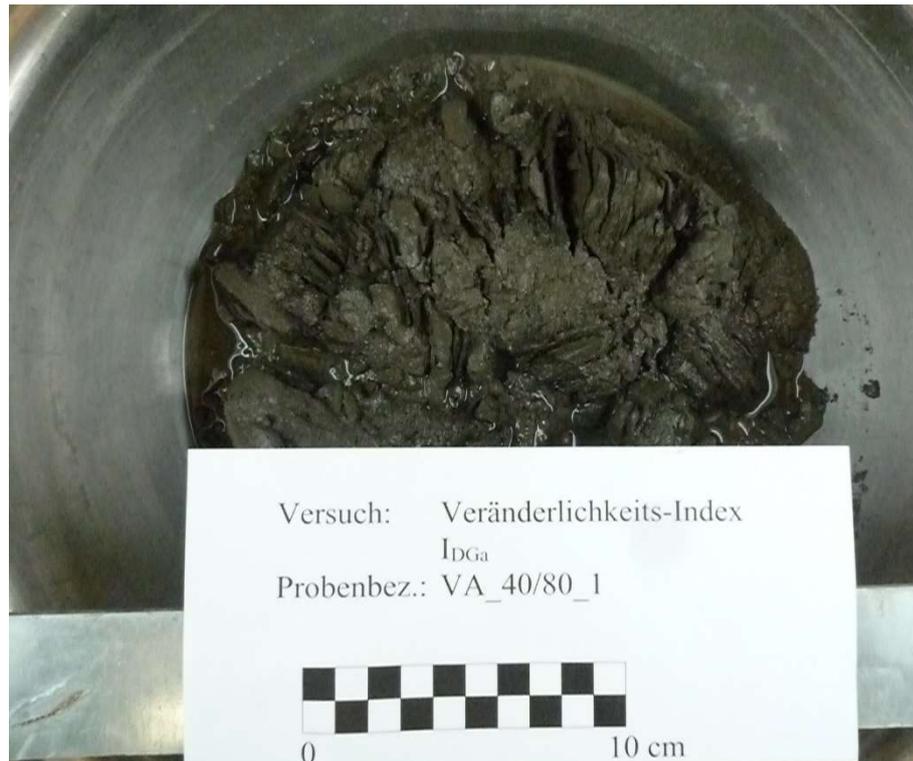


Abb. 13: Zerfall der Probestücke nach der zweiten Wasserlagerung

Nach der Trocknung der entstandenen Bodenmasse wurde deutlich, dass eine weitere Versuchsdurchführung wenig Sinn gehabt hätte, da offensichtlich nur noch einheitliche Korngrößen vorhanden waren. Aufgrund der geringen Druckfestigkeit des Materials würden auch verbleibende (größere) Bodenteilchen bei einer Siebung zerdrückt werden. Weiters bildeten sich während des Trocknungsvorganges neue Fragmente, welche eine Siebung verfälschen könnten. Somit stellte sich das Material als zu schwach für die Beanspruchung durch mehrmalige Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel heraus. Dennoch konnte der grundsätzliche Versuchsablauf damit geübt und bewertet werden.

7.2.3.1 Versuchsergebnisse

Grundsätzlich wäre die Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} von diesem Material möglich – dieser wäre dementsprechend hoch. Als Eichmaterial eignet es sich jedoch nicht. Hier wäre ein Material erforderlich, welches zu Versuchsende noch aus unterschiedlichen Kornfraktionen besteht und bei einer Siebung nicht weiter zerfällt.

7.2.4 Lagerung unter Wasserbedeckung

Da die Beanspruchung durch mehrmalige Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel stärker war als angenommen, wurde im Nachhinein frisches Probenmaterial einer einfachen Lagerung unter Wasserbedeckung (siehe Tab. 8) gemäß ÖNORM EN ISO 14689:2019 für 24 Stunden ausgesetzt.



Abb. 14: Probenmaterial für die Lagerung unter Wasserbedeckung

7.2.4.1 Versuchsergebnisse

Während der Versuchsdurchführung lösten sich lediglich lockere Fragmente auf der Oberfläche des Probestücks. Nach Tab. 8 ist dieses Material demnach als veränderlich (Grad 2) zu beschreiben. Um auch eine Aussage über die Veränderung durch eine Trocknung treffen zu können, wurde das Material zusätzlich bis zur Massenkonstanz bei 105 ± 5 °C getrocknet. Wie in Abb. 15 erkennbar, verursacht eine Trocknung scheinbar keine nennenswerte Veränderung. Es bilden sich jedoch einige (Mikro-)Risse, welche eine Materialschwächung darstellen. Eine neuerliche Wasserlagerung würde sofort wieder zu Zerfallserscheinungen führen.



Abb. 15: Probestück und davon abgelöste Fragmente nach der Lagerung unter Wasserbedeckung und anschließender Trocknung

Eine Lagerung unter Wasserbedeckung für 24 Stunden kann nützlich sein, um abschätzen zu können, ob das jeweilige Boden- bzw. Felsmaterial überhaupt als Eichmaterial in Frage kommt. Auch könnte festgelegt werden, ob eine Bestimmung des Veränderlichkeits-Index notwendig ist. Wenn nämlich das Material bereits bei einer Lagerung unter Wasserbedeckung starke Zerfallerscheinungen aufweist, wäre auch der Veränderlichkeits-Index dementsprechend hoch. Eine Eignung des Materials für bautechnische Zwecke kann dann vermutlich schon zu Beginn ausgeschlossen werden.

Ein anderes Probestück (Probenbezeichnung W_2) des gleichen Materials zerfiel hingegen innerhalb weniger Stunden in mehrere Stücke und wäre somit gemäß Tab. 8 als veränderlich (Grad 3) bis stark veränderlich (Grad 4) zu beschreiben gewesen. Hier kann jedoch die Annahme getroffen werden, dass der Zerfall durch eine Vorschwächung des Materials (im Zuge des Lösevorgangs) beschleunigt wurde. Dies veranschaulicht umso mehr, dass eine einfache Lagerung unter Wasserbedeckung einerseits zu schwach sein kann und andererseits aber auch starke Auswirkungen haben kann. Eine alleinige Beschreibung des Materialverhaltens aufgrund der Veränderlichkeit nach einer Lagerung unter Wasserbedeckung kann somit zu einer falschen Gesamteinschätzung der Eigenschaften führen.

7.2.5 Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGB}

Da sich das Material für die Verwendung als Eichmaterial als ungeeignet herausstellte, konnten keine Versuche zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGB} durchgeführt werden. Außerdem ist in der vorliegenden Version der Norm keine Angabe über die Anzahl der durchzuführenden Befeuchtungs-Trocknungs-

Wechsel zu finden. Für eine korrekte Durchführung wären auch Probenkörbe mit entsprechender Maschen- bzw. Lochweite notwendig, hier könnten für eine erste Evaluierung des Versuchsablaufs aber auch Siebe mit entsprechender Maschenweite verwendet werden.

Als Nachteil bei der Bestimmung des Veränderlichkeits-Index nach Methode B kann die Trocknung des Materials vor der eigentlichen Testung genannt werden, da das Materialverhalten beim ersten Wasserkontakt nicht bewertet werden kann.

7.2.6 Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Methylenblau-Werts V_{BS}

Bevor ein Färbetest durchgeführt werden konnte, musste die dafür notwendige Methylenblaulösung hergestellt werden. Dazu wurde zuerst der Wassergehalt W_b des Methylenblaupulvers bestimmt.

$$W_b = \frac{M_h - M_g}{M_g} \quad (6)$$

W_b	[%]	Wassergehalt des Methylenblaupulvers
M_h	[g]	Masse des (feuchten) Methylenblaupulvers
M_g	[g]	Masse des getrockneten Methylenblaupulvers

Die Feuchtmasse M_h betrug dabei 5,02 g, die Trockenmasse M_g 4,30 g. Damit berechnete sich der Wassergehalt zu 16,74 %. Unter Berücksichtigung des Wassergehalts war somit eine Masse von $11,67 \pm 0,01$ g für die Herstellung der Methylenblaulösung notwendig. Das Pulver wurde in zuvor aufgewärmtes, demineralisiertes Wasser bis zur vollständigen Auflösung eingerührt. Im Anschluss wurde die fertige Lösung in eine Flasche zur weiteren Aufbewahrung gefüllt. Weitere Informationen zur Herstellung finden sich in Anhang A3.

Zur Evaluierung des Versuchs wurden zwei Tragschichtmaterialien – wie sie im Straßenbau Verwendung finden – getestet. Somit war bereits vor der Versuchsdurchführung offensichtlich, dass der Methylenblauwert eher niedrig ausfallen sollte. Gemäß ÖNORM EN 16907-3:2019 ist Bodenmaterial, welches einen Methylenblauwert V_{BS} von mehr als 0,2 % (entspricht 0,2 g/100 g) aufweist, als wasserempfindlich zu betrachten.

Da die Versuchsdurchführung gemäß prEN 17542-3:2019 jener zur Bestimmung des Methylenblauwerts MB bzw. MB_F nach ÖNORM EN 933-9:2013 sehr ähnlich und damit bereits erprobt ist, gab es keine besonderen Vorkommnisse während der Versuche. Einige Anmerkungen sind dennoch zu tätigen.

Gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019 ist eine maximale Probenmenge von 200 g vorgesehen, in prEN 17542-3:2019 findet dieser Wert jedoch keine Erwähnung. Eine Maximalmenge ist jedenfalls notwendig, da sonst eine ausreichende Durchmischung des Materials bzw. der Boden-Wasser-Suspension mit der Methylenblaulösung nicht gegeben ist. Andererseits wird in prEN 17542-3:2019 eine Mindestmenge an beigegebener Methylenblaulösung gefordert, diese beträgt 20 ml. Bei zu wenig Feinanteilen im Probenmaterial entstehen dadurch aber Komplikationen, da die Probenmasse zu hoch sein kann und gleichzeitig die Methylenblaulösung zu gering sein kann. Eine Versuchsdurchführung nach Norm ist somit nicht mehr möglich.

7.2.6.1 Versuchsergebnisse

Der Versuch zur Bestimmung des Methylenblauwerts V_{BS} erfordert sehr genaues und sauberes Arbeiten. Bereits geringe Abweichungen von der Norm oder Unachtsamkeiten führen zu großen Unterschieden in den Ergebnissen. In den Versuchsprotokollen (siehe Anhang A4) sind die gesamten Testfeldstreifen dargestellt. Für Material A wurde der allgemeine Vorgang geübt. Zudem wurden absichtlich Fehler in der Versuchsdurchführung toleriert, um die Auswirkungen im Färbetest bewerten zu können. Deswegen sind auf dem Testfeldstreifen mit der Bezeichnung „VBS_1“ mehrere Punkte zu sehen, welche für eine Klassifizierung unbrauchbar wären. Hellere Stellen in der Mitte der Materialablagerung, welche eigentlich dunkel sein sollten, entstanden durch „Materialabplatzungen“ vom Filterpapier im Zuge der Trocknung.

Im Folgenden werden Abbildungen des Färbetests gezeigt und positiv oder negativ verlaufene, sogenannte „Fleckentests“, erläutert.

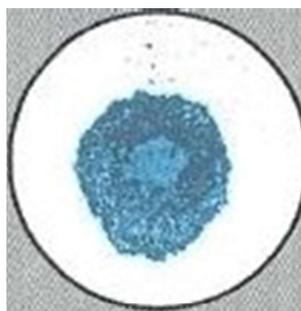


Abb. 16: Prüfpunkt 1 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_1)

Aufgrund der geringen Methylenblaulösung (10 ml) hat Prüfpunkt 1 noch keinen kräftigen blauen Farbton.

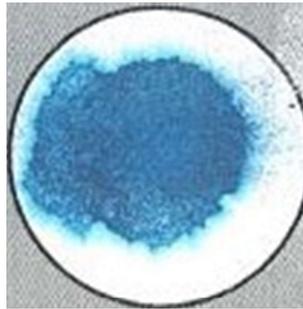


Abb. 17: Prüfpunkt 3 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_1)

Abb. 17 zeigt eine Beeinflussung von Prüfpunkt 3 durch Prüfpunkt 2. Durch den bereits feuchten Testfeldstreifen wurde eine Verzerrung von Punkt 3 in Richtung Punkt 2 hervorgerufen.

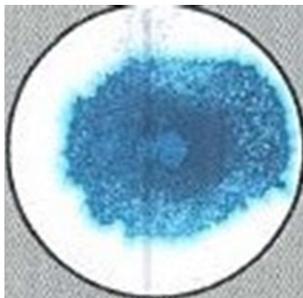


Abb. 18: Prüfpunkt 5 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_1)

Bei Prüfpunkt 5 (Abb. 18) wurde aufgrund einer fehlerhaften Materialdurchmischung die Bildung von helleren Flecken beobachtet. Der etwas hellere Fleck in der Mitte stellt eine „Materialabplatzung“ dar.

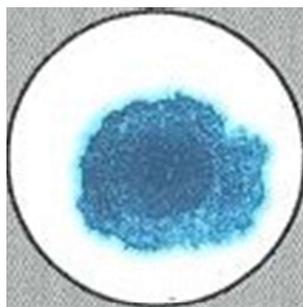


Abb. 19: Prüfpunkt 9 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_1)

Prüfpunkt 9 ist in Abb. 19 dargestellt. Hier lag der Filterpapier-Testfeldstreifen teilweise auf, sodass eine freie Ausbreitung des Materials behindert wurde.

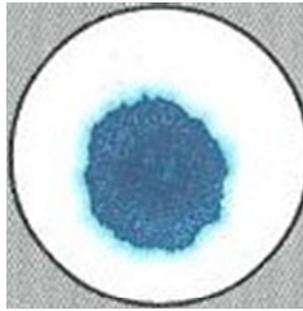


Abb. 20: Prüfpunkt 11 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_1)

Abb. 20 zeigt Prüfpunkt 11. In der Mitte ist eine dunkle Materialablagerung zu sehen, umgeben von einem hellblauen Ring (Aureole). Der Durchmesser beträgt elf Millimeter und liegt im zulässigen Bereich (8-12 mm). Prüfpunkt 11 stellt somit einen optimalen Färbetest dar.

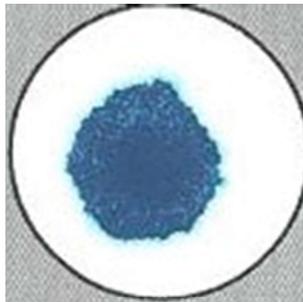


Abb. 21: Prüfpunkt 13 (Filterpapier-Testfeldstreifen VBS_2)

Auch bei Prüfpunkt 13 (Abb. 21) konnte ein Färbetest nach Norm erzielt werden, wobei der hellblaue Ring etwas stärker sein könnte.

Material A weist einen Methylenblauwert V_{BS} von 0,02 g/100 g auf. Dazu war aber sehr viel Material notwendig, um die Mindestmenge an Methylenblaulösung zu erreichen. Gemäß ÖNORM EN 16907-3:2019 ist Material A somit als wasserunempfindlich einzustufen. Da es sich um Tragschichtmaterial handelt, ist dieses Ergebnis als plausibel anzusehen.

Für Material B wurde der Methylenblauwert V_{BS} ohne Abweichungen zur Norm bestimmt. Dieser beträgt 0,04 g/100 g. Durch Zufall war eine Methylenblauemenge von 20 ml bei einer Probenmenge von ca. 200 g ausreichend, um freien Farbstoff am Testfeldstreifen zu erzeugen.

Zur Klassifizierung von feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden ist dieses Verfahren nützlich, zum Nachweis der Wasserempfindlichkeit von grobkörnigen Böden ist es aufgrund der benötigten Materialmenge jedoch nur bedingt geeignet. Wie bei der Bestimmung des Methylenblauwerts MB gemäß

ÖNORM EN 933-9:2013 wäre hier eine Beimengung von Kaolinit mit bekanntem V_{BS} -Wert hilfreich, um eine Testung durchführen zu können.

8 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass veränderlich festes Gestein in den aktuellen Normen zwar Erwähnung findet, aber nicht in dem Umfang behandelt wird, welcher für eine umfassende Klassifizierung und einen reibungslosen Bauablauf notwendig wäre. Nach dem Verfassen dieser Arbeit wurde aber deutlich, dass auch diese neuen Parameter zur Materialklassifizierung für veränderlich feste Gesteine nur einen weiteren Teil einer Lösung darstellen und es somit weiteren Forschungsbedarf benötigt. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen erläutert.

Der Versuch zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGa} ist einfach durchzuführen. Die Art der Beanspruchung ist realitätsnah und häufig in der Baupraxis anzutreffen. Eine zu geringe Festigkeit der verbleibenden Boden- und Felsfragmente könnte zu Unterschieden bei der Siebung des Materials führen. Für manche Boden- und Felsmaterialien, wie z.B. den beprobten Schlier, ist die Beanspruchung durch mehrmalige Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel jedoch zu groß. Die Bestimmung von I_{DG} ist zwar möglich, aber nicht zielführend, da eine Bestimmung der Korngrößenverteilung zum selben Ergebnis führt, auch wenn diese aufgrund des Materialzusammenhalts viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Auswahl des richtigen Versuchsprogramms kann somit zu Schwierigkeiten hinsichtlich der Kosten- und Kapazitätsplanung führen, insbesondere bei größeren Bauvorhaben. Der Zeitaufwand für die Versuchsdurchführung ist im Vergleich zu anderen bodenmechanischen Laborversuchen im höheren Bereich anzusiedeln. Ebenso von Bedeutung ist die Berücksichtigung des Platzbedarfs für die Versuchsdurchführung sowie auch für die Probenlagerung.

Leider konnten keine Versuche zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DGb} durchgeführt werden. Dennoch wurde der allgemeine Versuchsablauf evaluiert. Dabei fiel ein negativer Aspekt besonders auf: durch die Trocknung vor Versuchsdurchführung kann keine Aussage über das Materialverhalten beim ersten Wasserkontakt getroffen werden. Im Hinblick auf Bohrungen (z.B. im Tunnelbau), stellt dies einen Nachteil dar, wodurch weitere Versuche durchzuführen sind. Bei der Bestimmung des Veränderlichkeits-Index nach Methode A ist dies hingegen nicht notwendig. Die Versuchsdauer kann aufgrund fehlender Angaben in der Norm nicht beurteilt werden. Wie auch bei der Bestimmung des Veränderlichkeits-Index nach Methode A ist im Hinblick auf den Laborbetrieb der notwendige Platzbedarf zu berücksichtigen.

Auch wenn die Versuche zur Bestimmung der Veränderlichkeit unter Wasserbedeckung nicht Teil dieser Arbeit sein sollten, wurde aufgezeigt, dass die Ergebnisse aus diesen Versuchen mit Vorsicht zu betrachten sind. Trotzdem können sie nützlich sein, um abschätzen zu können, ob eine Bestimmung des

Veränderlichkeits-Index überhaupt sinnvoll ist. Durch diese Versuche wurde auch deutlich, dass bereits bei der Probenahme auf veränderliche Eigenschaften zu achten ist und die Rahmenbedingungen hinsichtlich des Probenverkehrs, der Probenlagerung usw. einzuhalten sind.

Der Versuch zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} gemäß prEN 17542-2:2019 ist einfach und schnell durchführbar. Nachteilig kann sich eine zu hohe Plastizität des Probenmaterials auswirken - dann ist keine Testung möglich. Hier könnte überlegt werden, ein Verfahren für die Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index mit trockenem Probenmaterial einzuführen, wobei dadurch die tatsächlichen Einbaubedingungen verzerrt dargestellt werden. Bei der 10/20 mm-Kornfraktion stellt sich die Frage, inwieweit das Ergebnis aussagekräftig ist, da viele Boden- bzw. Felspartikel nur eine geringe oder überhaupt keine Zertrümmerung aufwiesen. Für die 40/80 mm-Kornfraktion kann die Geometrie der Probestücke große Abweichungen in den Ergebnissen verursachen. Fraglich ist, ob dieses Materialverhalten nur zufällig zustande gekommen ist oder ob dies grundsätzlich bei der gröberen Kornklasse zu erwarten ist. Ebenso könnten anisotrope Materialeigenschaften zu Abweichungen in den Ergebnissen führen. Jedenfalls sollte es dazu eine Anmerkung in der Norm geben.

Wie bereits bei der Bestimmung des Veränderlichkeits-Index notwendig, gilt für beide Kornfraktionen, dass das Material nach der Beanspruchung eine bestimmte Restfestigkeit aufweisen muss, da sonst eine weitere Zerstörung während des Siebvorgangs stattfindet.

Durch die langjährige Verwendung des Methylblauwerts MB zur Abschätzung der Frostsicherheit bzw. des Wasseraufnahmevermögens sowie zur internen Produktionskontrolle, kann das Verfahren als ausgereift betrachtet werden. Trotzdem wird es im deutschsprachigen Raum nur selten verwendet. Bei Einführung von prEN 17542-3:2019 zur Materialklassifizierung von gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden wäre somit ein Erfahrungsaustausch mit europäischen Bodenprüfanstalten notwendig – vor allem Frankreich nimmt am Gebiet der Methylblautestung eine führende Rolle ein. Für die Prüfung der Wasserempfindlichkeit von grobkörnigen Böden könnte überlegt werden, ein Prüfverfahren unter der Zugabe von Kaolinit – wie dies auch in ÖNORM EN 933-9:2013 Anwendung findet – in prEN 17542-3:2019 zu integrieren.

Da die in dieser Arbeit behandelten Bodenmaterialien keine definitive Aussage über die Eignung der Versuche zulassen, würde beispielsweise ein groß angelegter Rundversuch zeigen, ob die Versuche praxistauglich sind oder nicht. Weiters könnte auch angestrebt werden, die Ergebnisse verschiedenster Gesteine in einer Art „europäischen Datenbank“ zusammenzuführen und - darauf aufbauend - die Versuche weiterzuentwickeln.

9 Literatur

- Barton, N./Lien R./Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* 6, 189–236.
- Baud, Jean-Pierre/Gambin, Michel (2014). Soil and Rock Classification from High Pressure Borehole Expansion Tests. *Geotechnical and Geological Engineering* (32), 1397–1398. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10706-013-9664-0.pdf> (abgerufen am 12.04.2020).
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications - A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*.
- Einsele, G./Heitfeld, K.-H./Lempp, Ch./Schetelig, K. (1985). Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) - Einleitender Beitrag. In: Karl-Heinrich Heitfeld (Hg.). *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer, 2–23.
- Haack, Alfred/Boley, Conrad/Forouzandeh, Yashar (2019). Tunnelbau und unterirdischer Hohlraumbau. In: Conrad Boley (Hg.). *Handbuch Geotechnik. Grundlagen-Anwendungen-Praxiserfahrungen*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 861–960.
- He, Manchao/Sun, Xiaoming (2020). Engineering View of Soft Rocks. In: Milton Assis Kanji/Manchao He/Luís Ribeiro e Sousa (Hg.). *Soft Rock Mechanics and Engineering*. Cham, Springer, 7–17.
- Heitfeld, Karl-Heinrich (Hg.) (1985). *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. Berlin/Heidelberg, New York, Tokyo, Springer.
- Kanji, Milton Assis (2014). Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (6), 186–195. Online verfügbar unter <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1674775514000389?to-ken=EE9E04FFA54C4E7838580EF644BD900D5DAD0D4D07A0C9AC9A4D0F3C430C0EFB055E66EBC46A5095485B9D5BCAD94341> (abgerufen am 12.04.2020).

- Kanji, Milton Assis/He, Manchao (2020). Introduction. In: Milton Assis Kanji/Manchao He/Luís Ribeiro e Sousa (Hg.). *Soft Rock Mechanics and Engineering*. Cham, Springer, 1–6.
- Kanji, Milton Assis/He, Manchao/Ribeiro e Sousa, Luís (Hg.) (2020). *Soft Rock Mechanics and Engineering*. Cham, Springer.
- Kast, K./Blinde, A./Brauns, J. (1985). Verdichtungs-, Verformungs- und Sättigungsverhalten von Schüttungen in Abhängigkeit von der geologischen Gesteinsentfestigung. In: Karl-Heinrich Heitfeld (Hg.). *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer, 237–254.
- Müller-Vonmoos, M. (1993). Geotechnik und Entsorgung. In: Karl Jasmund/Gerhard Lagaly (Hg.). *Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt, Steinkopff, 312–332.
- Nickmann, Marion (2009). Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten. In: Thuro Kuroschi (Hg.). *Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen. Reihe B. Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Geothermie*. München, Dr. Friedrich Pfeil.
- ÖGG Richtlinie, 2008. Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb, 2. überarbeitete Auflage. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), Salzburg.
- ÖNORM EN 13286-2:2012. Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische; Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes - Proctorversuch. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN 1367-1:2007. Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen; Teil 1: Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN 16907-2/A:2020. Erdarbeiten; Teil 2: Materialklassifizierung (Änderung). Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN 16907-2:2019. Erdarbeiten; Teil 2: Materialklassifizierung. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.

- ÖNORM EN 16907-3:2019. Erdarbeiten; Teil 3: Ausführung von Erdarbeiten. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN 1997-2:2010. Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik; Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN 933-9:2013. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 9: Beurteilung von Feinanteilen - Methylenblau-Verfahren. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 14688-1:2019. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden; Teil 1: Benennung und Beschreibung. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 14688-2:2019. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden; Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 14689:2019. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-1:2015. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben; Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-12:2018. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben; Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 17892-4:2017. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben; Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.
- ÖNORM EN ISO 22475-1:2006. Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen; Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung. Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation, Wien.

- Österreichisches Wörterbuch (2005). Schlier. Herausgegeben im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur. Schulausgabe. 39. Aufl.
- Palmström, Arild (1995). RMI - A rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, Norway.
- Pech, Anton/Würger, Erik/Pauser, Alfred/Hofmann, Robert (2005). gründungen. In: Anton Pech (Hg.). baUkonstruktionen. Wien, New York, Springer, 6.
- Plinninger, Ralf J./Spaun, Georg/Nickmann, Marion (2012). Geotechnische Aspekte der Beprobung und Untersuchung veränderlich fester Gesteine. 8. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels". Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/258769174_Geotechnische_Aspekte_der_Beprobung_und_Untersuchung_veranderlich_fester_Gesteine (abgerufen am 12.04.2020).
- prEN 17542-1:2019. Erdarbeiten - Geotechnische Laborversuche - Teil 1: Abbaubarkeit. Comité Européen de Normalisation, Brüssel.
- prEN 17542-2:2019. Erdarbeiten - Geotechnische Laborversuche - Teil 2: Zertrümmerbarkeit. Comité Européen de Normalisation, Brüssel.
- prEN 17542-3:2019. Erdarbeiten - Geotechnische Laborversuche - Teil 3: Methylenblauwert VBS an Boden und Fels. Comité Européen de Normalisation, Brüssel.
- Sadowski, Georg R. (2020). The Geology of Soft Rocks. In: Milton Assis Kanji/Manchao He/Luís Ribeiro e Sousa (Hg.). Soft Rock Mechanics and Engineering. Cham, Springer, 19–35.
- Terzaghi, Karl/Peck, Ralph B. (1961). Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Übersetzt von Alfred Bley. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer.
- Tischelmayer, Norbert (2020). Opok. Online verfügbar unter <https://glossar.weinplus.eu/opok> (abgerufen am 13.04.2020).
- Wickham, G. E./Tiedemann, H. R./Skinner, E. H. (Hg.) (1972). Support determination based on geologic predictions.

10 Anhang

Anhang A1	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Veränderlichkeits-Index nach prEN 17542-1:2019
Anhang A2	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index nach prEN 17542-2:2019
Anhang A3	Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Methylenblau-Werts V_{BS} nach prEN 17542-3:2019
Anhang A4	Versuchsprotokolle

A 1 Bestimmung des Veränderlichkeits-Index I_{DG} nach prEN 17542-1:2019

Die folgenden Ausführungen in diesem Kapitel wurden aus prEN 17542-1:2019 entnommen, sinngemäß übersetzt und durch Inhalte aus der Normenreihe für Erdarbeiten (ÖNORM EN 16907) ergänzt.

Bei der Bestimmung der Veränderlichkeit (auch als Abbaubarkeit bezeichnet; en. Degradability) nach prEN 17542-1:2019 wird zwischen der Französischen Methode und der Spanischen Methode unterschieden. Diese werden auch als Methode A bzw. Methode B bezeichnet und sollen Teil von ÖNORM EN 16907-2:2019 werden. Der Versuch dient dazu, den Widerstand des Probenmaterials gegen Zerfall durch Wasserkontakt zu evaluieren. Die Ergebnisse der zwei Methoden sind nicht gleichwertig und somit immer in Verbindung mit der verwendeten Methode zu nennen. (prEN 17542-1:2019)

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung bei den folgenden Versuchen erfolgt nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2017, jene des Wassergehalts nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2015.

A 1.1 Methode A nach prEN 17542-1:2019

Das Ziel bei Methode A nach prEN 17542-1:2019 ist die Bestimmung der Reduktion von D_{10} – Durchmesser bei 10 % des Massendurchganges – nach der Durchführung von vier Befeuchtungs-Trocknungs-Wechseln. Das Ergebnis wird als Veränderlichkeits-Index I_{DGa} bezeichnet und ist definiert als (prEN 17542-1:2019):

$$I_{DGa} = \frac{D_{10} \text{ vor dem 1. Befeuchtungs – Trocknungs – Wechsel}}{D_{10} \text{ nach dem 4. Befeuchtungs – Trocknungs – Wechsel}} \quad (7)$$

D_{10} [mm] Korndurchmesser bei 10 % des Massendurchganges einer Siebung

Für die Durchführung des Versuchs werden folgende Utensilien benötigt (prEN 17542-1:2019):

- Quadratloch-Analysensiebe
- Waage mit einer Genauigkeit von ± 1 g

- Probenbehälter aus Metall mit den Mindestabmessungen ($H \times L \times B$):
0,10 m \times 0,30 m \times 0,50 m
- Behälter mit den Mindestabmessungen ($H \times L \times B$):
0,25 m \times 0,50 m \times 0,75 m
- Bodenmechanische Standard-Labora-ausrüstung (z.B. Trockenschrank, etc.)

Da bei diesem Versuch das Material zuerst einer Wasserlagerung unterzogen wird, wird dies auch bei der Bezeichnung sichtbar gemacht. Deshalb wird die Bezeichnung Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel anstatt Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel verwendet.

A 1.1.1 Versuchsdurchführung (Methode A) nach prEN 17542-1:2019

Zuerst wird die sogenannte d/D Fraktion (Siebrückstand im Sieb mit der Maschenweite d nach einer Siebung durch ein Sieb mit der Maschenweite D) abgeseibt: für feinkörniges Material (z.B. Mergel, Tonstein, Pelit) mittels 10 mm- und 20 mm-Sieb, für grobkörniges Material (z.B. schwach metamorphe Sedimentgesteine) mittels 40 mm- und 80 mm-Sieb. Mögliches Überkorn wird zerkleinert und abermals geseibt. Die Gesamtmasse des Probenmaterials sollte mindestens zwei Kilogramm betragen. Um eine Sieblinie des „intakten“ Materials zu erhalten, wird das Material wiederum geseibt, unter Ergänzung eines 16 mm- und 50 mm- oder 63 mm-Siebes. Dadurch können drei Punkte auf der Sieblinie sowie D_{10} bestimmt werden. (prEN 17542-1:2019)

Das Probenmaterial (d/D Kornfraktion) kann wieder durchmischt und großflächig im Metallbehälter verteilt werden. Dieser wird in den Behälter mit Wasser gestellt. Im Anschluss beginnen die vier Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel mit einer jeweiligen Dauer von 8 ± 1 Stunden (Befeuchtung) bzw. 16 ± 1 Stunden (Trocknung), wobei der erste Zyklus mit einer Befeuchtung beginnt und der vierte Zyklus mit einer Trocknung (bei 105 ± 5 °C) endet. Nach jedem Befeuchtungsvorgang wird das Wasser abgesaugt. Nach Abschluss des letzten Trocknungszyklus wird wieder eine Sieblinie und D_{10} bestimmt. Um keine Unstetigkeitsstellen in der Sieblinie zu erhalten, werden mehrere Siebe verschiedener Maschenweite verwendet (siehe Tab. 20). Die Anzahl und Maschenweite muss so gewählt werden, dass die Korngrößenverteilung möglichst genau abgebildet wird. Mit der bereits erwähnten Formel wird der Veränderlichkeits-Index berechnet. (prEN 17542-1:2019)

Tab. 20: Mögliche Maschenweiten der Analysensiebe nach prEN 17542-1:2019

Maschenweite für die 10/20 mm-Kornfraktion [mm]	Maschenweite für die 40/80 mm-Kornfraktion [mm]
1	5
2	10
5	20
10	40

A 1.1.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse hat in einem Bericht zu erfolgen, welcher folgende Punkte beinhalten muss (prEN 17542-1:2019):

- a. Verwendete Norm (prEN 17542-1:2019) und verwendete Methode
- b. Probennummer bzw. -bezeichnung zur eindeutigen Identifikation der getesteten Probe (z.B. Bohrlochnummer, Tiefe, Art der Probennahme, etc.)
- c. Visuelle Beschreibung der Probe und beobachtete Besonderheiten nach der Versuchsdurchführung, gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019
- d. Versuchsergebnisse, kurvenförmig dargestellt als prozentualer Massendurchgang in einer halb-logarithmischen Skala, vor und nach den Befeuchtungs-Trocknungs-Wechseln unter Beachtung der Anforderungen nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2017
- e. Veränderlichkeits-Index auf eine Dezimalstelle genau
- f. Mögliche Abweichungen von der Versuchsdurchführung nach Norm und allgemeine Erläuterungen, welche zur Interpretation der Versuchsergebnisse von Relevanz sind

A 1.2 Methode B nach prEN 17542-1:2019

Das Ziel bei Methode B nach prEN 17542-1:2019 ist die Bestimmung des Massenverlusts nach der Materialtestung. Das Ergebnis wird als Veränderlichkeits-Index I_{DGB} bezeichnet und beschreibt den prozentualen Massenverlust. (prEN 17542-1:2019)

Für die Durchführung des Versuchs werden folgende Utensilien benötigt (prEN 17542-1:2019):

- Behälter mit Wassertemperaturregelung
- Waage mit einer Genauigkeit von 0,1 % der Probenmasse
- Quadratloch-Analysensiebe mit den in Tab. 21 angegebenen Maschenweiten
- Behälter, welche einen freien Wasserzutritt und Wasserabfluss erlauben (z.B. Körbe aus Drahtgewebe mit entsprechender Maschenweite)
- Bodenmechanische Standard-Laboraüstung (z.B. Trockenschrank, etc.)

Tab. 21: Erforderliche Maschenweiten der Analysensiebe nach prEN 17542-1:2019

Maschenweite für feinkörnige Böden [mm]	Maschenweite für grobkörnige Böden [mm]
0,16	8
0,315	10
0,63	12,5
1,25	16
2,5	20
4	25
5	31,5
	40
	50
	63

A 1.2.1 Versuchsdurchführung (Methode B) nach prEN 17542-1:2019

Für feinkörniges Probenmaterial wird gefordert, dass das Größtkorn kleiner als zehn Millimeter ist. Des Weiteren sollte eine Masse von 110 ± 10 g pro Kornfraktion, welche zu mehr als fünf Prozent im zu prüfenden Material vorhanden sein muss, erreicht werden (prEN 17542-1:2019).

Tab. 22: Notwendige Kornfraktionen bzw. Maschenweiten für feinkörniges Material nach prEN 17542-1:2019

Notwendige Kornfraktionen [mm]
0,315-0,63
0,63-1,25
1,25-2,5
2,5-5
5-10

Das Probenmaterial wird nass durch das 0,315 mm Sieb gesiebt. Danach wird es bis zur Massenkonzanz bei 105 ± 5 °C im Trockenschrank getrocknet und trocken durch die in Tab. 22 angegebenen Siebe gesiebt. Im Anschluss kann von jeder Kornfraktion eine Menge von 100 g abgewogen und separat in Testbehältnisse gegeben werden. Der Feinanteil im 0,16 mm-Sieb wird nicht für die Testung verwendet. (prEN 17542-1:2019)

Für grobkörniges Probenmaterial wird eine Korngröße von mehr als fünf Millimetern gefordert (Material mit einer kleineren Korngröße zählt wiederum zum feinkörnigen Probenmaterial und wird dementsprechend getestet). Auch hier gilt wieder, dass jede Kornfraktion zu mehr als fünf Prozent im Probenmaterial vertreten sein muss. Die jeweilige Mindestmenge pro Kornfraktion wird in Tab. 23 angegeben. Die Siebung erfolgt nass, die Trocknung bei 105 ± 5 °C bis zur Massenkonzanz. Die erforderlichen Mengen können abgewogen und in eigene Behältnisse gegeben werden. Korngrößen über 20 mm werden zudem abgezählt. (prEN 17542-1:2019)

Tab. 23: Mindestmengen für die jeweilige Kornfraktion nach prEN 17542-1:2019

Maschenweite [mm]	Mindestmenge [g]
5-10	300
10-20	1000
bestehend aus	
Material von 10-12,5	33%
Material von 12,5-20	67%
20-40	1500
bestehend aus	
Material von 20-25	33%
Material von 25-40	67%
40-63	3000
bestehend aus	
Material von 40-50	50%
Material von 50-63	50%
Größere Kornfraktionen	3000

Im Falle einer Unterschreitung von den zuvor angeführten fünf Prozent wird keine Testung durchgeführt. Der Massenverlust berechnet sich dann durch Bildung des Mittelwerts der beiden nächstgrößeren und nächstkleineren Kornfraktionen. Sofern dies nicht möglich ist, wird entweder die nächstgrößere oder die nächstkleinere Fraktion als Massenverlust angenommen. Bei Fehlen einer Kornfraktion aus 10-20, 20-40, 40-63 mm-Fragmenten wird jene ausgewählt, welche im Überschuss vorhanden ist, vorbereitet und dafür verwendet, die fehlende Fraktion zu ersetzen. (prEN 17542-1:2019)

Im Anschluss werden die einzelnen Kornfraktionen zwischen 24 und 48 Stunden lang bei 21 ± 1 °C in Wasser gelagert. Dabei gilt zu beachten, dass die Proben mindestens zu 15 mm mit Wasser überdeckt sind und dass das Wasservolumen dem fünffachen Probenvolumen entspricht. Um eine Verdunstung zu verhindern, werden die Behältnisse zudem abgedeckt. (prEN 17542-1:2019)

Nach einer Abtropfzeit von 15 ± 5 Minuten werden die Testbehältnisse wieder bei 105 ± 5 °C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. In Intervallen von 4-18 Stunden werden die Behältnisse zum Abkühlen auf Raumtemperatur und anschließend Abwiegen aus dem Trockenschrank entfernt. Nach Erreichen der

Massenkonstanz können die Proben bei Raumtemperatur abkühlen, bevor ein neuerlicher Befeuchtungsvorgang durchgeführt wird. (prEN 17542-1:2019)

In der vorliegenden Version von prEN 17542-1:2019 findet sich noch keine Angabe darüber, wie viele Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel durchzuführen sind. Des Weiteren geht nicht klar hervor, wozu das Sieb mit der Maschenweite 0,16 mm benötigt wird.

Im Anschluss an die Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel wird das Material abermals gesiebt – feinkörniges Material mit den zuvor angegebenen Sieben, grobkörniges Material mit den in Tab. 24 angegebenen Sieben. (prEN 17542-1:2019)

Tab. 24: Erforderliche Maschenweiten abhängig von der Korngröße nach prEN 17542-1:2019

Korngröße [mm]	Maschenweite [mm]
63-40	31,5
40-20	16
20-10	8
10-5	4

Kornfraktionen, welche größer als 20 mm sind, werden qualitativ nach jedem Befeuchtungsvorgang und quantitativ am Ende des Testvorgangs begutachtet. Die qualitative Begutachtung besteht aus zwei Teilen: einerseits sollen die Auswirkungen des Wassers auf das Probenmaterial (z.B.: Auflösung, Rissbildung, Zerkleinerung, etc.) beschrieben werden, andererseits soll die Anzahl der beeinträchtigten Bodenpartikel genannt werden. Es wird zudem empfohlen, auch kleinere Korngrößen qualitativ zu bewerten. (prEN 17542-1:2019)

A 1.2.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Im abschließenden Bericht sind folgende Punkte zu erwähnen (prEN 17542-1:2019):

- a. Verwendete Norm (prEN 17542-1:2019) und verwendete Methode
- b. Probennummer bzw. -bezeichnung zur eindeutigen Identifikation der getesteten Probe (z.B. Bohrlochnummer, Tiefe, Art der Probennahme, etc.)
- c. Visuelle Beschreibung der Probe und beobachtete Besonderheiten nach der Versuchsdurchführung, gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019

-
- d. Masse jeder Kornfraktion vor Testbeginn
 - e. Anteil jeder Kornfraktion, welcher durch das jeweilige Sieb fällt, von dem das Material zuvor zurückgehalten wurde, ausgedrückt als prozentualer Anteil der gesamten ursprünglichen Kornfraktion
 - f. Mittlerer Verlust, berechnet vom prozentualen Verlust jeder Fraktion, unter Berücksichtigung der im Labor erhaltenen Korngrößenverteilung oder besser, von der Korngrößenverteilung des ursprünglichen Materials, von dem das Probenmaterial vorbereitet wurde. In diesen Berechnungen wird angenommen, dass es keinen Verlust durch das Sieb mit der Maschenweite 0,315 mm gibt.
 - g. Bei Vorhandensein von Korngrößen über 20 mm vor Versuchsdurchführung: Anzahl der durch die Versuchsdurchführung beeinträchtigten Partikel sowie Beschreibung nach deren Verhalten, wie z.B.: Auflösung, Rissbildung, Zerkleinerung, etc.
 - h. Veränderlichkeits-Index, angegeben auf zwei Dezimalstellen
 - i. Mögliche Abweichungen von der Versuchsdurchführung nach Norm und allgemeine Erläuterungen welche zur Interpretation der Versuchsergebnisse von Relevanz sind

A 2 Bestimmung des Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2:2019

Die folgenden Ausführungen in diesem Kapitel wurden aus prEN 17542-2:2019 entnommen, sinngemäß übersetzt und durch Inhalte aus anderen Normen ergänzt.

Der Zertrümmerbarkeits-Index, auch als Brechbarkeits-Index oder Brechbarkeitskoeffizient bezeichnet, soll Teil der Materialklassifizierung nach ÖNORM EN 16907-2:2019 werden. Bei der Bestimmung der Zertrümmerbarkeit (en. Fragmentability) nach prEN 17542-2:2019 ist das Ziel die Reduktion von D_{10} zu bestimmen. Die Beanspruchung erfolgt in Form von mechanischer Einwirkung bzw. Beanspruchung auf das Probenmaterial. Das Ergebnis wird als Zertrümmerbarkeits-Index bezeichnet und ist definiert als (prEN 17542-2:2019):

$$I_{FR} = \frac{D_{10} \text{ vor mechanischer Einwirkung}}{D_{10} \text{ nach mechanischer Einwirkung}} \quad (8)$$

D_{10} [mm] Korndurchmesser bei 10 % des Massendurchganges einer Siebung

Der Versuch dient dazu, das Verhalten von Felsmaterial während der Durchführung von Erdarbeiten zu bewerten. Durch das Ergebnis kann auf das Materialverhalten im Zuge der Verdichtung geschlossen werden. Wenn das Material zu Bodenmaterial zerfällt, kann es als Bodenmaterial klassifiziert werden. Findet kein Zerfall statt, muss das Material auf Veränderlichkeit/Abbaubarkeit überprüft werden. (ÖNORM EN 16907-3:2019)

Beide Werte zum Zertrümmerbarkeits-Index und Veränderlichkeits-Index sind somit relevant, um eine Eignung als Erdbaumaterial garantieren zu können.

Folgende Utensilien werden zur Durchführung des Versuchs benötigt (prEN 17542-2:2019):

- Verdichtungsgerät
- Grundplatte mit Versuchszylinder und Aufsatzring (Proctortopf B nach ÖNORM EN 13286-2:2012)
- Standard-Proctorhammer (2,5 kg) nach ÖNORM EN 13286-2:2012

- Quadratloch-Analysensiebe mit den Maschenweiten: 10, 16, 20, 40, 50 oder 63, und 80 mm sowie weitere Größen
- Waage mit einer Genauigkeit von ± 1 g
- Bodenmechanische Standard-Laboraüstung (z.B. Behältnisse, etc.)

A 2.1 Versuchsdurchführung nach prEN 17542-2:2019

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung im Rahmen dieses Versuchs erfolgt nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2017. Des Weiteren ist ÖNORM EN 13286-2:2012 zu berücksichtigen, welche beispielsweise die Abmessungen des Versuchszylinders beinhaltet (siehe Tab. 25 und Tab. 26).

Die ersten Schritte entsprechen jenen aus der Bestimmung der Veränderlichkeit nach Methode A. Der Vollständigkeit halber werden diese noch einmal erwähnt: Zuerst wird die sogenannte d/D Fraktion abgesiebt: für feinkörniges Material (z.B. Mergel, Tonstein, Pelite) mittels 10 mm- und 20 mm-Sieb, für grobkörniges Material (z.B. zerfallene magmatische oder metamorphe Gesteine) mittels 40 mm- und 80 mm-Sieb. Mögliches Überkorn wird zerkleinert und abermals gesiebt. Die Gesamtmasse des Probenmaterials sollte zwei Kilogramm betragen. Bei nicht im Anschluss folgender Versuchsdurchführung muss das Material entsprechend vor Verdunstung geschützt werden. (prEN 17542-2:2019)

Um eine Sieblinie des „intakten“ Materials zu erhalten, wird das Material wiederum gesiebt, unter Ergänzung eines 16 mm- und 50 mm- oder 63 mm-Siebes. Dadurch können drei Punkte auf der Sieblinie sowie D_{10} bestimmt werden. Danach wird das Probenmaterial wieder durchmischt und händisch in den Versuchszylinder gefüllt. Die Abmessungen des Zylinders können aus Tab. 25 entnommen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Material eine möglichst ebene Oberfläche aufweist. Es kann durch seitliche Hammerschläge auch leicht verdichtet werden (prEN 17542-2:2019).

Tab. 25: Abmessungen des Proctortopfes und der Grundplatte, zusammengefasst aus ÖNORM EN 13286-2:2012

Proctortopf	Durchmesser	Höhe	Dicke	
			Wanddicke	Grundplatte
	d_1 [mm]	h_1 [mm]	w [mm]	t [mm]
B	$150,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$9,0 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$

Mittels Verdichtungsgerät bzw. Proctorhammer werden 100 Schläge auf das Probenmaterial ausgeübt. Im Anschluss werden zusammenhängende Stücke voneinander getrennt, eine Siebanalyse durchgeführt und D_{10} bestimmt. Bei einer 10/20 mm-Kornfraktion werden beispielsweise Siebe mit den Maschenweiten 1, 2, 5 und 10 mm verwendet, bei einer 40/80 mm-Kornfraktion Siebe mit den Maschenweiten 5, 10, 20 und 40 mm (je nach Material sind selbstverständlich auch andere Maschenweiten zugelassen). Im Falle einer zu hohen Plastizität des Materials sollte der Versuch beendet werden und dies im Ergebnisprotokoll erwähnt werden. Mit den abgelesenen Werten aus der Kornverteilung kann der Zertrümmerbarkeits-Index berechnet werden. (prEN 17542-2:2019)

Tab. 26: Angaben zu Fallgewicht und Fallhöhe für die Versuchsdurchführung, zusammengefasst aus ÖNORM EN 13286-2:2012

Kennwerte des Versuchs	Symbol	Maßeinheit	Proctortopf B
Masse des Fallgewichts	m_R	kg	2,5
Durchmesser des Fallgewichts	d_2	mm	50
Fallhöhe	h_2	mm	305

A 2.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Im abschließenden Versuchsprotokoll bzw. Laborbericht müssen folgende Punkte erwähnt werden (prEN 17542-2:2019):

- a. Versuchsbezeichnung und dazugehörige Norm (prEN 17542-2:2019)
- b. Probennummer bzw. -bezeichnung zur eindeutigen Identifikation der getesteten Probe (z.B. Bohrlochnummer, Tiefe, Art der Probenahme, etc.)
- c. Visuelle Beschreibung der Probe und beobachtete Besonderheiten nach der Versuchsdurchführung, gemäß ÖNORM EN 16907-2:2019
- d. Versuchsergebnisse (Körnungslinien), kurvenförmig dargestellt als prozentualer Massendurchgang in einer halb-logarithmischen Skala, vor und nach der mechanischen Beanspruchung unter Beachtung der Anforderungen nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2017
- e. Zertrümmerbarkeits-Index auf eine Dezimalstelle genau

-
- f. Mögliche Abweichungen von der Versuchsdurchführung nach Norm und allgemeine Erläuterungen, welche zur Interpretation der Versuchsergebnisse von Relevanz sind

A 3 Bestimmung des Methylenblau-Werts V_{BS} nach prEN 17542-3:2019

Die folgenden Ausführungen in diesem Kapitel wurden aus prEN 17542-3:2019 entnommen, sinngemäß übersetzt und durch Inhalte aus der Normenreihe für Erdarbeiten (ÖNORM EN 16907) und aus ÖNORM EN 933-9:2013 ergänzt.

Die Bestimmung des Methylenblau-Werts (mit der Bezeichnung V_{BS}) für Boden und Fels ist in prEN 17542-3:2019 geregelt. Durch diesen Versuch wird jene Menge an Methylenblau ermittelt, welche durch die Boden- bzw. Felspartikel adsorbiert werden kann. Die Testung wird an einer 0/5 mm-Kornfraktion durchgeführt und auf die 0/50 mm-Kornfraktion mittels direkter Proportionalität umgerechnet. Anhand des Methylenblau-Werts kann auf die spezifische Oberfläche der Boden- bzw. Felspartikel und deren Wasserempfindlichkeit geschlossen werden (prEN 17542-3:2019).

Die Bestimmung des Methylenblau-Werts MB für die 0/2 mm-Kornfraktion wird in ÖNORM EN 933-9:2013 behandelt. Im Anhang A dieser Norm findet sich auch eine Erklärung zum Verfahren für die Bestimmung des Methylenblau-Werts MB_F für die 0/0,125 mm-Kornfraktion. Nach ÖNORM EN 16907-3:2019 zählt dieser Versuch zu den indirekten Prüfverfahren.

Aufgrund verschiedener Kornfraktionen können der Methylenblauwert MB bzw. MB_F nach ÖNORM EN 933-9:2013 und der Methylenblauwert V_{BS} nach prEN 17542-3:2019 im Allgemeinen nicht miteinander verglichen werden. Folgende Utensilien werden zur Durchführung des Versuchs benötigt (prEN 17542-3:2019):

- Bürette oder Mikropipette für die Dosierung der Methylenblaulösung in Mengen von 10 ml, 5 ml, 2 ml und zur Bestimmung der gesamten Methylenblau-menge mit einer Genauigkeit von ± 1 ml
- Weißes Filtrierpapier (95 ± 5 g/m²) für quantitative Analysen, frei von Asche ($< 0,010$ %), mit einer Dicke von $0,20 \pm 0,02$ mm; Filtrationszeit: 75 ± 10 s; Porengröße: 8 ± 5 μ m
- Glasstab mit einer Länge von 300 mm und einem Durchmesser von 8 ± 1 mm
- Flügelrührwerk mit einer Umdrehungszahl von 400 ± 40 bis 600 ± 60 Umdrehungen pro Minute und drei oder vier Flügeln mit einem Durchmesser von 75 ± 5 mm

- Waage mit einer Genauigkeit von 0,2 % der abzuwiegenden Masse
- Stoppuhr, ablesbar auf 1 s
- Analysensiebe mit den Maschenweiten 0,063 mm, 5 mm und 50 mm
- Messbecher aus Glas oder Kunststoff mit einem Fassungsvermögen von mindestens 3000 ml und einem Innendurchmesser von 155 ± 10 mm
- Flasche bzw. Behälter, vorzugsweise aus getöntem Glas, mit einem Fassungsvermögen von 1000 ml
- Thermometer, ablesbar auf 1 °C
- Exsikkator
- Methylenblaupulver mit einer Reinheit $\geq 98,5$ %
- Bodenmechanische Standard-Laboraüstung (z.B. Trockenschrank, Behälter, etc.)

Aufgrund voneinander abweichenden Angaben für die Umdrehungszahl des Rührwerks wurden jene Werte angegeben, welche auch in ÖNORM EN 933-9:2013 verwendet werden.

A 3.1 Versuchsdurchführung nach prEN 17542-3:2019

Die Bestimmung des Wassergehalts im Rahmen dieses Versuchs erfolgt nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2015, jene der Korngrößenverteilung nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2017.

A 3.1.1 Vorbereitung der Methylenblaulösung

Zuerst muss der Wassergehalt des Methylenblaupulvers bestimmt werden. Dazu werden ca. 5 g des Pulvers auf zwei Dezimalstellen genau abgewogen und bis zur Massenkonstanz (mindestens zwei Stunden) bei 105 ± 5 °C getrocknet. Danach kann die Schale bzw. der Behälter mit dem Pulver im Exsikkator abkühlen, bevor die Trockenmasse durch Abwiegen bestimmt wird. Der Wassergehalt W_b berechnet sich aus der Masse des Wassers bezogen auf die Masse des getrockneten Methylenblaupulvers (prEN 17542-3:2019):

$$W_b = \frac{M_h - M_g}{M_g} \quad (9)$$

W_b	[%]	Wassergehalt des Methylenblaupulvers
M_h	[g]	Masse des (feuchten) Methylenblaupulvers
M_g	[g]	Masse des getrockneten Methylenblaupulvers

Das verwendete Methylenblaupulver soll nicht für den eigentlichen Versuch wiederverwendet werden, da sich die Struktur des Pulvers bei der Trocknung verändern kann. Der Wassergehalt muss für jede Versuchsreihe neu bestimmt werden. (prEN 17542-3:2019)

Im Anschluss wird eine Trockenmasse von $10 \pm 0,01$ g entnommen; das bedeutet, eine tatsächliche Masse von $10 \times (1 + W_b) \pm 0,01$ g. Des Weiteren werden 500-700 ml demineralisiertes Wasser (oder destilliertes Wasser, im Folgenden wird aber Ersteres verwendet) auf maximal 50 °C in einem Messbecher erwärmt. Danach wird unter ständigem Rühren das Methylenblaupulver langsam hinzugegeben, bis es vollständig im Wasser gelöst ist. Diese Lösung wird in eine Flasche (vorzugsweise getöntes Glas) mit einem Fassungsvermögen von 1000 ± 5 ml geleert. Mithilfe von demineralisiertem Wasser können mögliche Rückstände entfernt werden, sodass diese nicht verloren gehen. Die Flasche wird daraufhin bis zur 1000 ml-Markierung unter Beachtung der Wassertemperatur aufgefüllt. Diese muss im Normalfall (abhängig von der Kalibrierung) 20 ± 1 °C betragen. Die Flasche wird kräftig geschüttelt, um eine vollständige Auflösung des Methylenblaupulvers sicherstellen zu können. Auf der Flasche mit der fertig abgemischten Methylenblaulösung müssen neben dem Inhalt auch das Herstellungsdatum sowie das Verbrauchsdatum vermerkt werden. Letzteres beträgt, bei lichtgeschützter Lagerung, ein Monat nach Herstellung. (prEN 17542-3:2019)

A 3.1.2 Vorbereitung des Probenmaterials

Die Menge des Probenmaterials richtet sich nach dem Größtkorn: wenn dieses größer als 50 mm ist, ist eine Masse von 10 kg der 0/50 mm-Kornfraktion erforderlich. Wenn D_{\max} zwischen 5 und 50 mm ist, muss die Masse größer als $200 \times D_{\max}$ sein, wobei die Masse in Gramm und D_{\max} in Millimetern einzusetzen sind. Das Probenmaterial ist auf eine 0/5 mm-Kornfraktion abzusieben (Trockensiebung). Wenn durch visuelle Begutachtung festgestellt wird, dass Bodenpartikel ($D_{\max} < 5$ mm) nach dieser Siebung zusammenkleben, muss dieses Material (Siebrückstand im 5 mm-Sieb) einer Waschung unterzogen werden. Zuvor kann jedoch noch versucht werden, mittels Bürste die Körner voneinander zu lösen. Die Waschung setzt sich aus folgenden Schritten zusammen (prEN 17542-3:2019):

- Einweichen der Bodenpartikel mit $D_{\max} > 5 \text{ mm}$
- Siebung durch ein 5 mm-Analysesieb, mithilfe einer Bürste (nicht metallisch) und möglichst wenig zusätzlichem Wasser (wenn möglich nur zum Ausspülen des Siebs verwenden)
- Absaugen bzw. Abgießen des überschüssigen Wassers
- Trocknung des Materials bei max. 50 °C, jedoch nicht bis zur Massenkonzanz
- Durchmischung des Materials der Trocken- und Nasssiebung (0/5 mm-Kornfraktion)

Im Anschluss erfolgt die Bestimmung des Gewichtanteils C (%) der 0/5 mm-Kornfraktion von der Gesamtmenge bzw. der 0/50 mm-Kornfraktion, wenn $D_{\max} > 50 \text{ mm}$ ist. Nach Homogenisierung der Probenmenge (0/5 mm-Kornfraktion) können drei Teilproben mit annähernd gleicher Masse gewonnen werden. Bei mittelmäßig bis sehr tonhaltigen Proben ist eine Masse von 30-60 g erforderlich, ansonsten mehr als 60 g. Die erste Probe dient der Bestimmung des Wassergehalts W , das Material kann danach entsorgt werden. Die zweite Teilprobe mit der Feuchtmasse M_0 dient der eigentlichen Bestimmung des Methylenblau-Werts. Bevor die Testung durchgeführt wird, muss die Trockenmasse M_1 berechnet werden. Die dritte Teilprobe wird als Reserve zurückgehalten, im Falle einer notwendigen Wiederholung des Tests. (prEN 17542-3:2019)

$$M_1 = \frac{M_0}{1 + W} \quad (10)$$

M_1	[g]	Trockenmasse der zweiten Teilprobe
M_0	[g]	Feuchtmasse der zweiten Teilprobe
W	[%]	Wassergehalt

A 3.1.3 Testprozedur

Die Boden-Wasser-Suspension wird hergestellt, indem $500 \pm 10 \text{ ml}$ demineralisiertes Wasser in den Messbecher gegeben werden (Fassungsvermögen 3000 ml) und das Probenmaterial unter ständigem händischem Rühren (z.B. mit einer Spatel) hinzugegeben wird. Im Anschluss wird das Rührwerk auf 600 ± 60 Umdrehungen pro Minute eingestellt und die Suspension mindestens fünf Minuten lang durchmischt. Dabei soll zwischen dem Flügelrad und dem Messbecher ein Abstand von ungefähr fünf Millimetern eingehalten werden. (prEN 17542-3:2019)

Die zuvor hergestellte Methylenblaulösung wird nochmals gründlich durchmischt, bevor sie in die Bürette gefüllt wird (alternativ: Mikropipette). Das Filtrierpapier wird beispielsweise auf einen Becher gelegt, sodass es möglichst wenig Kontakt hat und dieser die Ausbreitung der im Anschluss aufgebrauchten Boden-Wasser-Methylenblau-Suspension nicht behindert. (prEN 17542-3:2019)

Nach dem Mischvorgang werden 5-10 ml der Methylenblaulösung in den Messbecher hinzugegeben und das Rührwerk auf 400 ± 40 Umdrehungen pro Minute eingestellt. Dieser Mischvorgang muss 60 ± 10 Sekunden dauern. Danach erfolgt der erste Färbetest. Dazu wird ein Tropfen der Suspension mit Hilfe des Glasstabs auf das Filtrierpapier aufgebracht, wobei der Durchmesser der Bodenablagerung 8-12 mm betragen soll. Der sich bildende „Fleck“ besteht im Zentrum der Aufbringung aus Bodenmaterial (dunkelblau), umgeben von einer farblosen, nassen Zone. Der Test verläuft positiv, wenn sich in der nassen Zone ein hellblauer, permanenter, ca. ein Millimeter starker Ring (Aureole) bildet. Da manche Tonminerale für die Adsorption eine bestimmte Zeit brauchen, kann es vorkommen, dass der hellblaue Ring wieder verschwindet. Deshalb wird in einem Zeitintervall von einer Minute dieser Test fünf Minuten lang fortgeführt, ohne Zugabe weiterer Methylenblaulösung. (prEN 17542-3:2019)

Bei negativem Ergebnis wird eine Menge von fünf Millilitern Methylenblaulösung zur Suspension hinzugegeben und diese eine Minute lang durchmischt, bevor ein weiterer Test durchgeführt werden kann. Diese Abfolge ist bis zum Erscheinen eines Rings durchzuführen. Wenn der Ring innerhalb der ersten vier Minuten verschwindet, werden weitere fünf Milliliter Methylenblaulösung beigegeben. Bei Verschwinden des hellblauen Rings in der fünften Minute, werden zwei Milliliter beigegeben. In jedem Fall muss der Test solange wiederholt werden, bis der hellblaue Ring zumindest fünf Minuten lang erkennbar ist. Die dabei verwendete Menge V an Methylenblaulösung muss auf einen Milliliter genau dokumentiert werden. Diese muss größer sein als 20 ml, andernfalls muss der Test mit einer größeren Probenmasse wiederholt werden. (prEN 17542-3:2019)

Wenn nach dem Leeren des Messzylinders über dem 0,063 mm-Sieb „farblose“ Bodenpartikel erkennbar sind, muss der Test mit der dritten Teilprobe wiederholt werden. Dabei kann entweder die Einwirkzeit der Boden-Wasser-Suspension erhöht oder durch andere Maßnahmen die Bildung solcher Partikel verhindert werden (z.B. durch Trocknung bei maximal 50 °C und manuellem Zerdrücken). Die benützten Behältnisse müssen gründlich ausgewaschen werden und sollten auch nur für diesen Versuch verwendet werden. (prEN 17542-3:2019)

A 3.1.4 Berechnung von V_{BS}

Das Endergebnis wird als Methylenblauwert V_{BS} bezeichnet und zeigt auf, wieviel Gramm Methylenblau pro 100 Gramm der 0/50 mm-Kornfraktion adsorbiert werden (auf zwei Dezimalstellen genau). Nachfolgende Formeln werden dafür benötigt (prEN 17542-3:2019):

$$V_{B\ 0/5} = \frac{B}{M_1} * 100 \quad (11)$$

$$V_{BS} = \frac{B}{M_1} * C * 100 \quad (12)$$

$V_{B\ 0/5}$	[g/100 g]	Methylenblauwert der 0/5 mm Kornfraktion
B	[g]	Gesamtmenge des beigegebenen Methylenblaupulvers, berechnet aus $B = V \times 0,01$
V	[ml]	Menge an beigegebener Methylenblaulösung
M_1	[g]	Probenmasse in Gramm
V_{BS}	[g/100 g]	Methylenblauwert der 0/50 mm Kornfraktion
C	[Mass-%]	Siebdurchgang bei 5 mm als prozentualer Anteil der 0/50 mm Kornfraktion

Um keine Missverständnisse aufkommen zu lassen, sollte bei Angabe der benötigten Methylenblaumenge pro Kilogramm das Ergebnis als M_{BS} -Wert bezeichnet werden. M_{BS} ist somit $10 \times V_{BS}$. (prEN 17542-3:2019)

A 3.2 Zusammenstellung der Ergebnisse

Im Versuchsbericht sind unter anderem folgende Punkte zu erwähnen (vgl. prEN 17542-3:2019):

- Versuchsbezeichnung und dazugehörige Norm (prEN 17542-3:2019)
- Probennummer bzw. -bezeichnung zur eindeutigen Identifikation der getesteten Probe (z.B. Bohrlochnummer, Tiefe, Art der Probennahme, etc.)
- Datum
- Gewichtsanteil der 0/5 mm-Kornfraktion an der 0/50 mm-Kornfraktion
- Wassergehalt der ersten Teilprobe

-
- f. Feuchtmasse und berechnete Trockenmasse der zweiten Teilprobe
 - g. Gesamtmenge an beigegebener Methylenblaulösung in Milliliter
 - h. Gesamtmasse an beigegebenem Methylenblaupulver in Gramm
 - i. V_{BS} -Wert
 - j. Mögliche Abweichungen von der Versuchsdurchführung nach Norm und allgemeine Erläuterungen, welche zur Interpretation der Versuchsergebnisse von Relevanz sind
 - k. Verwendetes Filtrierpapier

A 4 Versuchsprotokolle

Auf den folgenden Seiten werden die Versuchsprotokolle dargestellt. Da es sich dabei um eigenständige Dokumente handelt, endet hier die Seitennummerierung.

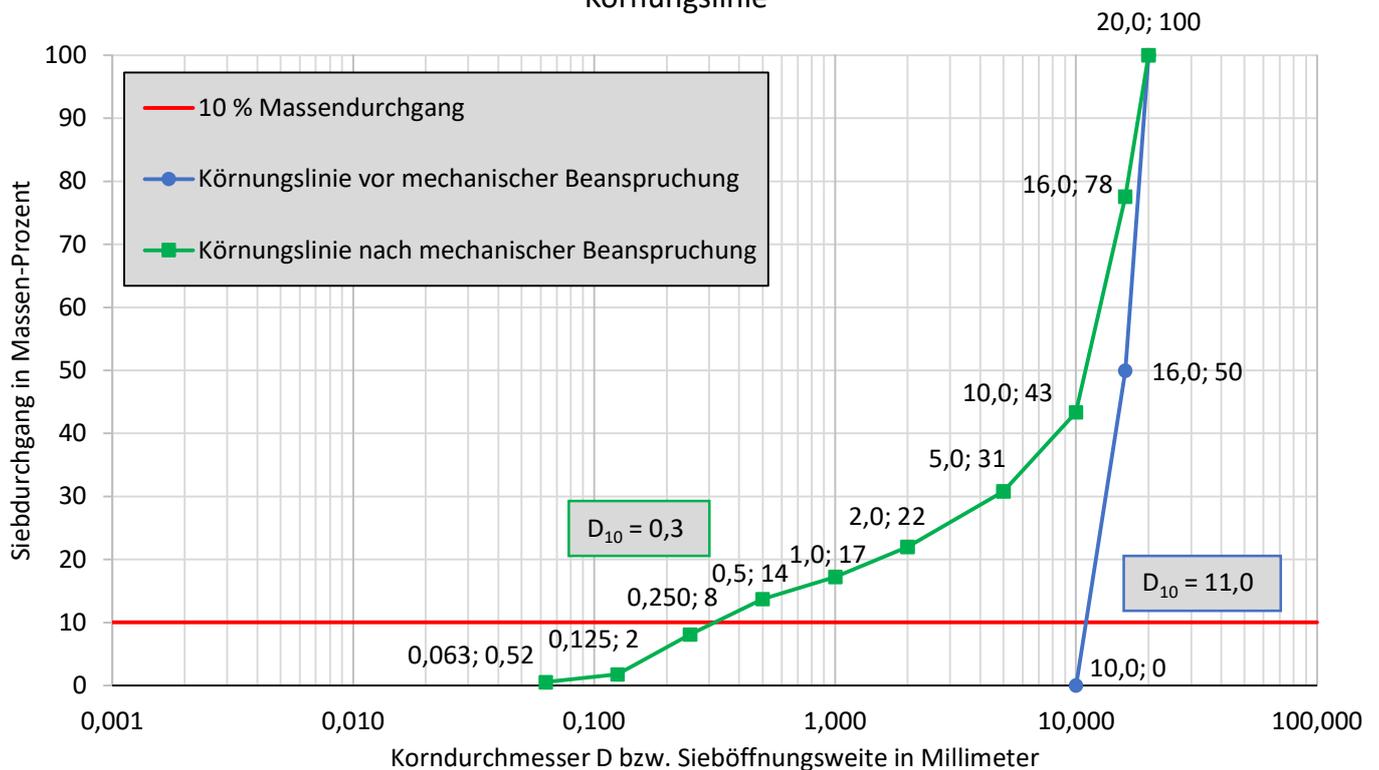


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_1	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	78	43	31	22	17	14	8	2	0,5

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 34,7$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

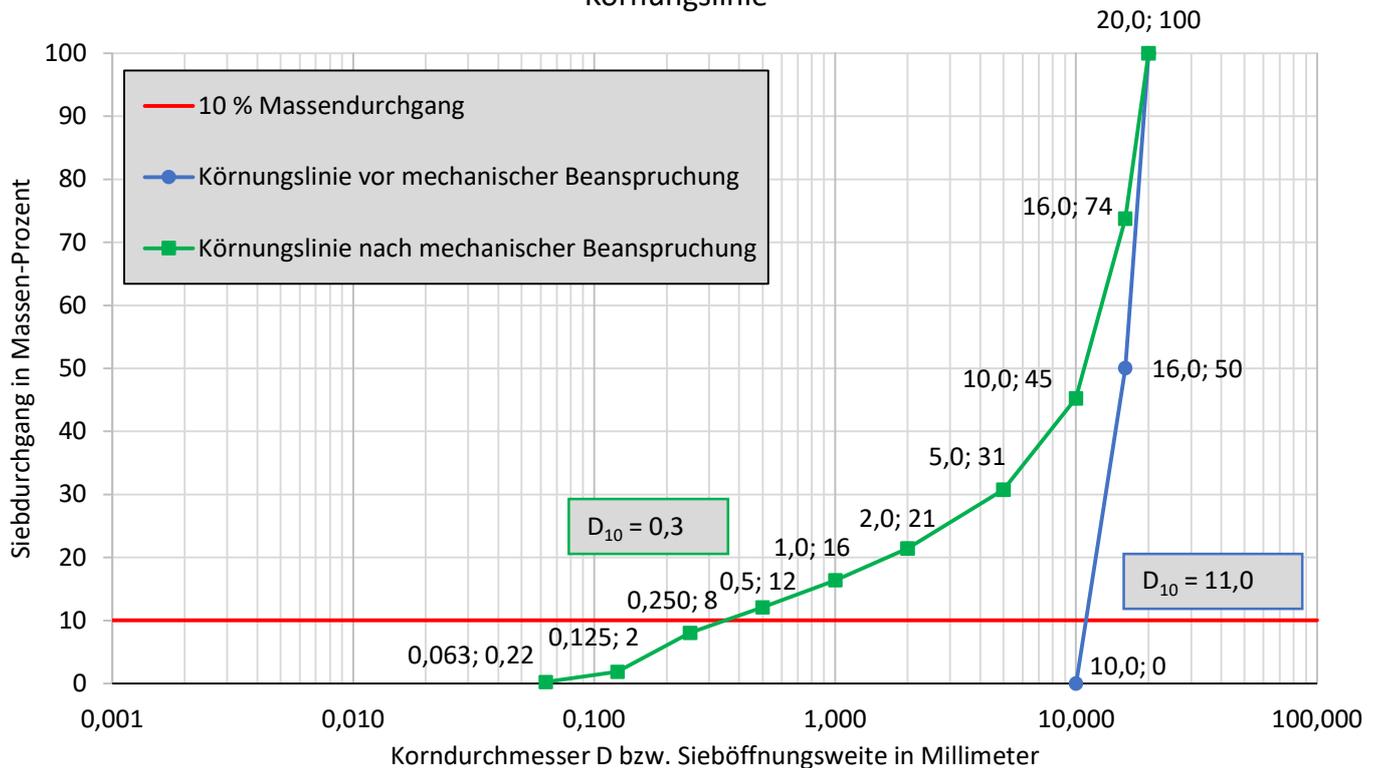


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_2	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	74	45	31	21	16	12	8	2	0,2

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 31,4$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

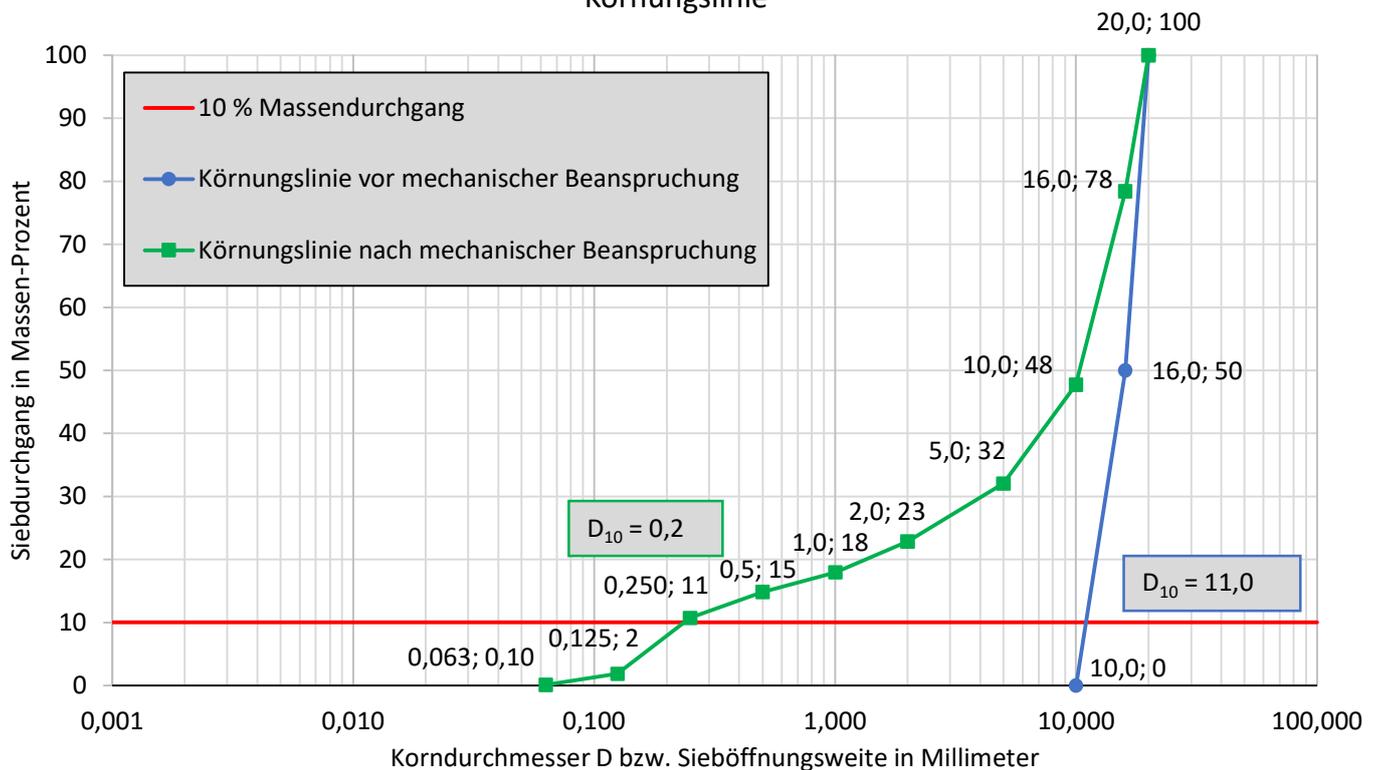


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_3	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	78	48	32	23	18	15	11	2	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 46,5$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

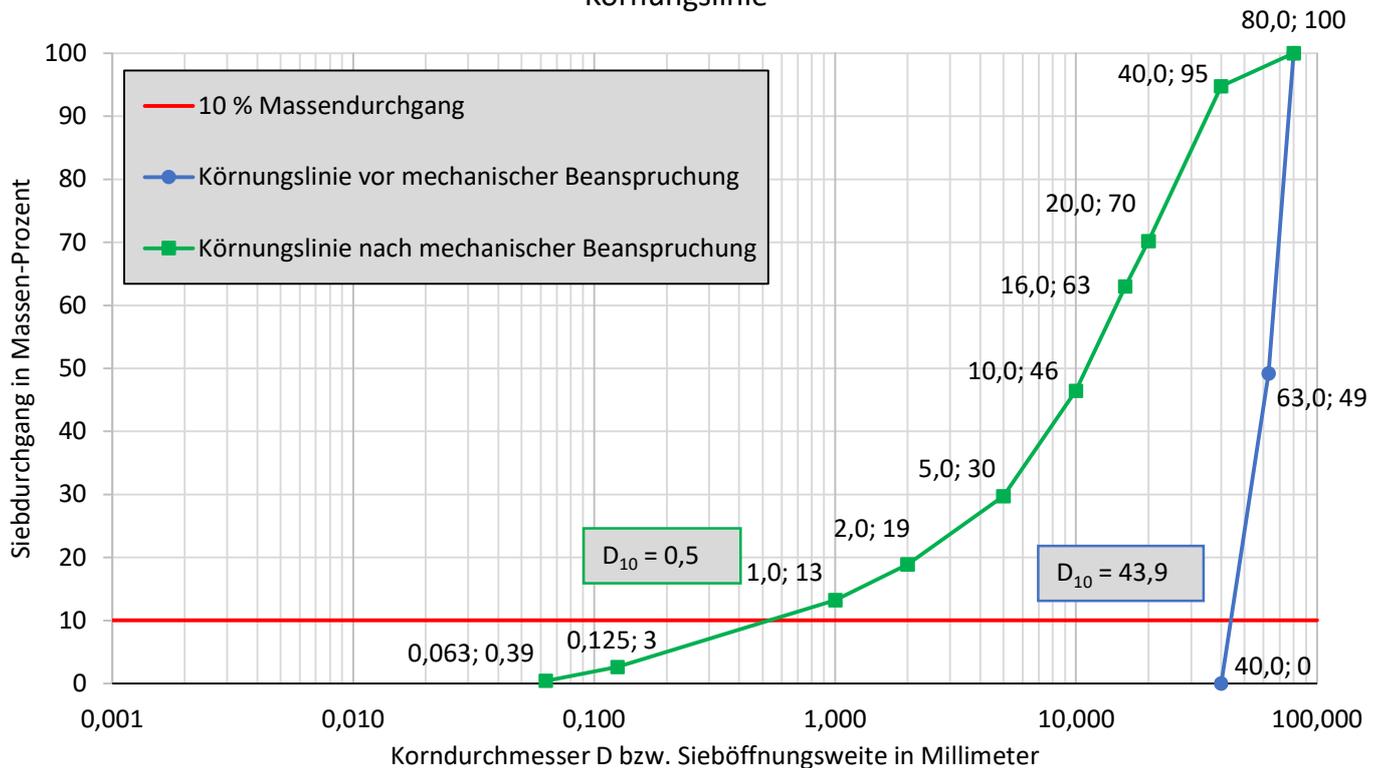


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_1	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	49	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	95	70	63	46	30	19	13	3	0,4

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 81,9$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

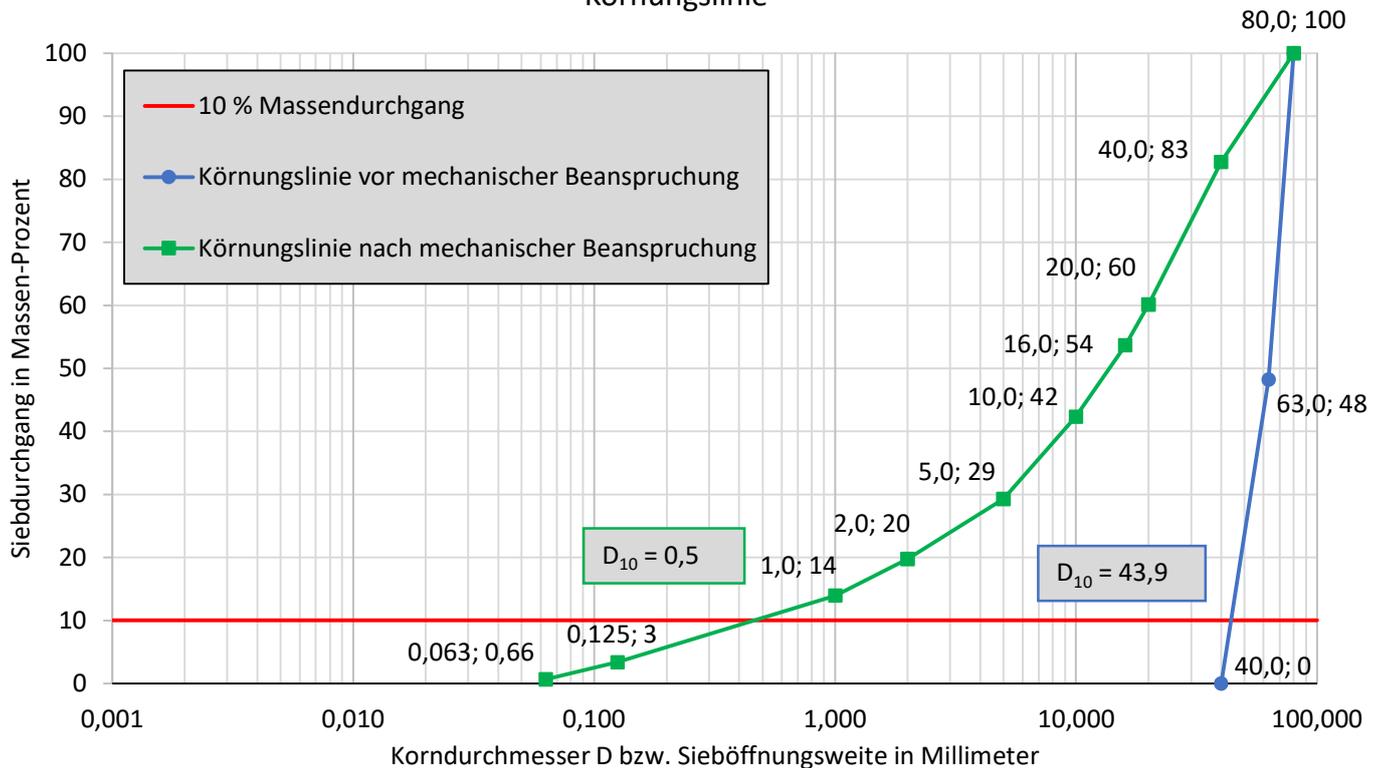


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_2	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	48	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	83	60	54	42	29	20	14	3	0,7

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 95,2$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

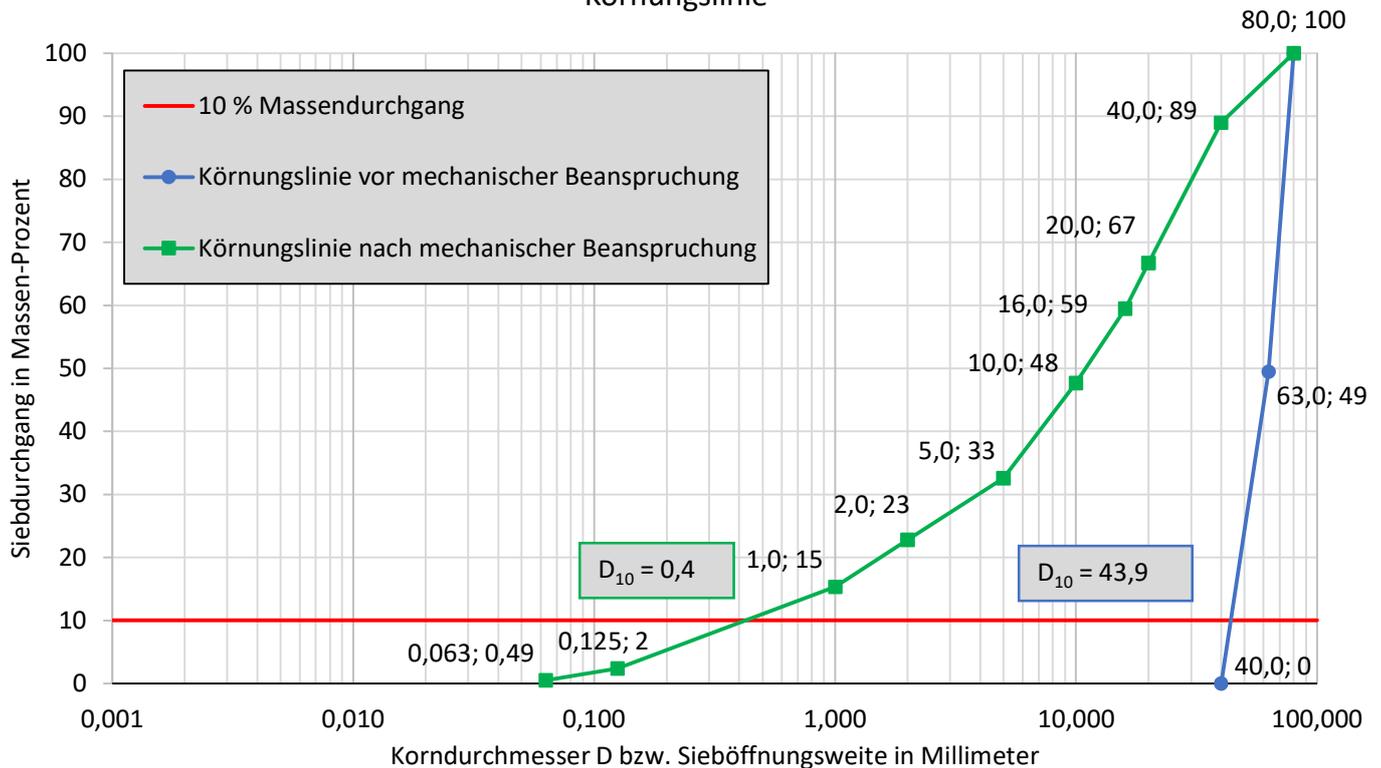


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Töpferton (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_3	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 06.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	49	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	89	67	59	48	33	23	15	2	0,5

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 103,3$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

KORNGRÖSSENVERTEILUNG

ANGABEN ZUR PROBE

Projekt: Masterarbeit
Projekt Nr.: 1
Auftraggeber: J.M.
Bezeichnung: Schlier

Labornummer: 21537
Tiefe: -
Bearbeiter: J.M.
Datum: 18.07.20 - 23.07.20

ZUSAMMENSTELLUNG DER SIEBDURCHGÄNGE

Siebanalyse

\varnothing [mm]	%
2,0	100,0
1,0	99,9
0,5000	99,6
0,2500	99,3
0,1250	98,8

Schlämmanalyse

\varnothing [mm]	%
0,0558	92,8
0,0398	91,0
0,0284	89,3
0,0182	87,2
0,0106	84,8
0,0063	79,9
0,0037	69,8
0,0024	59,3
0,0013	44,2

Auftraggeber
J.M.

Projekt
Masterarbeit

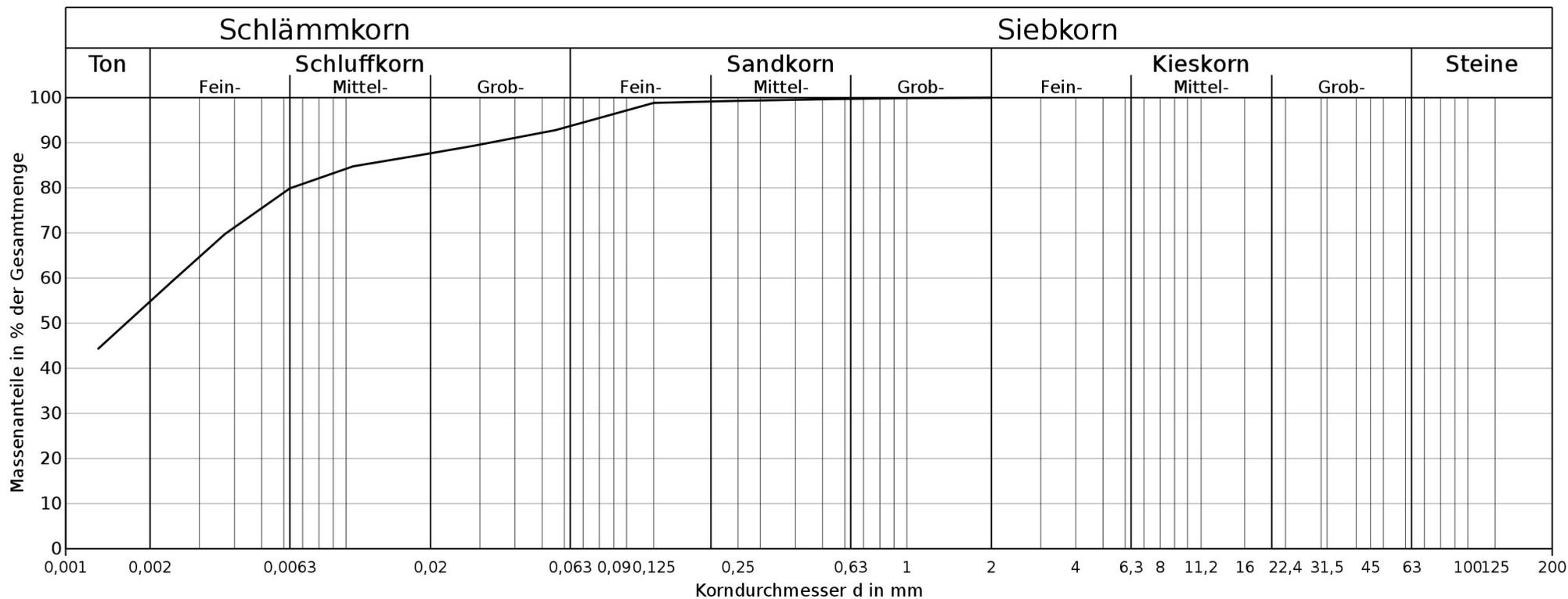
Proj. Nr. 1
Bezeichnung Schlier

Tiefe
-

Bearb.
J.M.

Datum
18.07.20 - 23.07.20

KÖRNUINGSLINIE



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner ϕ [mm]	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Anteile größer ϕ [mm]	Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
21537	—	-	54,8	38,9	6,3	-	-	-	sa' st Cl	<0,002	<0,002	0,0025mm	-	-

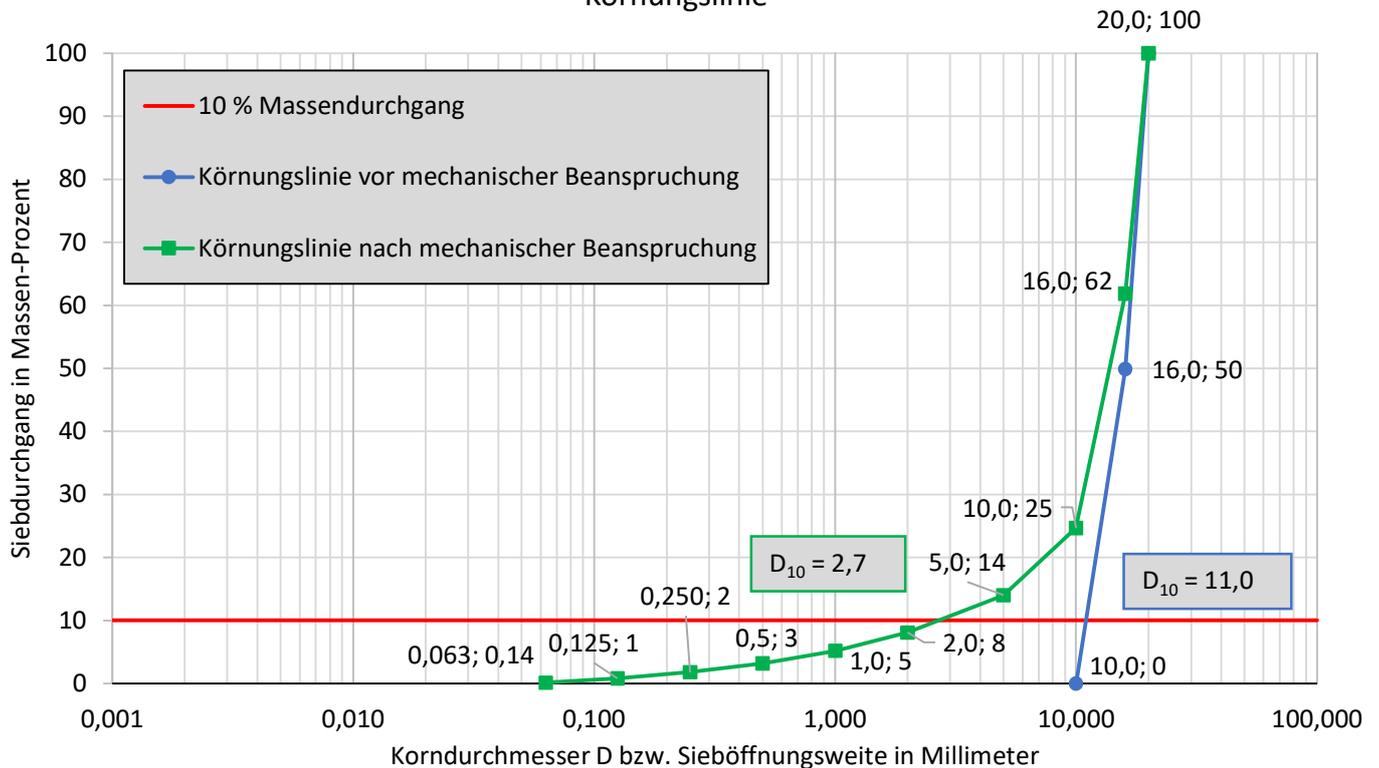


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_4	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	62	25	14	8	5	3	2	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,1$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

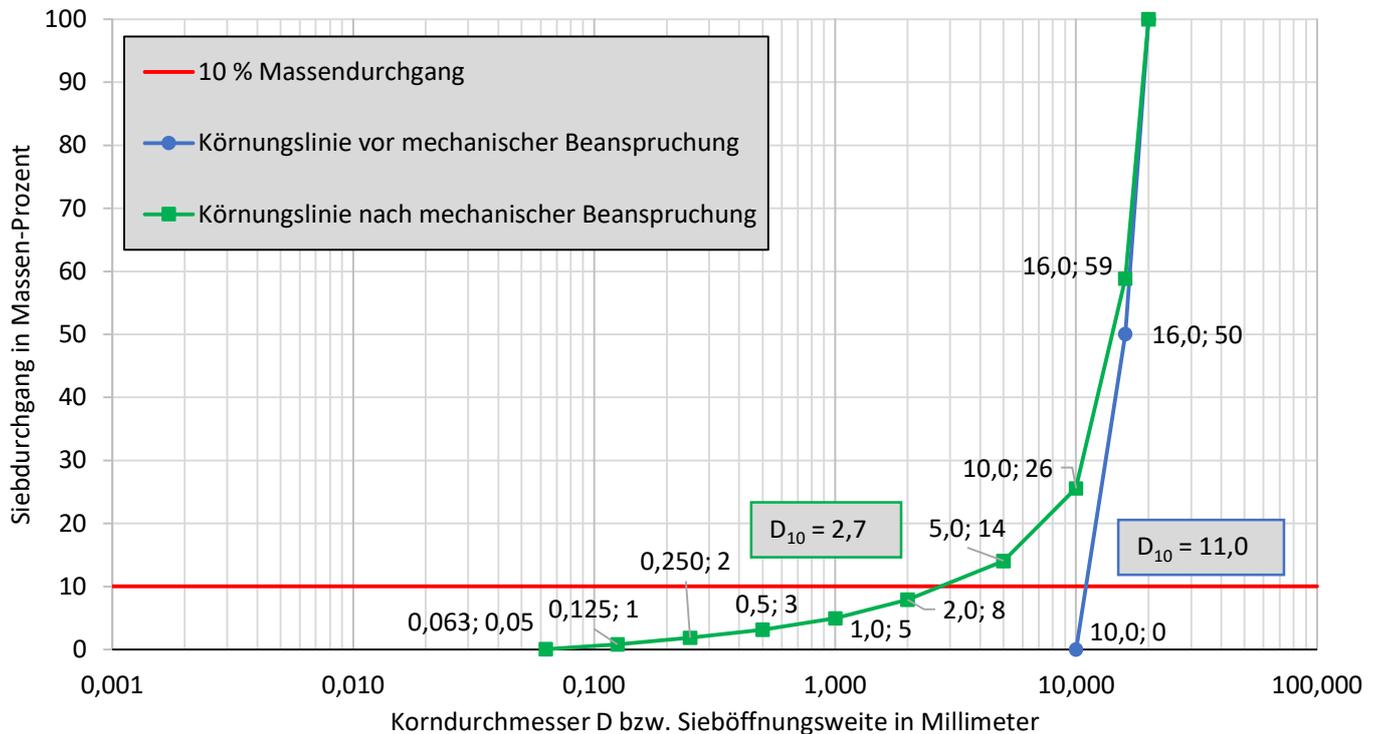


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_5	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	59	26	14	8	5	3	2	1	0,0

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,0$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

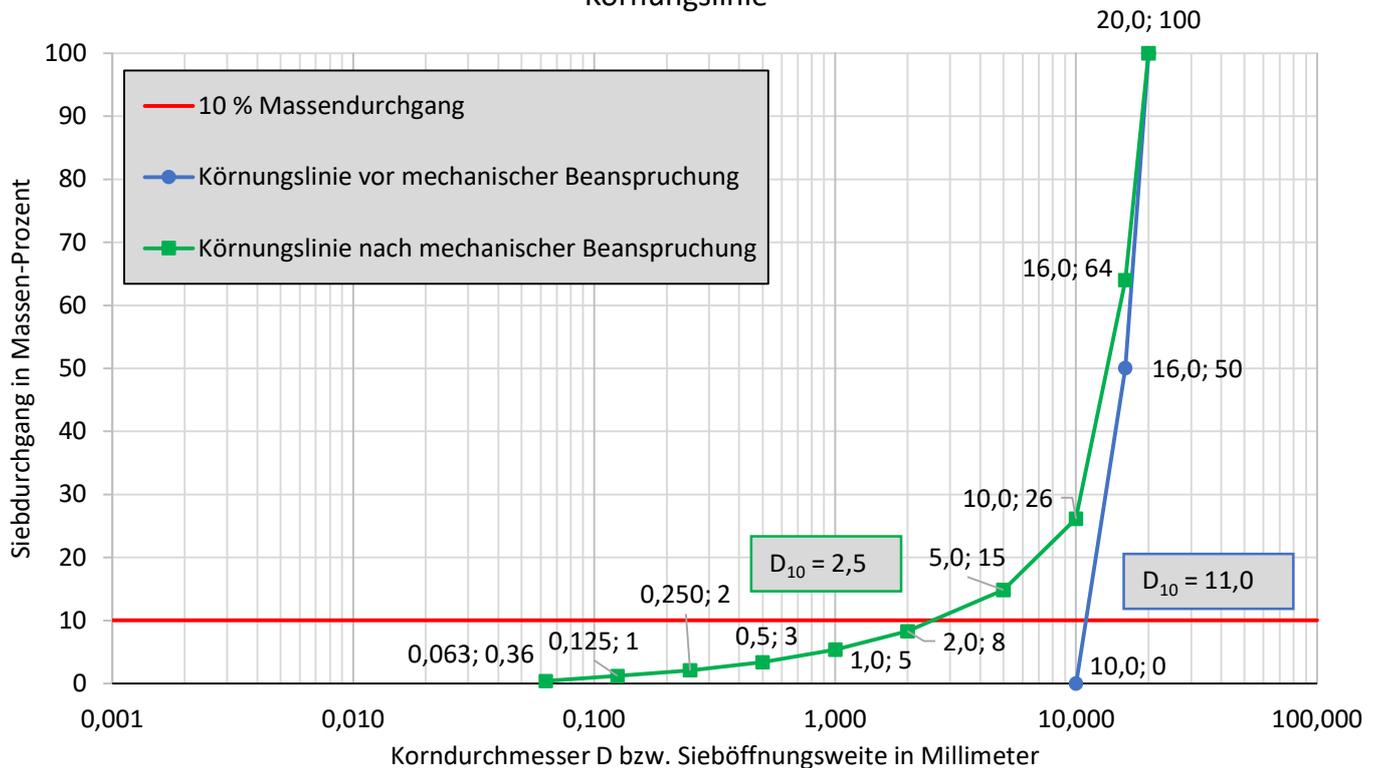


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_6	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	64	26	15	8	5	3	2	1	0,4

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,3$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

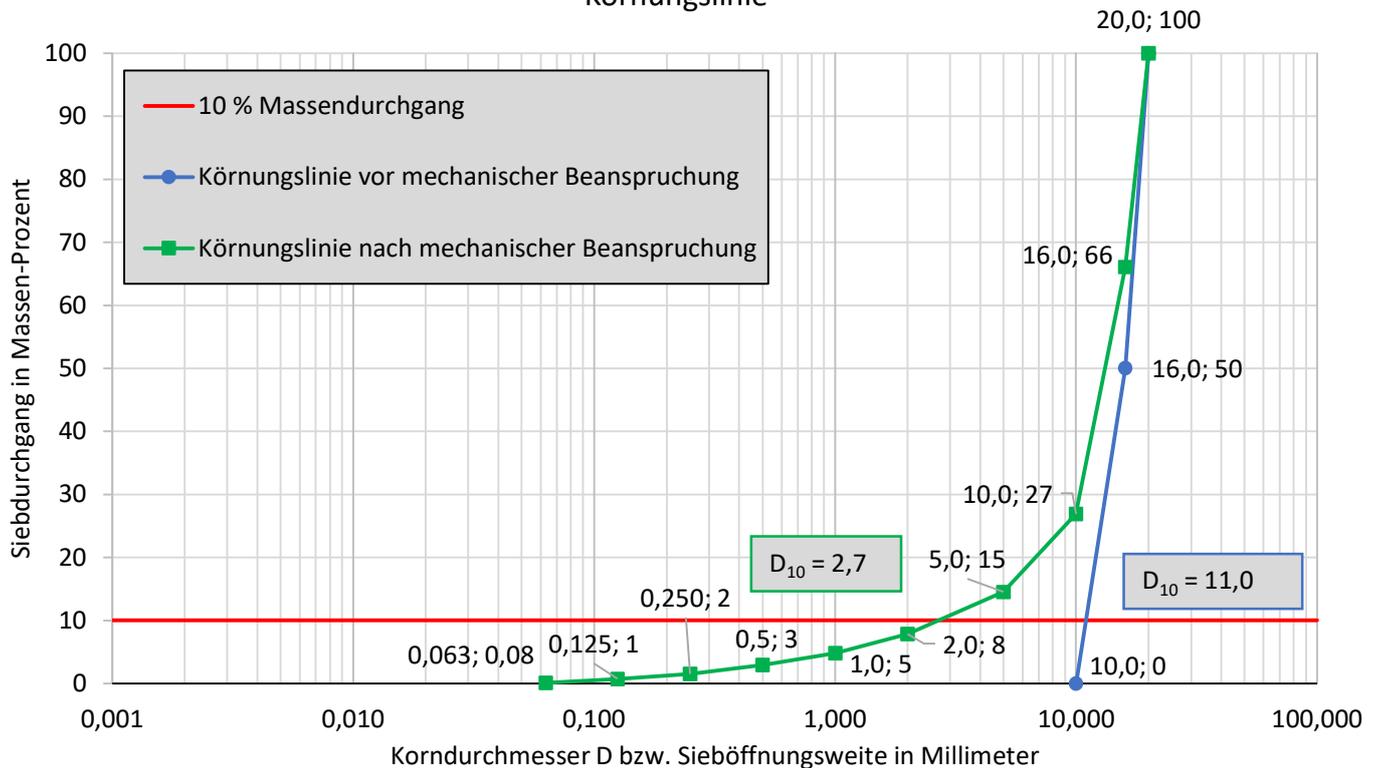


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_7	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	66	27	15	8	5	3	2	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,1$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

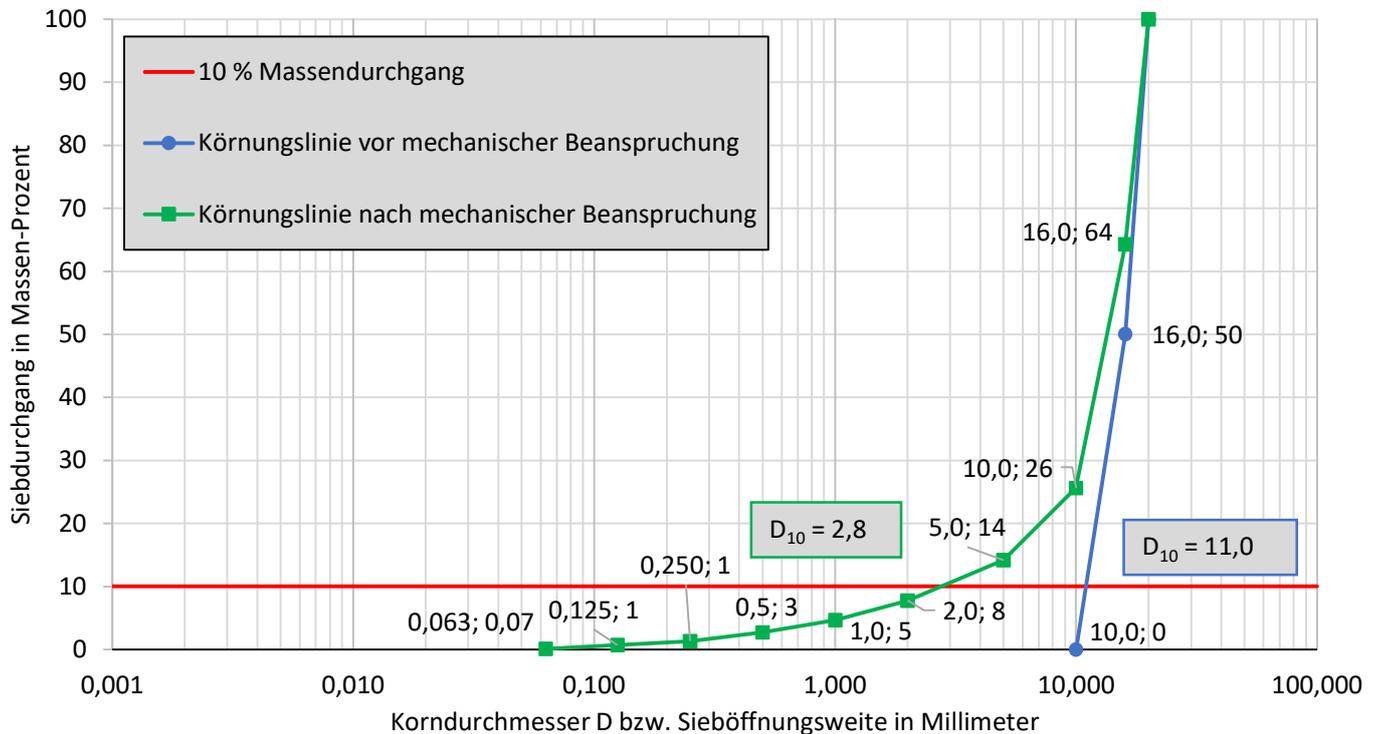


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_8	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	64	26	14	8	5	3	1	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,0$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

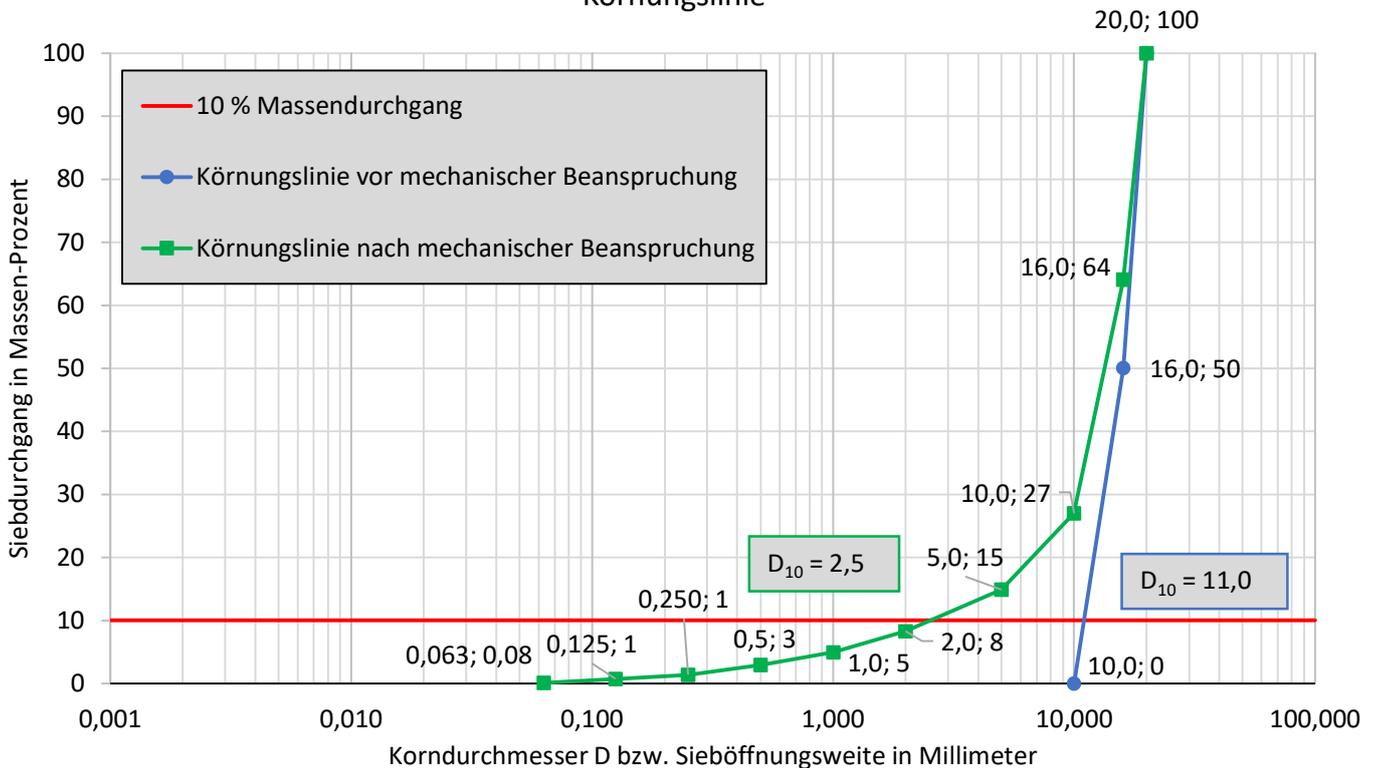


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_9	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	64	27	15	8	5	3	1	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,3$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

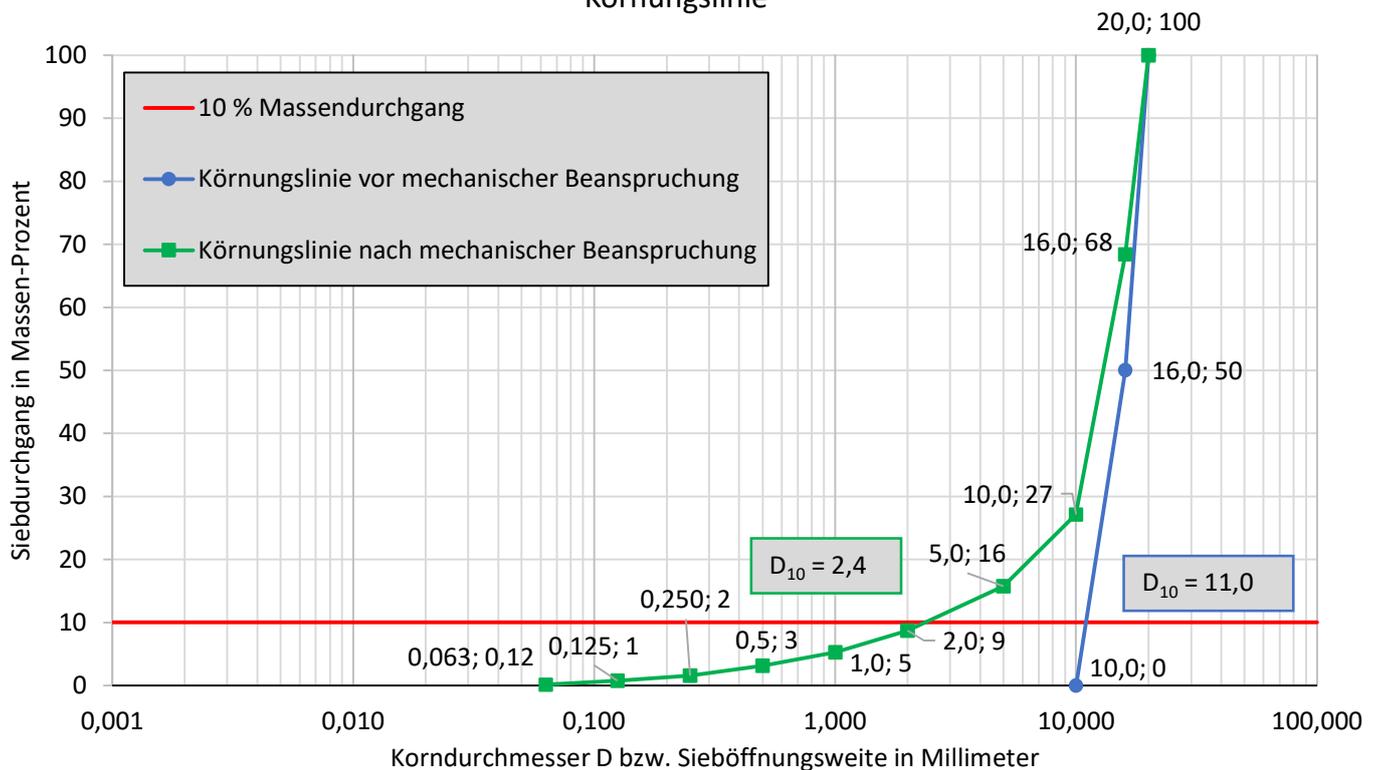


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_10	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	68	27	16	9	5	3	2	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,6$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

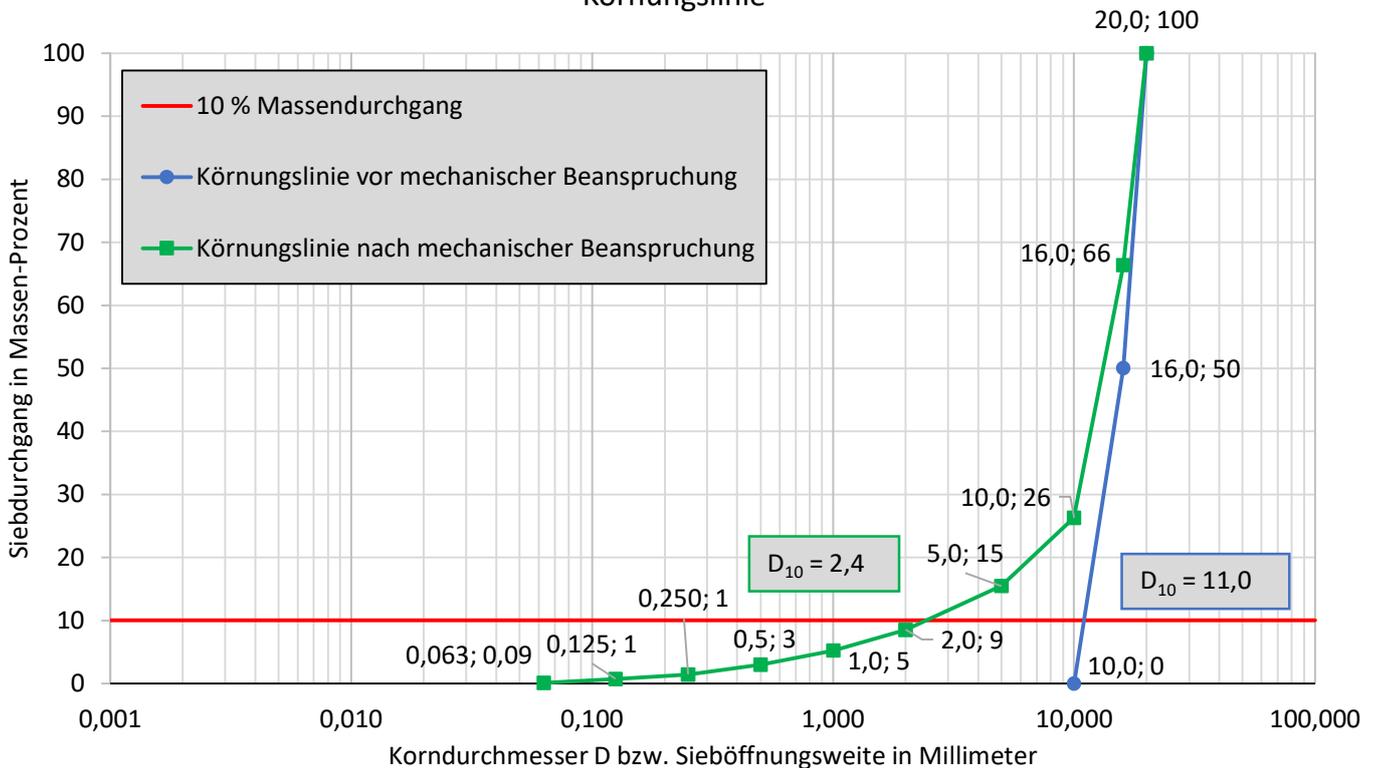


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_11	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	66	26	15	9	5	3	1	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,5$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

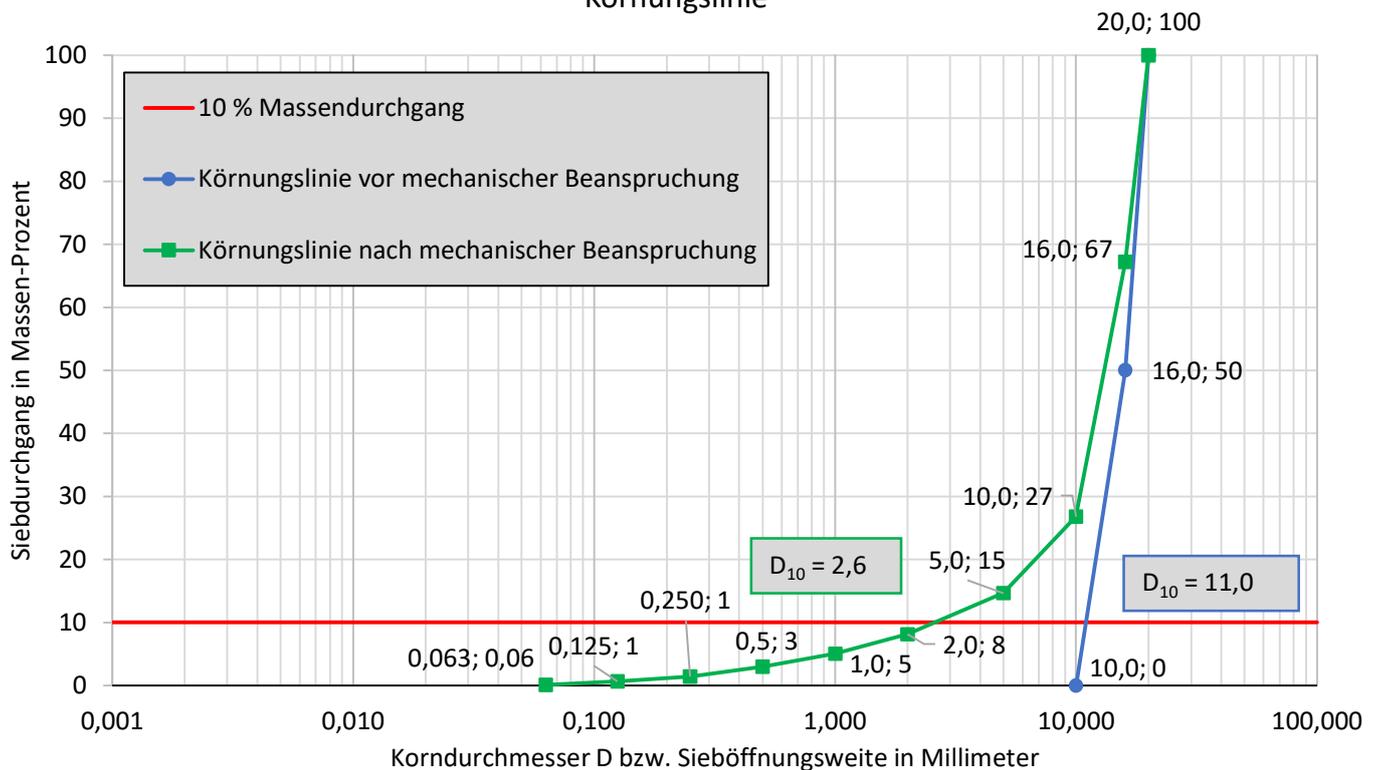


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_10/20_12	LABORNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.
			DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,250	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	67	27	15	8	5	3	1	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 4,2$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

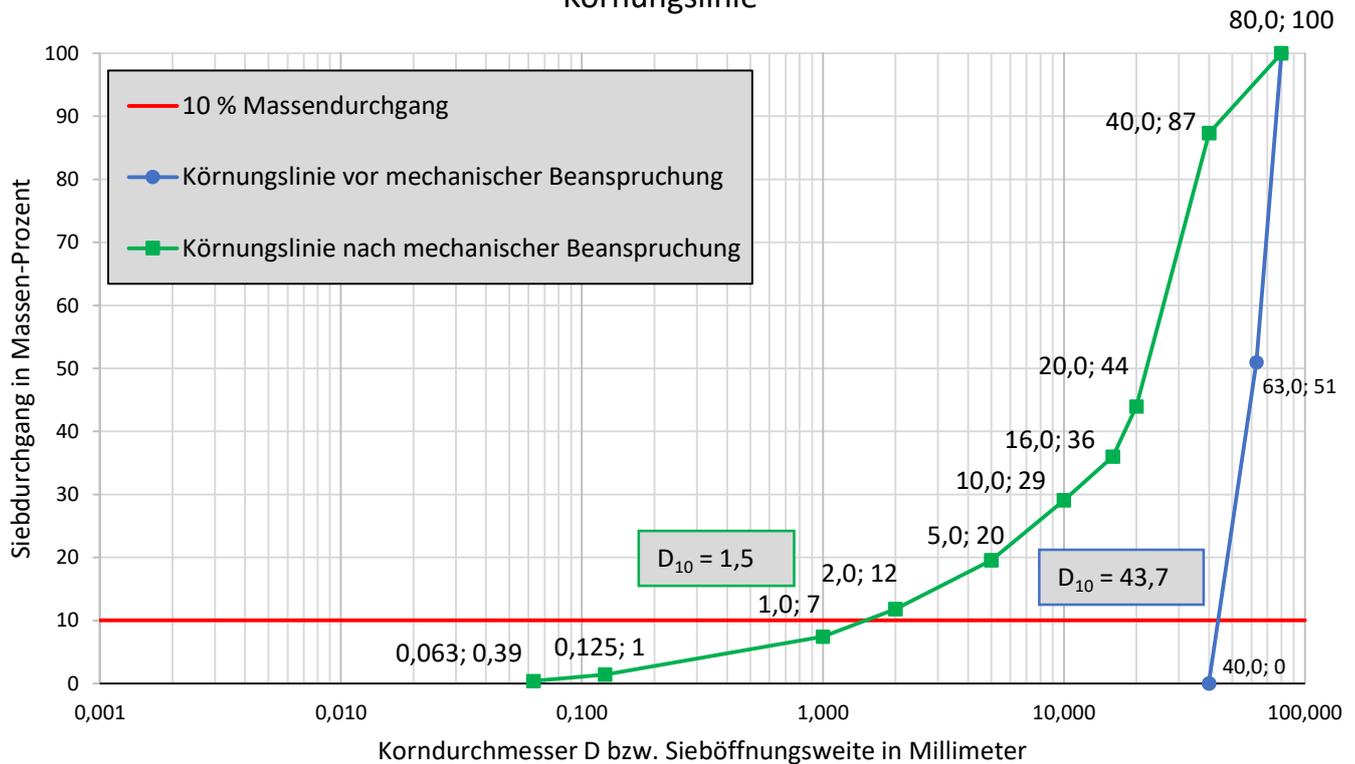


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_5	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	51	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	87	44	36	29	20	12	7	1	0,4

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 29,0$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

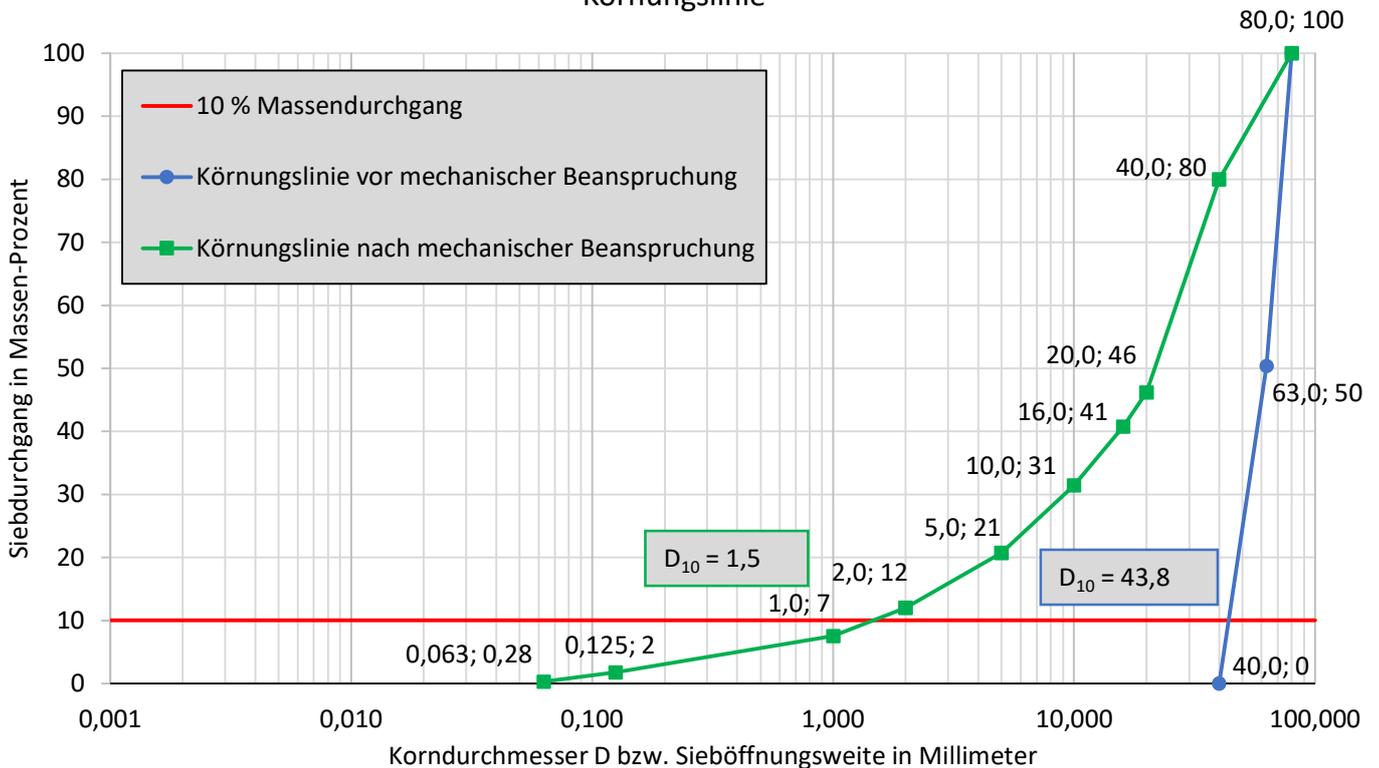


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_6	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	80	46	41	31	21	12	7	2	0,3

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 29,7$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

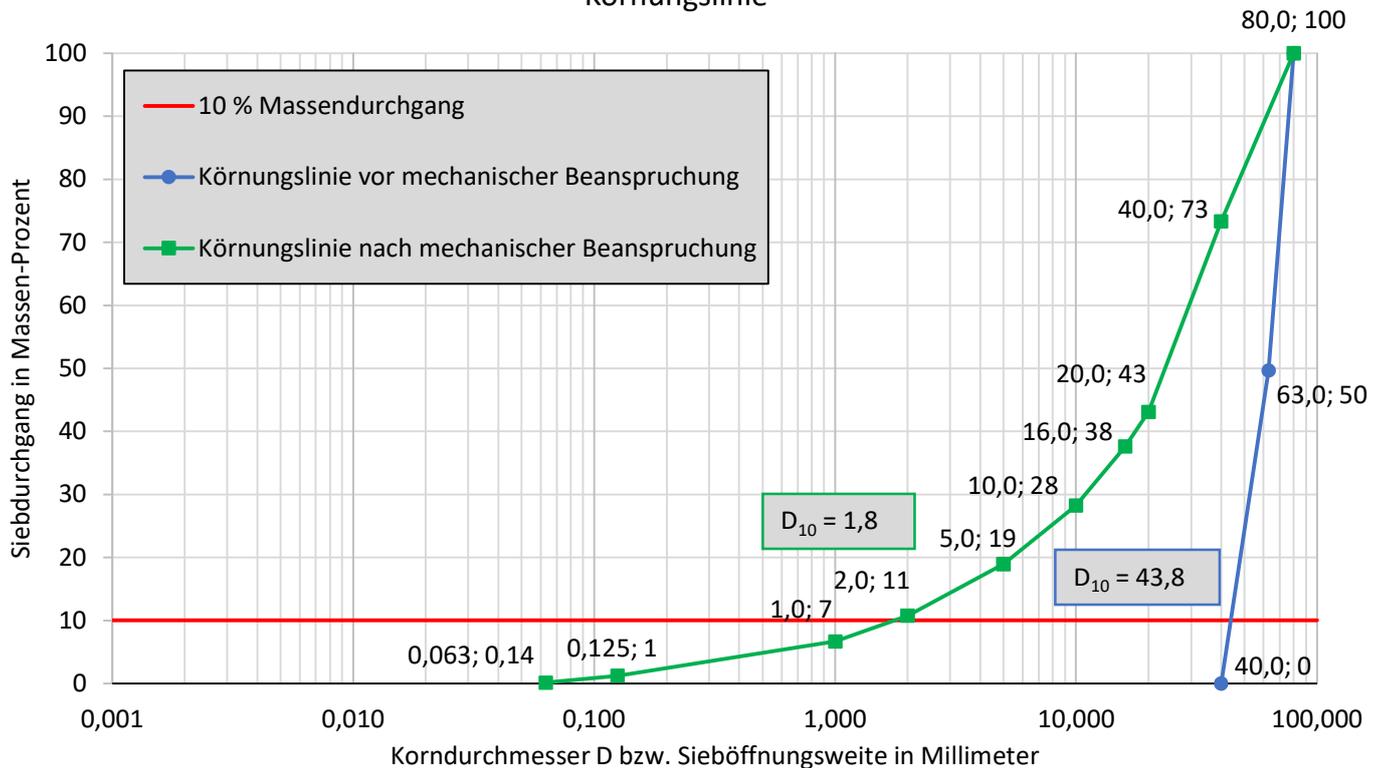


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_7	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	73	43	38	28	19	11	7	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 24,8$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

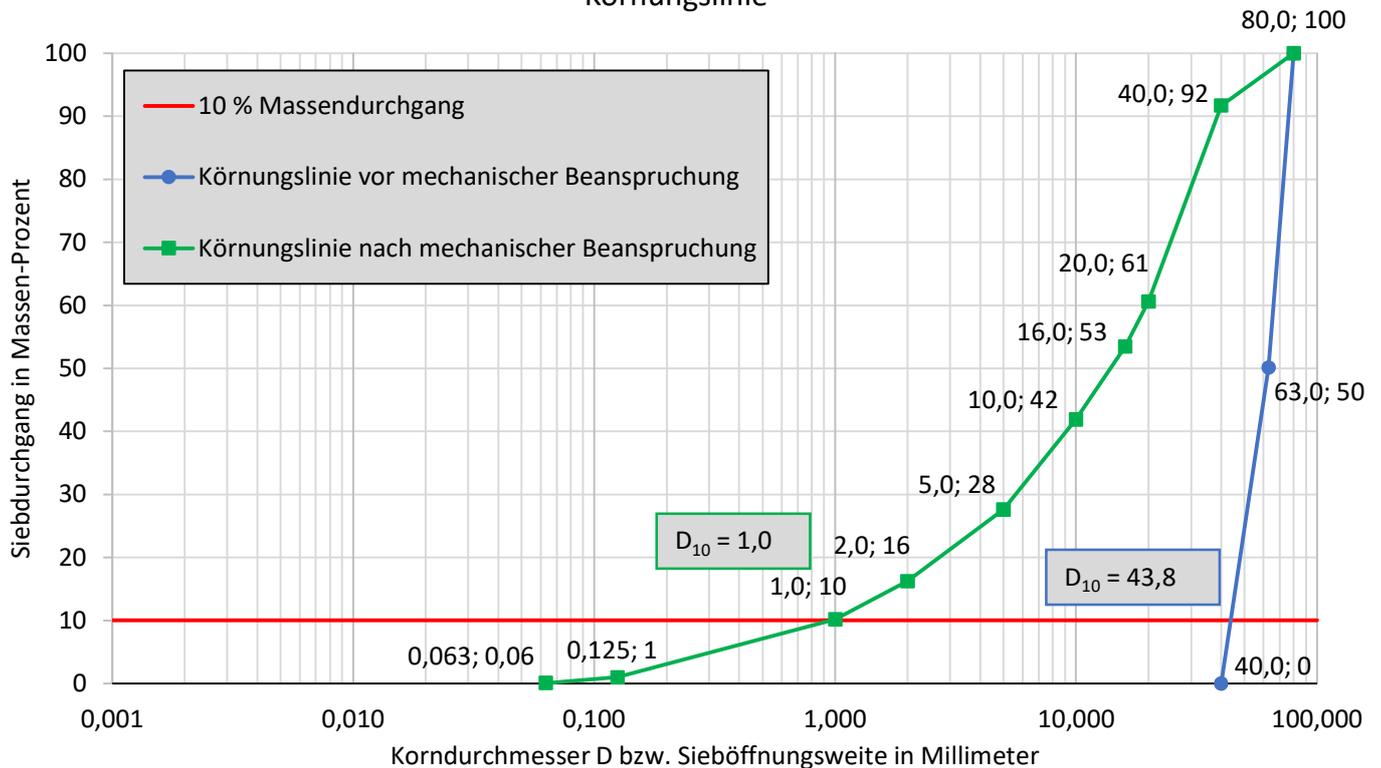


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_8	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	92	61	53	42	28	16	10	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 45,7$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

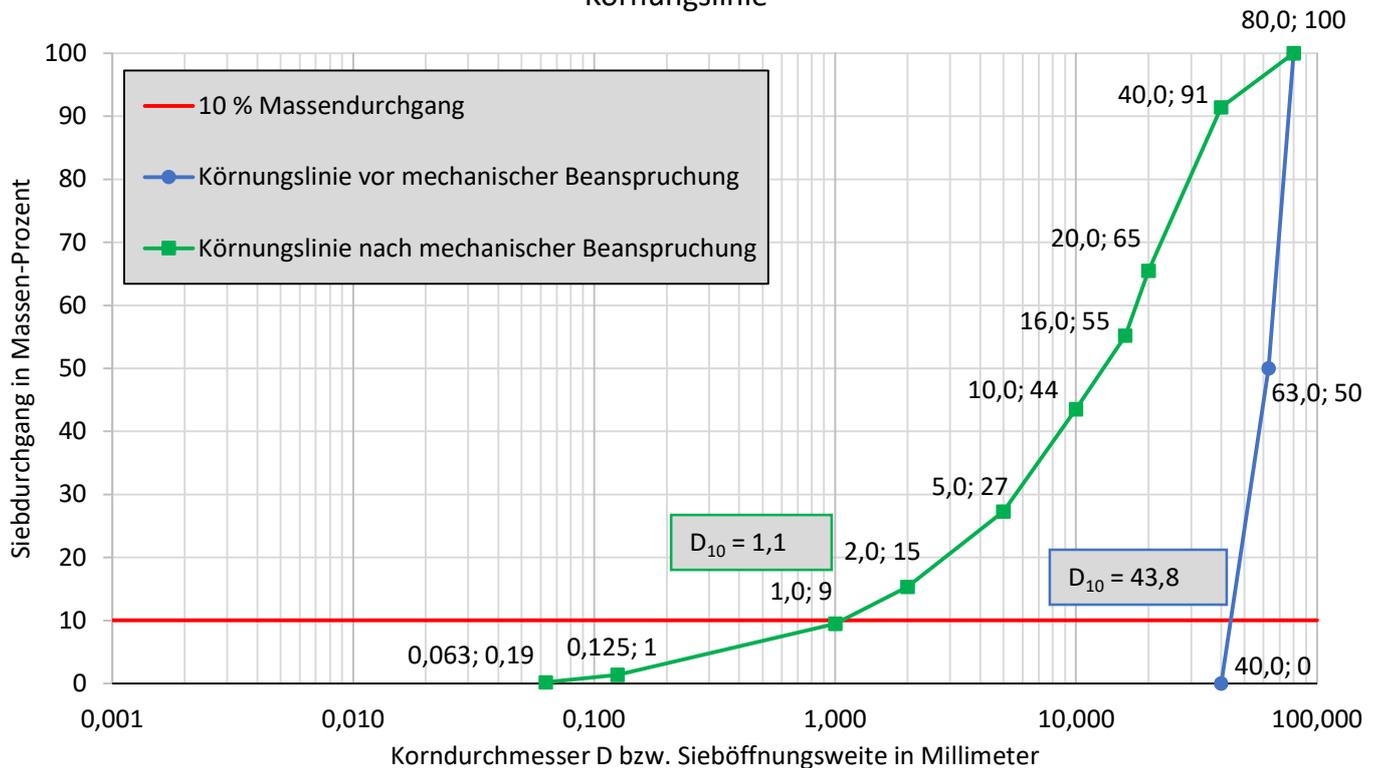


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_9	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	91	65	55	44	27	15	9	1	0,2

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 41,0$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

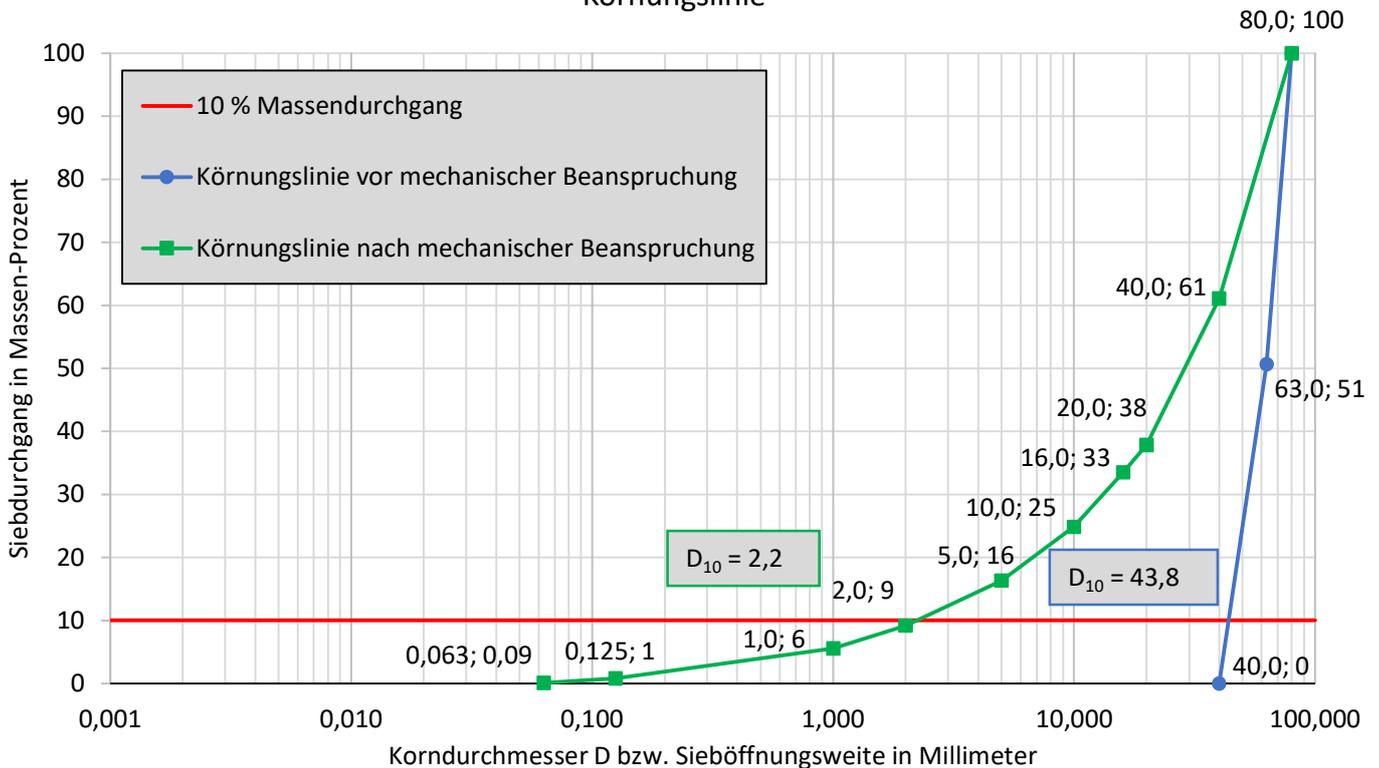


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_10	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	51	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	61	38	33	25	16	9	6	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2	$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 19,7$
Klassifizierung nach EN 16907-2	-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

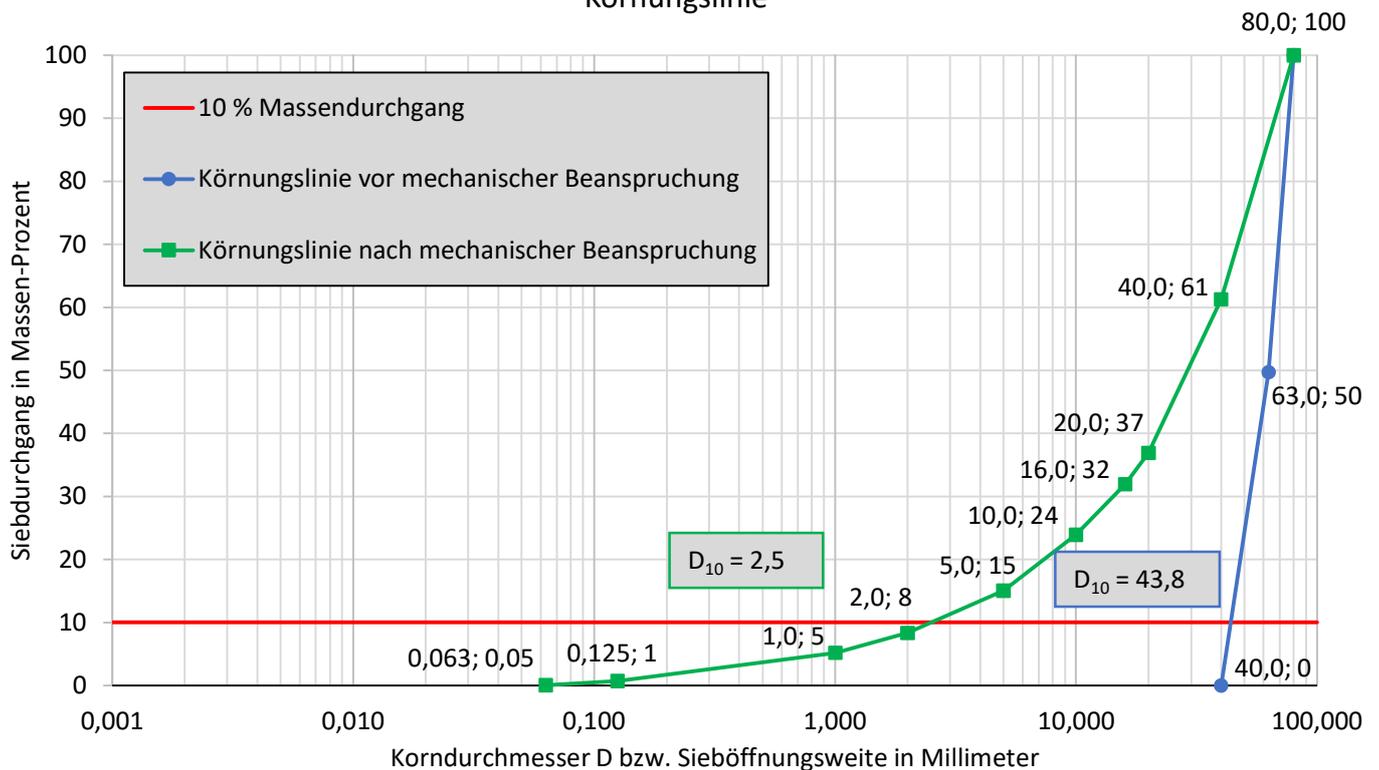


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_11	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	61	37	32	24	15	8	5	1	0,0

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 17,4$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

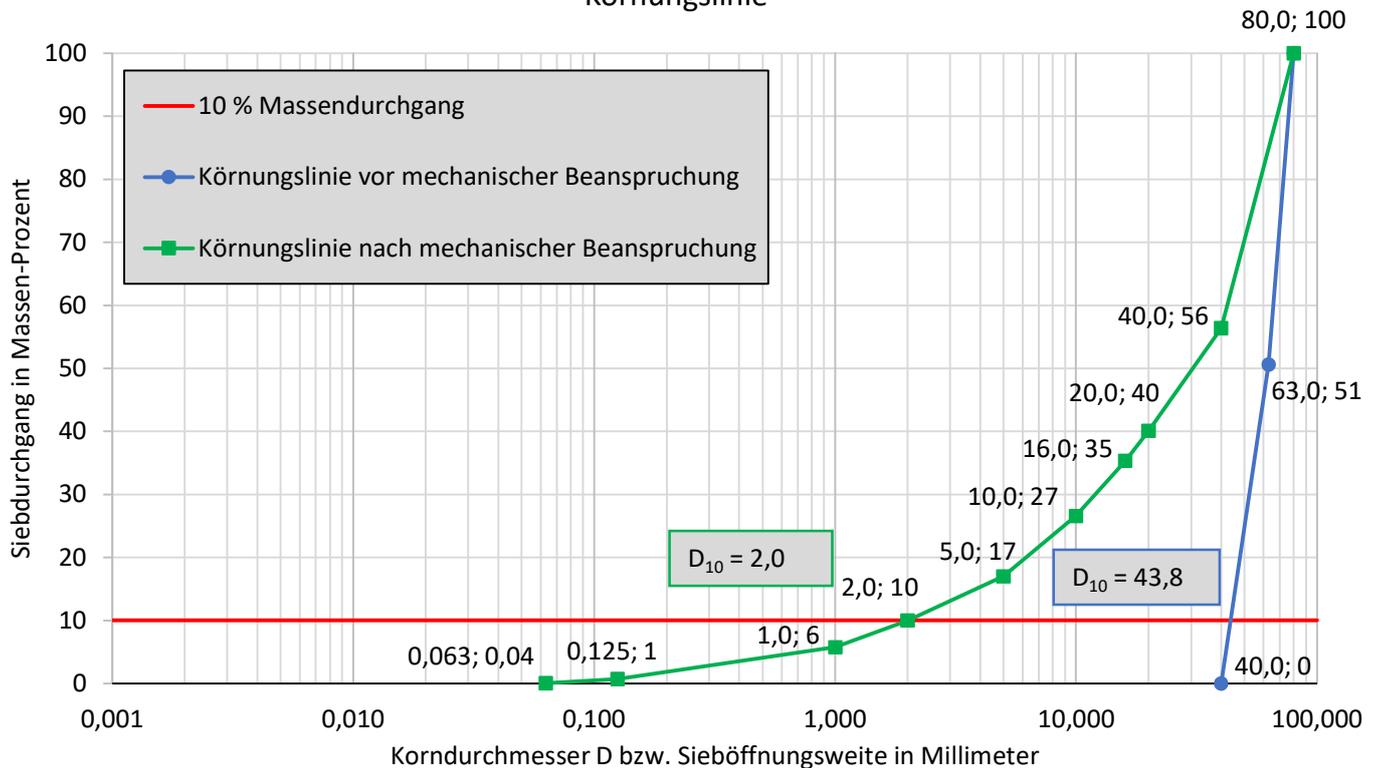


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_12	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	51	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	56	40	35	27	17	10	6	1	0,0

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 21,9$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

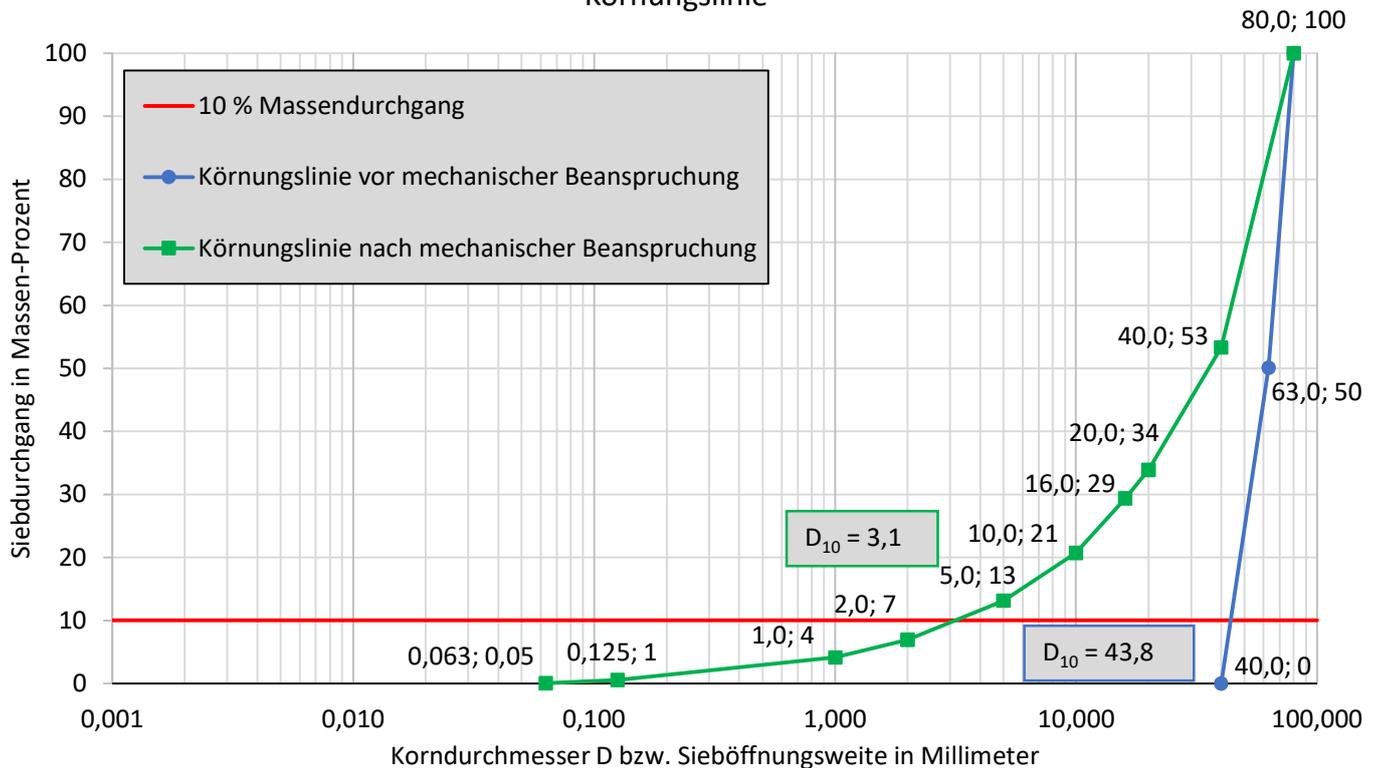


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_13	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	53	34	29	21	13	7	4	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 13,9$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

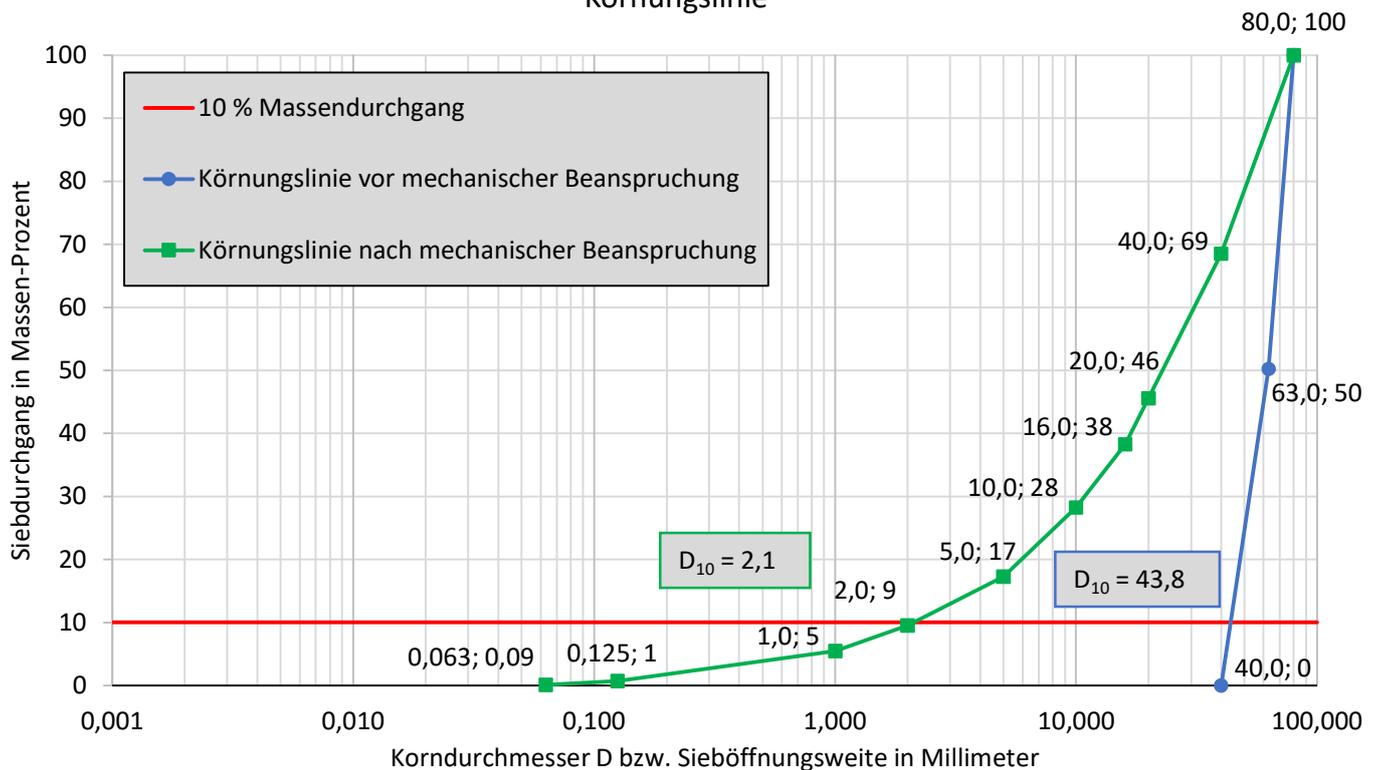


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Schlier (getrocknet)	BEZEICHNUNG: Z_40/80_14	LABORNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	BEARBEITER: J.M.	DATUM: 13.07.2020
DATUM PROBENNAHME:			

Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR}

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,0	1,0	0,125	0,063
Siebdurchgang (%) vor mechanischer Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Siebdurchgang (%) nach mechanischer Beanspruchung	100	-	69	46	38	28	17	9	5	1	0,1

Körnungslinie



Zertrümmerbarkeits-Index I_{FR} nach prEN 17542-2

$$I_{FR} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 20,6$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Die Berechnung von I_{FR} erfolgte mit den genauen Werten, nicht mit den im Diagramm dargestellten Werten.

KORNGRÖSSENVERTEILUNG

ANGABEN ZUR PROBE

Projekt: Masterarbeit
Projekt Nr.: 1
Auftraggeber: J.M.
Bezeichnung: Material A

Labornummer: 21535
Tiefe: -
Bearbeiter: J.M.
Datum: 23.07.20 - 28.07.20

ZUSAMMENSTELLUNG DER SIEBDURCHGÄNGE

Siebanalyse

\varnothing [mm]	%
16,0	98,7
8,0	61,0
4,0	44,2
2,0	35,6
1,0	28,0
0,5000	18,6
0,2500	7,0
0,1250	4,6

Schlammmanalyse

\varnothing [mm]	%
0,0628	3,5
0,0463	3,1
0,0339	2,7
0,0224	2,2
0,0134	1,7
0,0080	1,2
0,0050	0,8
0,0029	0,7
0,0015	0,4

Auftraggeber
J.M.

Projekt
Masterarbeit

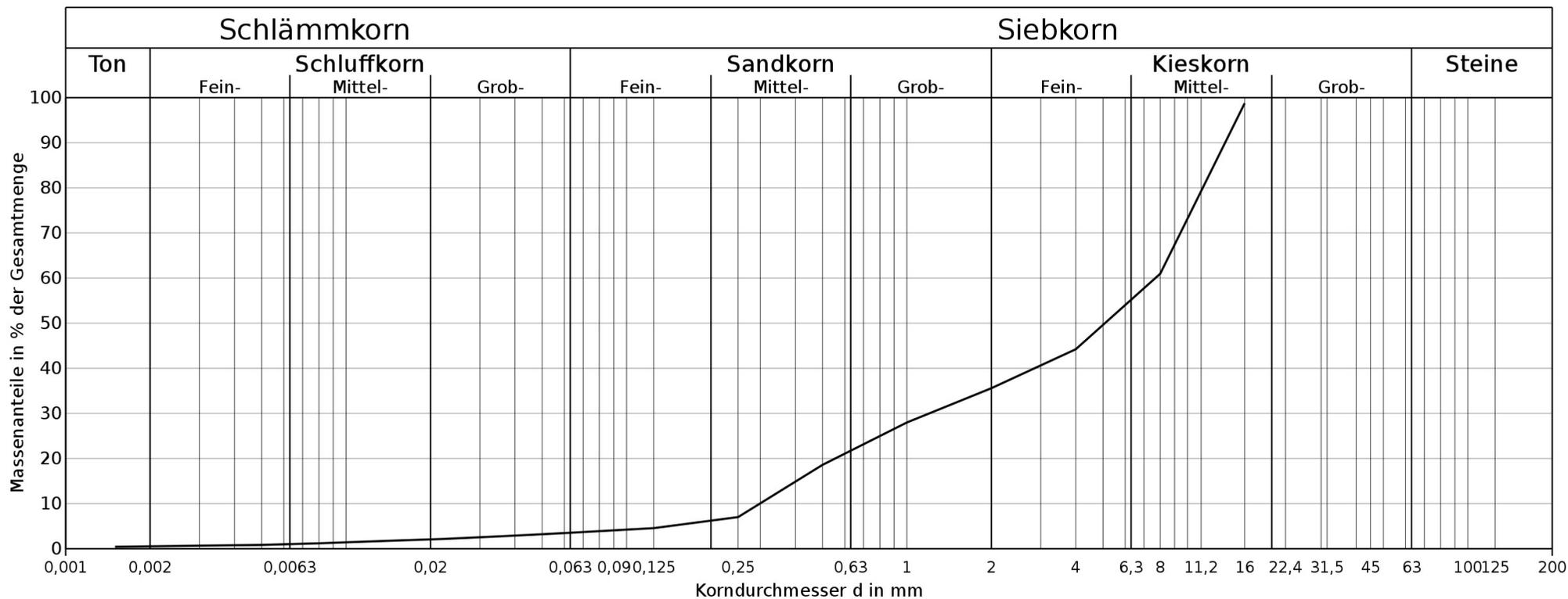
Proj. Nr. 1
Bezeichnung
Material A

Tiefe
-

Bearb.
J.M.

Datum
23.07.20 - 28.07.20

KÖRNUINGSLINIE



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner ϕ [mm]	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Anteile größer ϕ [mm]	Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
21535	—	-	0,5	3,0	32,0	-	-	2: 64,4	si" Sa	0,2990mm	1,2015mm	7,6882mm	25,71	0,63



**INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND
NUMERISCHE GEOTECHNIK
GEOTECHNISCHES LABOR**

RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA
Tel: +43(0)316/873-6239



AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Material A	BEZEICHNUNG: VBS_1	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	DATUM: 23.07.2020
		BEARBEITER: J.M.	

METHYLENBLAUWERT V_{BS}

Größtkorn des Probenmaterials	D_{max}	[mm]		~ 20
$D_{max} > 5 \text{ mm}$			$D_{max} \leq 5 \text{ mm}$	
Masseanteil	$C = \frac{0/5}{0/50} = \frac{2388,1}{4801,8} = 49,7 \%$		Masseanteil	$C = 1$

1. Teilprobe - Wassergehalt

Masse Probe feucht	M	[g]		
Masse Probe trocken	M'	[g]		
Wassergehalt	w	%	$(M-M')/M'$	~ 0 %

2. Teilprobe - Färbetest

Masse Probe feucht	M_0	[g]		471,2
Masse Probe trocken	M_1	[g]	$M_0/(1+w)$	471,2
Gesamtmenge an verwendeter Methylenblaulösung (10 ml/l)	V	[ml]		20
Gesamtmasse an verwendetem Methylenblaupulver	B	[g]	$V*0,01$	0,2
Methylenblauwert der 0/5 mm Kornfraktion	$V_{B0/5}$	$\left[\frac{g}{100g}\right]$	$B*100/M_1$	0,04

Methylenblauwert der 0/50 mm Kornfraktion in Gramm Methylenblau pro 100 Gramm Boden nach prEN 17542-3	$V_{BS} = \frac{B * C * 100}{M_1}$	$V_{BS} = 0,02 \text{ g/100g}$
---	------------------------------------	--------------------------------

Anmerkung: Aufgrund des äußerst geringen Wassergehalts der ersten Teilprobe konnte dieser in den Berechnungen vernachlässigt werden.

Probe • Specimen:

VBS_1

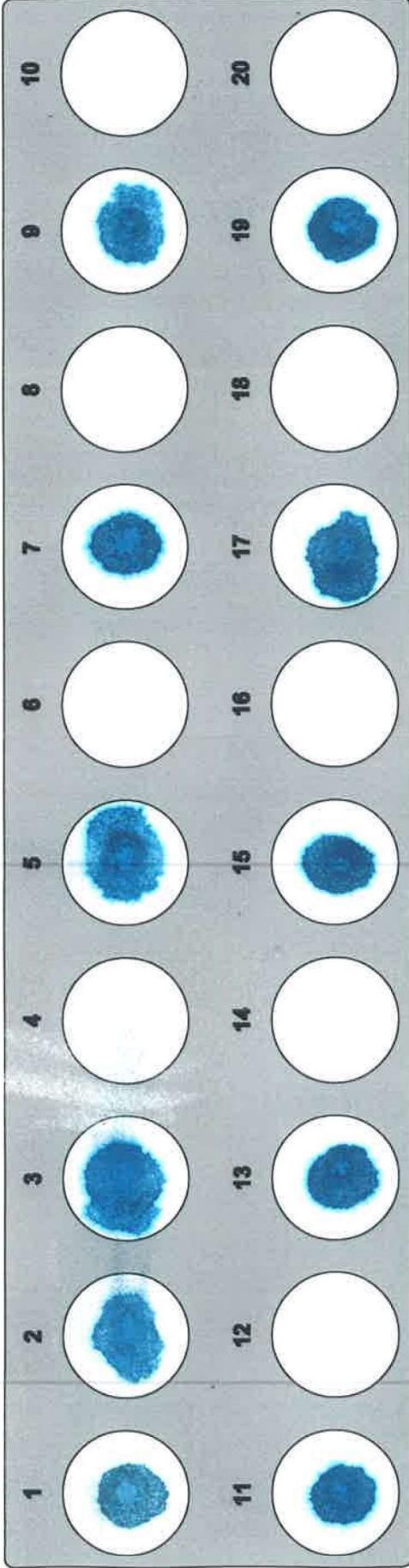
Datum • Date:

23.07.2020

Prüfer • Name:

S.H.

Unterschrift • Signature:




 biorapid GmbH • 79224 Umkirch / Freiburg i. Br. • Germany **REF** 070004-0001 Filterpapier-Testfeldstreifen nach: **LAB LOT** 08-6070-81/G **CE**  

Filter paper test fields stripe according to:
 EN 933-9 / 6.4

KORNGRÖSSENVERTEILUNG

ANGABEN ZUR PROBE

Projekt: Masterarbeit
Projekt Nr.: 1
Auftraggeber: J.M.
Bezeichnung: Material B

Labornummer: 21536
Tiefe: -
Bearbeiter: J.M.
Datum: 23.07.20 - 28.07.20

ZUSAMMENSTELLUNG DER SIEBDURCHGÄNGE

Siebanalyse

\varnothing [mm]	%
16,0	92,6
8,0	57,7
4,0	34,2
2,0	24,5
1,0	18,4
0,5000	14,7
0,2500	11,9
0,1250	10,4

Schlammmanalyse

\varnothing [mm]	%
0,0627	8,1
0,0461	7,1
0,0339	6,1
0,0227	4,4
0,0137	3,1
0,0081	2,1
0,0050	1,5
0,0030	1,1
0,0015	0,8

Auftraggeber
J.M.

Projekt
Masterarbeit

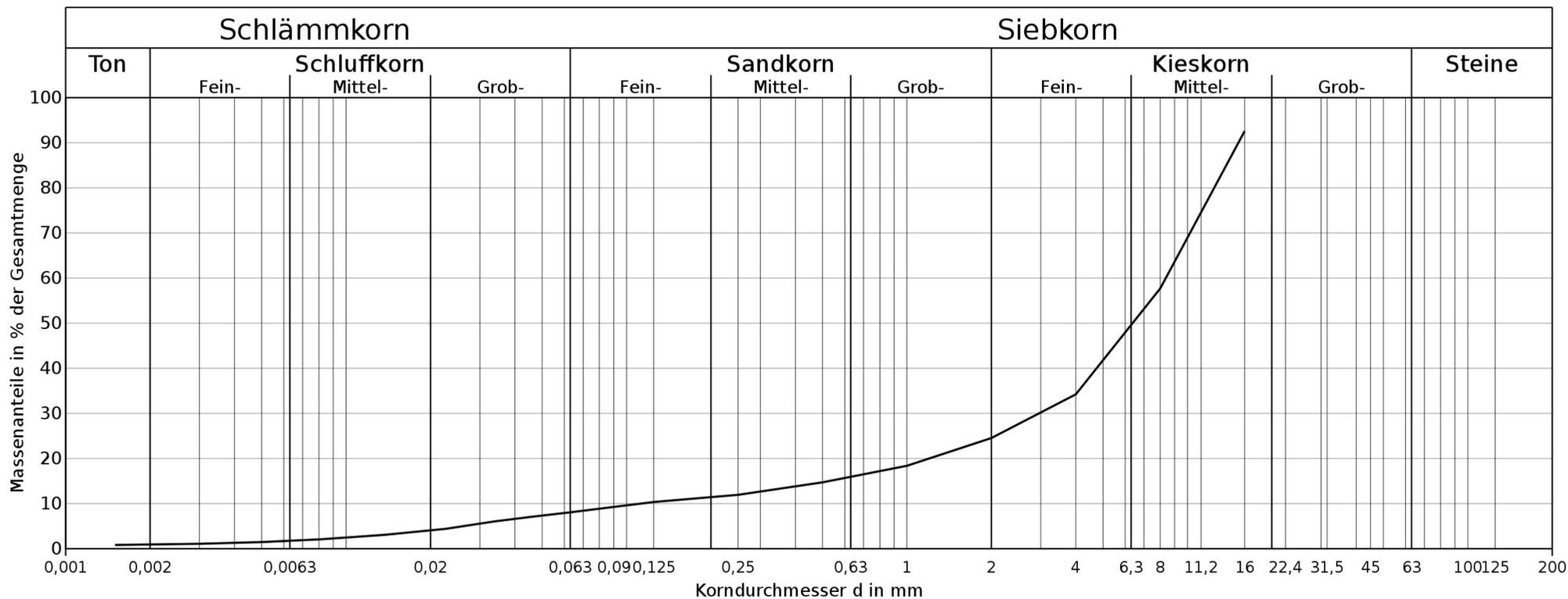
Proj. Nr. 1
Bezeichnung
Material B

Tiefe
-

Bearb.
J.M.

Datum
23.07.20 - 28.07.20

KÖRNUNGSLINIE



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner ϕ [mm]	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Anteile größer ϕ [mm]	Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
21536	—	-	0,9	7,1	16,5	-	-	2: 75,5	si' sa	0,1125mm	2,9577mm	8,3758mm	74,45	9,28



**INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND
NUMERISCHE GEOTECHNIK
GEOTECHNISCHES LABOR**

RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA
Tel: +43(0)316/873-6239



AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART: Material B	BEZEICHNUNG: VBS_2	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	DATUM PROBENNAHME:	DATUM: 27.07.2020
		BEARBEITER: J.M.	

METHYLENBLAUWERT V_{BS}

Größtkorn des Probenmaterials	D_{max}	[mm]	~ 20
$D_{max} > 5 \text{ mm}$		$D_{max} \leq 5 \text{ mm}$	
Masseanteil	$C = \frac{0/5}{0/50} = \frac{4655,1}{12622,8} = 36,9 \%$		Masseanteil $C = 1$

1. Teilprobe - Wassergehalt

Masse Probe feucht	M	[g]	402,3
Masse Probe trocken	M'	[g]	390,3
Wassergehalt	w	%	$(M-M')/M'$ 3,1

2. Teilprobe - Färbetest

Masse Probe feucht	M_0	[g]	201,2
Masse Probe trocken	M_1	[g]	$M_0/(1+w)$ 195,2
Gesamtmenge an verwendeter Methylenblaulösung (10 ml/l)	V	[ml]	20
Gesamtmasse an verwendetem Methylenblaulösungspulver	B	[g]	$V * 0,01$ 0,20
Methylenblauwert der 0/5 mm Kornfraktion	$V_{B0/5}$	$\left[\frac{g}{100g}\right]$	$B * 100/M_1$ 0,10

Methylenblauwert der 0/50 mm Kornfraktion in Gramm Methylenblau pro 100 Gramm Boden nach prEN 17542-3	$V_{BS} = \frac{B * C * 100}{M_1}$	$V_{BS} = 0,04 \text{ g/100g}$
---	------------------------------------	--------------------------------

Anmerkung:

Probe • Specimen:

VBS-2

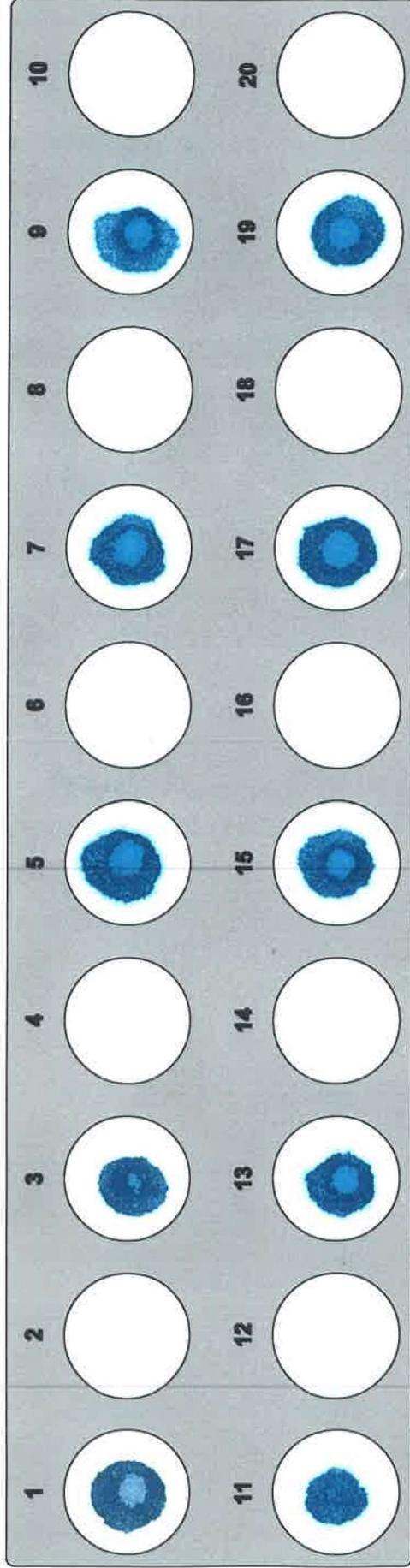
Datum • Date:

27.07.20

Prüfer • Name:

D.M.

Unterschrift • Signature:



biorapid GmbH • 79224 Umkirch / Freiburg i. Br. • Germany
 Fon: +49 (0)7665-9329431 • Fax: +49 (0)7665-9329433

REF

070004-0001 Filterpapier-Testfeldstreifen nach:

Filter paper test fields stripe according to:

LAB LOT

08-6070-81/G

CE



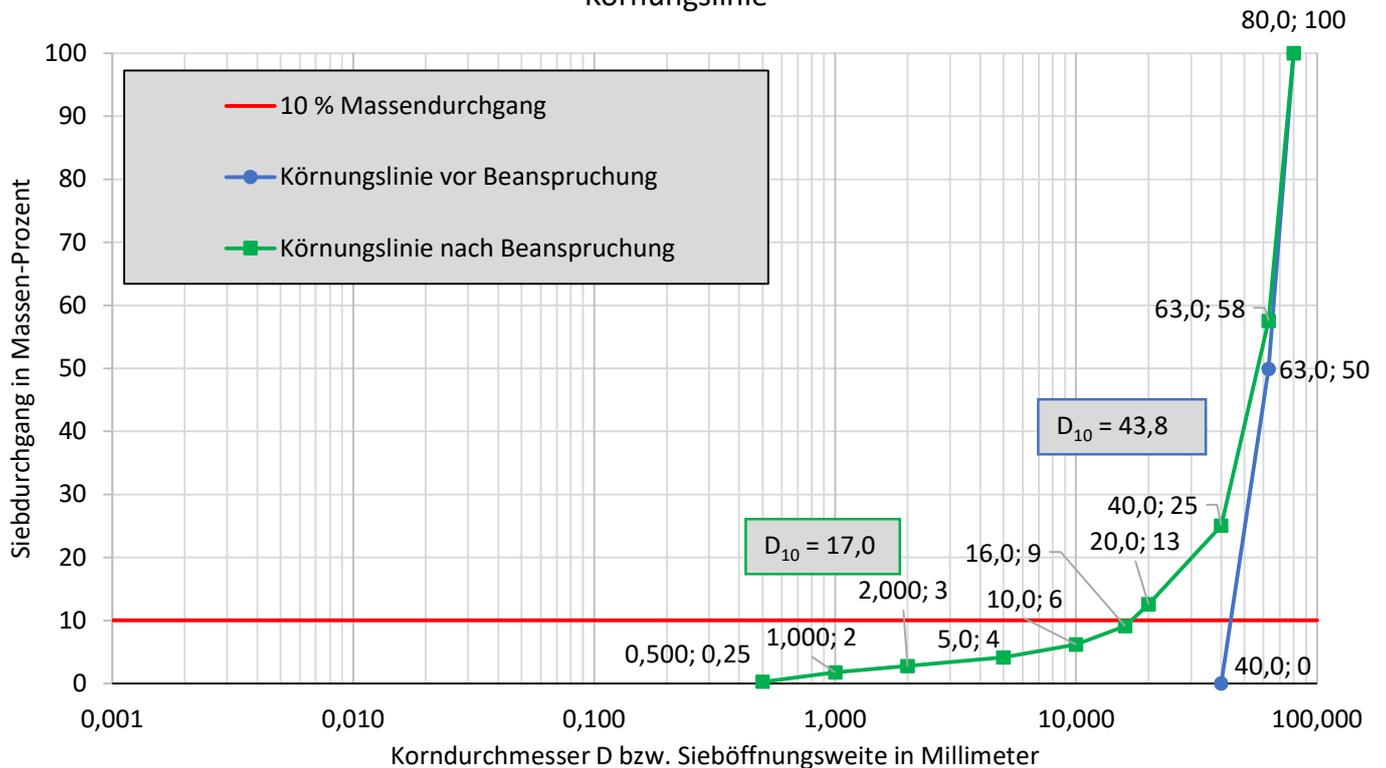


AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART:	BEZEICHNUNG: Musterbeispiel	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input checked="" type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM:

VERÄNDERLICHKEITS-INDEX I_{DGa} (METHODE A)

Sieb-Maschenweiten [mm]	80,0	63,0	40,0	20,0	16,0	10,0	5,0	2,000	1,000	0,500	
Siebdurchgang (%) vor Beanspruchung	100	50	0	-	-	-	-	-	-	-	
Siebdurchgang (%) nach Beanspruchung	100	58	25	13	9	6	4	3	2	0,2	

Körnungslinie



Veränderlichkeits-Index I_{DGa} nach prEN 17542-2

$$I_{DGa} = \frac{D_{10 \text{ vorher}}}{D_{10 \text{ nachher}}} = 2,6$$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung:



AUFTRAGGEBER: J.M.	BODENART:	BEZEICHNUNG: Musterbeispiel	LABORNUMMER:
	UNGESTÖRT <input type="checkbox"/> GESTÖRT <input type="checkbox"/>	TIEFE:	PROJEKTNUMMER:
PROJEKT: Masterarbeit	DATUM PROBENNAHME:	BEARBEITER: J.M.	DATUM:

VERÄNDERLICHKEITS-INDEX $I_{D_{Gb}}$ (METHODE B) FÜR GROBKÖRNIGES MATERIAL

Kornfraktion [mm]	Maschenweite bei Siebung [mm]	Siebrückstand [%]	Probenmasse [g]	Gesamtverlust [%]	Mittlerer Verlust [%]
63-40	31,5	20,0	3000	4,8	0,96
40-20	16	45,0	1500	8	3,60
20-10	8	23,0	1000	9,6	2,20
10-5	4	12,0	300	11,2	1,34
	Summe	100	5800		8,10

Qualitative Beschreibung:

Beobachtungen:

Veränderlichkeits-Index $I_{D_{Gb}}$ = Summe des mittlerern Verlusts

$I_{D_{Gb}} = 8,10$

Klassifizierung nach EN 16907-2

-

Anmerkung: Dieses Musterbeispiel wurde aus prEN 17542-1:2019 übernommen und modifiziert.