



Berger Markus, BSc

**Rütteldruckverdichtung
zur Verringerung der Wasserdurchlässigkeit sowie
zur Erhöhung der Suffosionsstabilität**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geotechnik und Wasserbau – Bauingenieurwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Begutachter:

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

Betreuer:

Oberrat Dipl.-Ing. Leibniz Otto

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Graz, März, 2017

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.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

Interesse, Motivation, Zielstrebigkeit, Ausdauer und angeeignetes Fachwissen sind zwar Substantive um meine Studienzeit bestens zu beschreiben, jedoch ohne die optimalen Rahmenbedingungen und einem fördernden Umfeld keinesfalls für einen akademischen Abschluss und dazugehöriger Erstellung einer wissenschaftlichen Abschlussarbeit ausreichend. In diesem Sinne widme ich den nachfolgenden Part denjenigen Personen, die mich während meiner gesamten Studienzeit, aber im Speziellen während des Verfassens der vorliegenden Masterarbeit sowohl inspiriert und motiviert, aber auch finanziell unterstützt haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank an meine Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte und Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz für die Geduld und Mühe, aber auch für das regelmäßige konstruktive Feedback sowie dem Einbringen des notwendigen Know-hows, welches mir bei der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen hat.

Kaum in angemessene Worte zu fassende Dankbarkeit gebührt meiner Familie, im Besonderen meinen Eltern Klaus und Eva, die mich mein gesamtes Leben in all meinen Entscheidungen bekräftigten, mich in schwierigsten Situationen mental auffingen, sowie mich während der gesamten Studienzeit körperlich aber auch finanziell auf Vordermann brachten.

Zu guter Letzt aber ohne Zweifel hauptverantwortlich für meinen Abschluss sind sicherlich meine Kommilitonen, die mich während meiner gesamten Studienzeit nicht nur begleiteten und unterstützten, sondern mit denen größtenteils langfristige Verbundenheit und ehrliche Freundschaft entstanden sind.

Des Weiteren möchte ich mich bei all denjenigen Personen bedanken, welche während der sechs wundervollen und unvergesslichen Jahre in Graz Ihre Wenigkeit zum Abschluss meines Studiums beigetragen haben.

Kurzfassung

Die dynamische Tiefenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren wird seit über 80 Jahren erfolgreich zur Verdichtung grob- und gemischtkörniger Böden angewendet. Die gegenständliche Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss der Lagerungsdichte von Böden auf die Wasserdurchlässigkeit sowie die Suffosionsstabilität.

Die theoretische Grundlage bildet eine Literaturrecherche, wobei indirekte Verfahren aus der Kornverteilung angeführt werden, um die Durchlässigkeit sowie die innere Filterstabilität grobkorndominierter Böden abzuschätzen.

Darauf aufbauend wird der praktische Teil dieser Arbeit im Labor des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz durchgeführt. Das Probenmaterial für die labortechnische Versuchsdurchführung ist ein gemischtkörniger „Murschotter“, welcher auch die Ausgangskörnung für zwei weitere künstlich erzeugte Proben stellt. Die Bestimmung der lagerungsabhängigen Durchlässigkeit erfolgt mittels Durchströmungsversuchen bei einem veränderlichen hydraulischen Gradienten. Im Gegensatz dazu werden die lagerungsabhängigen Suffosionsversuche mittels eines adaptierten Durchlässigkeitsversuchs realisiert, wobei die Proben entgegengesetzt der Schwerkraftrichtung bei konstanter hydraulischer Einwirkung durchströmt werden. Für beide Versuchsdurchführungen erfolgt die Verdichtung der Proben im Versuchszylinder unter Verwendung eines Rütteltisches mit einer, auf die gewünschte Verdichtung abgestimmten, Intensität.

Die Ergebnisse der praktischen Versuchsreihe an drei gemischtkörnigen Bodenproben bestätigen den Einflussparameter „Lagerungsdichte“ hinsichtlich der Durchlässigkeit sowie der Suffosionsstabilität. In Abhängigkeit der Kornverteilung der Versuchsproben ist es durch die Verdichtung möglich, den bodenphysikalischen Durchlässigkeitsbeiwert k um den Faktor 13 bis 26 beziehungsweise auf den Durchlässigkeitsbeiwert k im unverdichteten Lagerungszustand zu reduzieren. Des Weiteren ist die Eigenfiltration der Proben durch die Verdichtung positiv beeinflussbar, sodass der hydraulisch bedingte suffosive Feinteilaustrag $\leq 0,063$ mm um 31 % bis 65 % verringert werden kann.

Schlagwörter:

Bodenverbesserung, Rütteldruckverdichtung, Lagerungsdichte, Durchlässigkeitsbeiwert k , Suffosionsstabilität, indirekte Durchlässigkeitsermittlung, Filterkriterien

Abstract

Deep dynamic compaction techniques based on vibro compaction have been applied successfully to compact coarse- and mixed-grained soils for more than 80 years. This master thesis closely examines the impact of soil storage ("compaction") on water permeability and internal-erosion stability.

A research of the literature on this subject delivers the theoretical basis. Indirect methods are mentioned to provide a useful estimation of the permeability and the internal filter stability of soils dominated by coarse grain sizes, where grain-size distribution and the provided compaction density are known.

This analysis forms the basis for the practical part of the thesis at the laboratory of the Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering at Graz University of Technology. The sample material used for the tests conducted at the laboratory is mixed-grain gravel called "Murschotter" (typical for the area around Graz). This also provides the starting grain size for two further artificially created soil samples. The compaction-dependent permeability is determined by conducting permeability tests under a variable hydraulic gradient. In contrast, compaction-dependent internal-erosion tests are implemented based on an adapted permeability test, in which water is allowed to flow through the samples against the direction of gravity at a constant hydraulic force. For both test procedures, the samples in the test cylinders underwent vibro compaction by means of a vibrating table with a level of intensity suitable for the required degree of compaction.

The results of the practical test series conducted on three mixed-grained soil samples confirm the influence of the parameter "compaction" on permeability and internal-erosion stability. Depending on the test samples' grain-size distribution, the compaction allows the reduction of the geophysical permeability coefficient k by the factor 13 to 26 in relation to the permeability coefficient k in a non-compacted state of storage. Moreover, the samples' self-filtration can be favourably influenced by compaction, which is able to reduce the hydraulically induced loss (suffusion) of fine particles ≤ 0.063 mm by 31 % to 65 %.

Keywords:

soil improvement, vibro compaction, storage density, permeability coefficient k , internal-erosion stability, indirect permeability determination, filter criteria

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel und Struktur der Arbeit	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Übersicht über die Bodenverbesserungsmaßnahmen	3
2.2	Tiefenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren.....	5
2.2.1	Entwicklung des Verfahrens.....	5
2.2.2	Verdichtbarkeit von Böden	6
2.2.3	Verfahrens- und Gerätetechnik	10
2.2.4	Eignung und Anwendungsgrenzen.....	15
2.2.5	Einflussfaktoren der Verdichtung.....	17
2.2.6	Wirkungsradius und Ausführungsraster.....	20
2.2.7	Einbau- und Verfüllmaterial	24
2.2.8	Verdichtungskontrolle und Qualitätssicherung.....	25
3	Wasserdurchlässigkeit von Böden	28
3.1	Grundwasserströmung	28
3.1.1	Filtergesetz von Darcy und dessen Gültigkeitsbereich	29
3.1.2	Durchlässigkeitsbeiwert k	32
3.1.3	Abschätzung der Durchlässigkeit anhand von Erfahrungswerten	35
3.2	Indirekte Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit.....	35
3.2.1	Verfahren nach Hazen (1892)	37
3.2.2	Verfahren nach Zieschang (1961)	38
3.2.3	Verfahren nach Beyer (1964)	39
3.2.4	Verfahren nach Konzeny-Köhler (1965)	42
3.2.5	Verfahren nach Seiler (1973)	44
3.2.6	Verfahren nach Sichardt (1927)	46
3.2.7	Weitere in der Literatur erwähnte Verfahren.....	47
3.3	Temperaturkorrektur des Durchlässigkeitsbeiwerts k	48
3.4	Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Porenzahl.....	49

4	Suffosion weitgestufter nichtbindiger Böden	50
4.1	Allgemeines	50
4.2	Transportmechanismus.....	51
4.3	Indirekte Verfahren zur Ermittlung der Suffosionsstabilität	53
4.3.1	Einfaches Verfahren (BAW, 2013)	54
4.3.2	Verfahren nach Ziemts (1967).....	54
4.3.3	Verfahren nach Kenney und Lau (1985 & 1986)	55
4.3.4	Verfahren nach Burenkova (1993)	58
4.4	Chronologie der Nachweisführung	59
5	Laborarbeit	61
5.1	Allgemeines	61
5.2	Versuchsdurchführung und Beschreibung.....	63
5.2.1	Ermittlung der lagerungsabhängigen Durchlässigkeit.....	63
5.2.2	Ermittlung der lagerungsabhängigen Suffosionsstabilität	69
5.3	Versuch Nr. 1	72
5.3.1	Lagerungsabhängige Durchlässigkeit.....	74
5.3.2	Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität	78
5.3.3	Bewertung der Ergebnisse	82
5.4	Versuch Nr. 2	84
5.4.1	Lagerungsabhängige Durchlässigkeit.....	86
5.4.2	Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität	90
5.4.3	Bewertung der Ergebnisse	90
5.5	Versuch Nr. 3	91
5.5.1	Lagerungsabhängige Durchlässigkeit.....	93
5.5.2	Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität	97
5.5.3	Bewertung der Ergebnisse	101
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	103
7	Ausblick.....	106

8	Literaturverzeichnis	107
9	Normative Anweisungen.....	112
	Anhang.....	
	Anhang A.....	
	Anhang B.....	
	Anhang C	

Formelzeichen und Abkürzungen

Große Buchstaben

C_u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
D	[-]	Lagerungsdichte
I_d	[-]	relative Dichte bzw. Dichteindex
V	[cm ³]	Gesamtvolumen des Bodens
V_l	[cm ³]	Volumen der Luft
V_o	[cm ³]	Volumen der Poren
V_s	[cm ³]	Volumen der Festmasse
V_w	[cm ³]	Volumen des Wassers

Kleine Buchstaben

c	[kN/m ²]	Kohäsion
co	[-]	Steine („cobble“)
d_{max}	[mm]	Größtkorndurchmesser
d_w	[mm]	wirksamer Korndurchmesser
e	[-]	Porenzahl bei natürlicher Lagerung
e_{max}	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung
e_{min}	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung
f_s	[MPa]	Mantelreibung der Drucksonde
gr	[-]	Kies (“gravel“)
i	[-]	hydraulischer Gradient
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
m_l	[g]	Masse der Luft
m_s	[g]	Masse des Feststoffs
m_w	[g]	Masse des Wassers
n	[%]	Porenanteil bei natürlicher Lagerung
n_{max}	[%]	Porenanteil bei lockerster Lagerung
n_{min}	[%]	Porenanteil bei dichtester Lagerung
q_c	[MPa]	Spitzendruck der Drucksonde
sa	[-]	Sand (“sand“)
si	[-]	Schluff (“silt“)
v	[m/s]	Filtergeschwindigkeit des Wassers

Griechische Buchstaben

ρ_d	[g/cm ³]	natürliche Trockendichte
$\rho_{d,DL}$	[g/cm ³]	Trockendichte bei dichtester Lagerung
$\rho_{d,max}$	[g/cm ³]	maximale Trockendichte
$\rho_{d,min}$	[g/cm ³]	minimale Trockendichte
$\rho_{d,LL}$	[g/cm ³]	Trockendichte bei lockerster Lagerung
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_w	[g/cm ³]	Wasserdichte
φ	[°]	Reibungswinkel des Bodens

Abkürzungen

<i>CPT</i>	Drucksondierung ("Cone Penetration Test")
<i>DMT</i>	Dilatometertest ("Dilatometer Test")
<i>DP</i>	Rammsondierung ("Dynamic Probing")
<i>GOK</i>	Geländeoberkante
<i>PMT</i>	Pressiometertest ("Pressuremeter Test")
<i>RDV</i>	Rütteldruckverdichtung
<i>RSV</i>	Rüttelstopfverdichtung
<i>SPT</i>	Standardpenetrationstest ("Standard Penetration Test")
<i>VP1</i>	Versuchsprobe 1
<i>VP2</i>	Versuchsprobe 2
<i>VP3</i>	Versuchsprobe 3

1 Ziel und Struktur der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Einflusswirkung der Lagerungsdichte hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit sowie der inneren Filterstabilität in einem ersten Schritt theoretisch zu erläutern und durch weiterführende Untersuchungen eingehender zu untersuchen. Der Fokus liegt dabei auf der dynamischen Bodenverdichtung gemischtkörniger Böden im Spektrum gering schluffiger, gering steiniger, Sand- und Kiesgemische mittels dem Rütteldruckverfahren.

Kapitel 2 dieser Masterarbeit gibt zuerst einen allgemeinen Überblick hinsichtlich der derzeit gängigen Bodenverbesserungsverfahren. In weiterer Folge wird der Schwerpunkt auf die dynamische Tiefenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren gelegt. Verfahrensweise, Gerätetechnik, Anwendungsgrenzen sowie bevorzugte Ausführungs raster und etwaige Verdichtungskontrollen werden dabei ausführlich erläutert.

Kapitel 3 befasst sich mit dem Einflussparameter „Lagerungsdichte“ in Bezug auf die bodenphysikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die der Durchlässigkeitsbeiwerte k . Des Weiteren werden empirische Regressionsansätze vorgestellt, mit denen es möglich ist, die hydraulische Durchlässigkeit auf Basis der Kornverteilungskurve des Bodens abzuschätzen (indirekte Verfahren).

Kapitel 4 widmet sich dem Phänomen der Suffosion weitgestufter nichtbindiger Böden. Im Speziellen wird dabei auf die Voraussetzungen und Einflussparameter sowie auf den Transportmechanismus suffosiver Erscheinungen eingegangen. Um die Suffosionsstabilität des Bodens auf Grundlage dessen Kornverteilung indirekt bestimmen zu können, werden aus der Literatur vier einfache, aber zuverlässige Filterkriterien ausgewählt, welche am Ende dieses Kapitels beschrieben werden.

Kapitel 5 stellt den praktischen Teil dieser Arbeit dar. Ausgehend von drei grob- bzw. gemischtkörnigen Bodenproben werden im Labor für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz einerseits lagerungsabhängige Durchlässigkeitsversuche, andererseits lagerungsabhängige Suffosionsversuche durchgeführt. Um zu evaluieren, inwieweit durch die Dichteveränderung der jeweiligen Probe eine Durchlässigkeits- sowie Suffosionsbeeinflussung induziert werden kann, werden die Ergebnisse miteinander verglichen und bewertet. Darüber hinaus werden die ermittelten k -Werte den Ergebnissen der indirekten k -Wert-Berechnungen gegenübergestellt.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Laborversuche zusammen und leitet die Eignung der jeweiligen Bodenproben in Bezug auf die zielführende Anwendung der Rütteldruckverdichtung zur Durchlässigkeitsreduzierung sowie zur Suffosionsstabilisierung ab. Schlussfolgernd wird angeführt, mit welcher Genauigkeit eine indirekte k -Wert-Annäherung möglich ist und welche Verfahren für die Ingenieurpraxis zu empfehlen sind.

Im Anhang dieser Arbeit befindet sich die Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritte der indirekten Durchlässigkeitsbestimmungen sowie die Vorgehensweise bei der Anwendung der geometrischen Suffosionskriterien (Filterkriterien) für die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Bodenproben.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Übersicht über die Bodenverbesserungsmaßnahmen

Hat ein Baugrund nicht die notwendigen Eigenschaften oder erfüllt dieser nicht die geforderte Eignung, um ein Bauvorhaben realisieren zu können, sind zusätzliche technische Maßnahmen notwendig. Der Austausch, die Verdichtung sowie die Verfestigung des Bodens gelten als gängige Methoden, um die Untergrundverhältnisse zu optimieren bzw. günstig zu beeinflussen. Die Anforderungen und die weitergehende Nutzung des Baugrunds bestimmen in der Regel die Wahl des geeigneten Verfahrens, jedoch können die primären Ziele einer Baugrundverbesserung folgendermaßen definiert werden (Kirsch & Sondermann, 2001):

- Erhöhung der Dichte sowie Scherfestigkeit mit günstiger Beeinflussung von Stabilitätsproblemen,
- Verringerung der Zusammendrückbarkeit mit günstiger Beeinflussung der Verformbarkeit,
- Beeinflussung der Durchlässigkeit zur Verminderung des Wasserandrangs/-abflusses sowie zur Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeiten,
- Vergrößerung der Homogenität.

Der Austausch eines für den Anwendungsfall nicht geeigneten Bodens durch ein geeigneteres Material kommt im Allgemeinen nur für oberflächennahe Bodenschichten geringer Mächtigkeit zur Anwendung. Mit zunehmenden Austauschvolumen steigt der Arbeitsaufwand, weshalb diese Methode aus wirtschaftlichen Gründen nur bis zu einer Tiefe von wenigen Metern unter GOK Anwendung findet. (nach Simmer, 1994)

Die Bodenverfestigung basiert auf der Grundlage, die Porenräume des Bodens unter Verwendung verschiedener Injektionsmittel und -methoden zu füllen. Das Ziel dieser Maßnahmen ist, die Steifigkeit und Festigkeit zu erhöhen sowie die Durchlässigkeit zu verringern. Die Verfahren der Bodenverfestigung verändern im Allgemeinen die Bodenstruktur nicht bzw. gegebenenfalls nur geringfügig und können im Gegensatz zu den Bodenaustauschverfahren in größeren Tiefen technisch und wirtschaftlich zielführend angewendet werden.

Liegt ein grobkörniger Boden nicht in dichtester Lagerung vor, so kann dieser mechanisch verdichtet werden. Infolge der Verringerung des Porenraumes und der damit verbundenen Erhöhung der Lagerungsdichte führt dies zu einer Erhöhung der Steifigkeit und Scherfestigkeit, sowie im Allgemeinen zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit

des Bodens. Generell wird zwischen statischen und dynamischen Verdichtungsverfahren differenziert, wobei im modernen Grundbau die statische Verdichtung aufgrund der beschränkten Tiefenwirkung eine eher untergeordnete Rolle einnimmt (Simmer, 1994). Die dynamischen Verdichtungsverfahren unterscheiden sich grundsätzlich in deren Tiefenwirkung voneinander. Während bei dynamischen Oberflächenverdichtungsverfahren die Wirkungstiefe auf etwa 1,5 m (Floss, 1986) begrenzt ist, können mithilfe der dynamischen Tiefenverdichtung Böden ab 2,0 m unter GOK (Nendza, 2006) erfasst werden.

Hervorgerufen durch die rasche technische Entwicklung erscheinen laufend neue Verfahren und Methoden, mit denen in Abhängigkeit vom konkreten Anwendungsfall und erforderlicher Rahmen- und Randbedingungen zielführende Verbesserungen des Baugrunds erreicht werden können. Generell unterscheiden sich diese Verfahren nach der Art der Verbesserung. Abb. 1 zeigt eine Übersicht der derzeit gebräuchlichen Bodenverbesserungsverfahren sowie die Klassifizierung im Hinblick auf deren Wirkungsprinzip. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wird der Schwerpunkt auf die dynamische Bodenverdichtung mittels Tiefenrüttler gelegt, weshalb auf die in Abb. 1 schematisch dargestellten Verfahren nicht gesondert eingegangen wird. Weiterführende Literatur und Beschreibungen zu Methodik, Bemessung und Ausführung der einzelnen Verfahren sind Kirsch & Sondermann (2001) zu entnehmen.

Verfahren der Baugrundverbesserung					
Bodenverdichtung		Bodenaustausch		Bodenverfestigung	
statische Verfahren	dynamische Verfahren	Bodenvollersatz	Bodenteilersatz	verdrängend	nicht verdrängend
Vorbelastung Vorbelastung mit Konsolidierung Verdichtungsinjektionen Beeinflussung des Grundwassers	Vibrationsverdichtung - Tiefenrüttler - Aufsatzrüttler Stoßverdichtung - Fallplatte - Luftimpuls - Sprengung	Trockenbaggern Nassbaggern	Schottersäulen Betonsäulen Kalkzementpfähle Polsterschicht	Rüttelstopfverdichtung Rüttelstopfvermörtelung Sand-Verdichtungspfähle Kalk/Zement-Stabilisierungssäulen	mechanisch: - MIP Verfahren - FMI Verfahren - Vereisung - Injektionen hydraulisch: - Düsenstrahlverfahren

Abb. 1: Verfahren der Baugrundverbesserung (nach Kirsch & Sondermann, 2001)

2.2 Tiefenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren

2.2.1 Entwicklung des Verfahrens

Dynamische Tiefenverdichtungen mittels Rütteldruckverfahren werden im Grundbau schon seit über 80 Jahren erfolgreich für die Verdichtung von gering kohäsiven, rolligen Böden angewendet. Erste Entwicklungsschritte dieses Verfahrens fanden in den frühen 1930er Jahren statt und wurden von der Firma Johann Keller durchgeführt, welche diese Methode der Bodenverdichtung im Jahr 1934 patentierte. Das Rütteldruckverfahren etablierte sich in der Baubranche aufgrund dessen besonderer Flexibilität und Wirtschaftlichkeit, sodass mit dieser Methode, bereits nach wenigen Jahren Entwicklung und Erfahrung, Tiefenbereiche von bis zu 35 m erfasst und verdichtet werden konnten (nach Kirsch & Sondermann, 2001; Zöhrer & Winter, 2016)

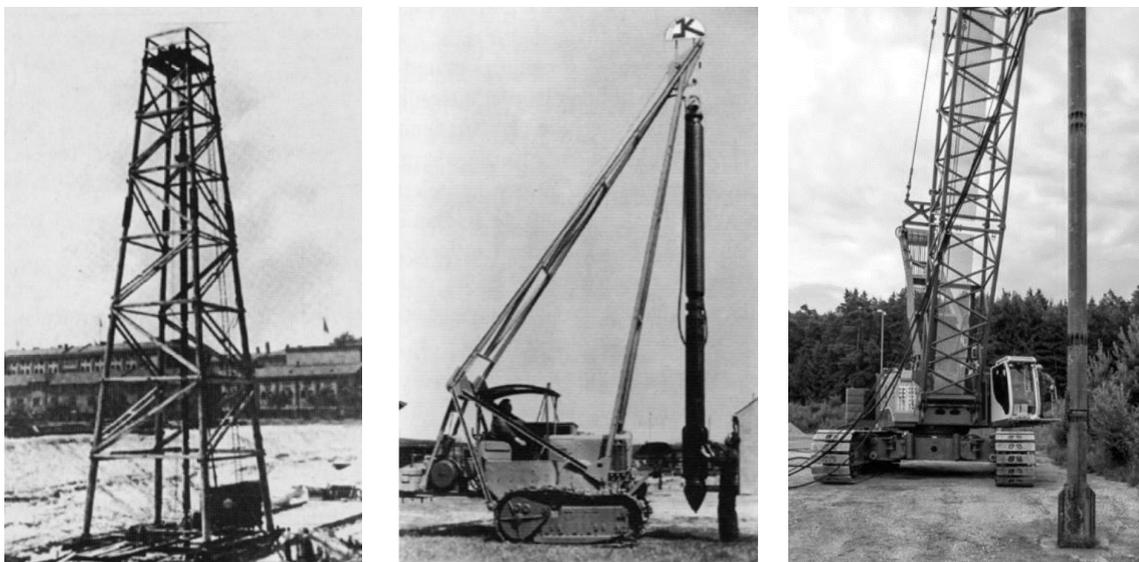


Abb. 2: Entwicklung der Rütteldruckverdichtung (Kirsch, 1993; Fa. Bauer, 2015)

Der Anwendungsbereich der Rütteldruckverdichtung (RDV) beschränkt sich grundsätzlich auf kohäsionsarme, grobkörnige Böden im Spektrum schwach schluffiger, steiniger Sand- und Kiesgemische. Aufgrund dieser Anwendungsbeschränkung wurde das Verfahren soweit verbessert und adaptiert, dass dieses auch in bindigen Böden durch die Erzeugung von künstlichen Schottersäulen angewendet werden kann. Die Weiterentwicklung der Rütteldruckverdichtung und Adaption der Verfahrensweise auf kohäsive Boden ist unter dem Namen „Rüttelstopfverdichtung (RSV)“ bekannt.

Die dynamischen Bodenverbesserungsmaßnahmen mittels Tiefenrüttler werden durch die ÖNORM EN 14731:2005 geregelt, in welcher die RDV sowie die RSV unter dem Begriff „Vibroverdichtung“ geführt werden. Nach ÖNORM EN 14731:2005 ist das Rüt-

teldruckverfahren auf viele nichtbindige Böden anwendbar, wobei der Hauptzweck in der Verdichtung des Baugrunds liegt.

Ein rütteldruckverdichteter Baugrund bringt nach ÖNORM EN 14731:2005 eine erhöhte Scherfestigkeit (Standicherheit) und Steifigkeit (Setzungsverhalten) sowie eine reduzierte Durchlässigkeit (Erosionsbeständigkeit, Abdichtungsmaßnahme) mit sich. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass insbesondere bei sandigen Böden eine Verminderung der Sensibilität gegenüber Bodenverflüssigung (v. a. Erdbeben) erreicht werden kann (Kirsch & Sondermann, 2001).

2.2.2 Verdichtbarkeit von Böden

Der Boden wird im Allgemeinen als ein Dreiphasengemisch bezeichnet, welcher sich aus Gesteinskörnungen (feste Phase) und den mit Wasser (flüssige Phase) und/oder Luft (gasförmige Phase) gefüllten Hohlräumen, den sogenannten Porenräumen, zusammensetzt. Abb. 3 zeigt eine schematische Darstellung des Bodens als ein Dreiphasengemisch sowie dessen relevante Bezeichnungen, die für die theoretische Beschreibung des Verdichtungsprozess notwendig sind.

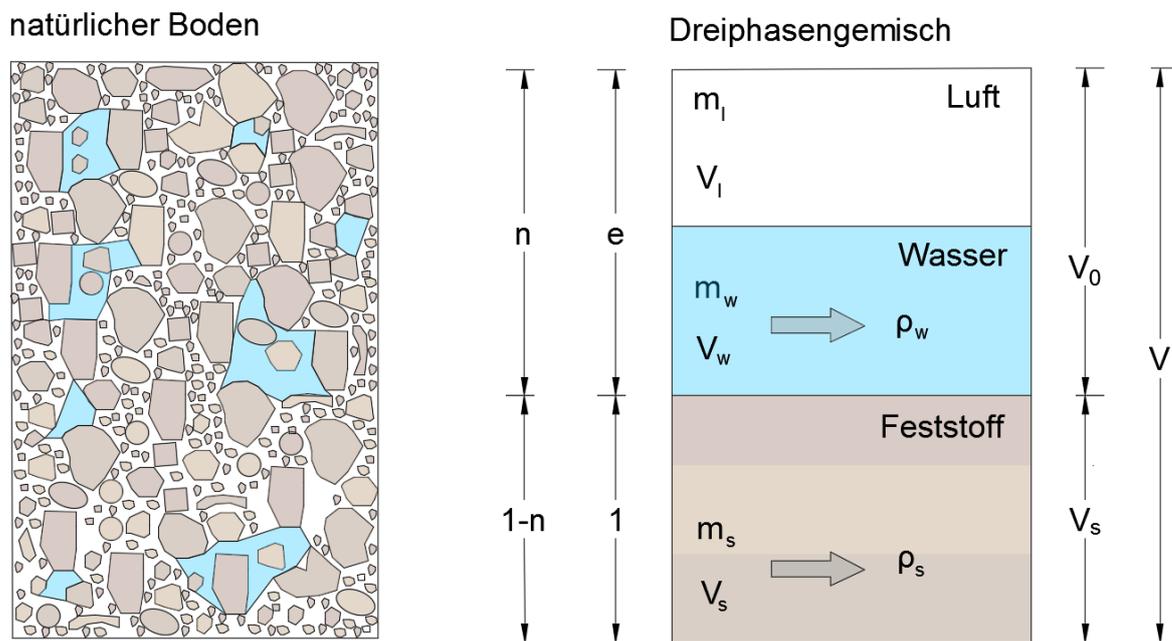


Abb. 3: Darstellung des Bodens als Dreiphasengemisch

Die Porenzahl e des Bodens definiert sich als Quotient von Volumen der Poren V_0 zum Volumen des Feststoffs V_s und wird folgendermaßen berechnet:

$$e = \frac{V_0}{V_s} \quad (1)$$

e [-] Porenzahl bei natürlicher Lagerung

V_0 [cm³] Volumen der Poren

V_s [cm³] Volumen der Festmasse

Der Porenanteil n ist hingegen das Verhältnis von Volumen der Poren V_0 bezogen auf das Gesamtvolumen V des Bodens und ergibt sich wie folgt:

$$n = \frac{V_0}{V} \quad (2)$$

n [%] Porenanteil bei natürlicher Lagerung

V_0 [cm³] Volumen der Poren

V [cm³] Gesamtvolumen des Bodens

Die Extrema der Bodenlagerungsdichte werden als lockerste bzw. dichteste Lagerung bezeichnet. Abb. 4 zeigt die Extremzustände der Lagerung mit den dazugehörigen Kenngrößen der Porenzahl e sowie des Porenanteils n als Kugelmodell dargestellt.

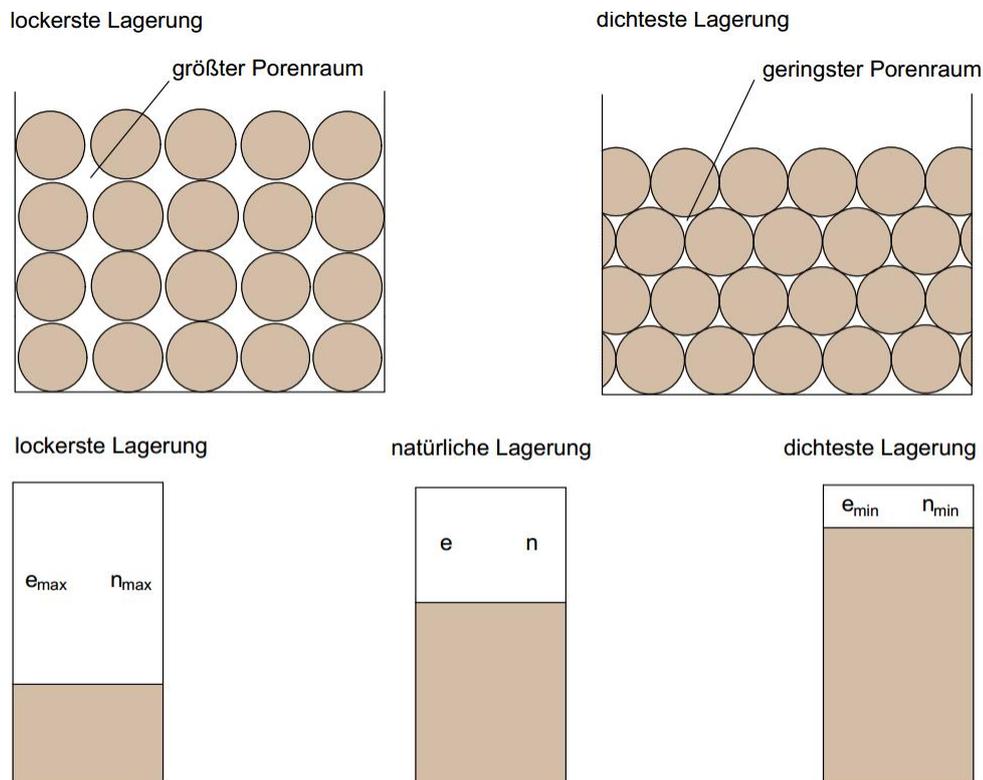


Abb. 4: Extremwerte der Lagerung als Kugelmodell dargestellt

Die Bestimmung der maximalen bzw. minimalen Dichte des Bodens und der dazugehörigen Porenzahl (e_{max} , e_{min}) bzw. dem dazugehörigen Porenanteil (n_{max} , n_{min}) erfolgt im Labor mittels Schlaggabel- oder Rütteltischversuch sowie dem Zylinderversuch (genormt in DIN 18126:1996). Um die Qualität der Bodenlagerung objektiv bewerten zu können, bezieht man sich auf die Lagerungsdichte D sowie die relative Dichte I_D :

$$D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} \quad (3)$$

D	[-]	Lagerungsdichte
n	[%]	Porenanteil bei natürlicher Lagerung
n_{max}	[%]	Porenanteil bei lockerster Lagerung
n_{min}	[%]	Porenanteil bei dichtester Lagerung

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (4)$$

I_D	[-]	relative Dichte
e	[-]	Porenzahl bei natürlicher Lagerung
e_{max}	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung
e_{min}	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung

Die Lagerungsdichte D sowie die relative Dichte I_D stellen keine Dichten im herkömmlichen Sinn dar. Vielmehr handelt es sich um Kenngrößen, mit denen es möglich ist, den Verdichtungszustand von Böden unter Kenntnis der natürlichen Porenzahl e sowie des natürlichen Porenanteils n zu unterscheiden. Tab. 1 zeigt den Zusammenhang zwischen relativer Dichte I_D und der Bodenlagerung nach ÖNORM EN 14688-1:2002.

Tab. 1: Bodenlagerung in Abhängigkeit der relativen Dichte I_D (ÖNORM EN 14688-1:2002)

Bezeichnung	Relative Dichte I_D [-]
sehr locker	0 - 0,15
locker	0,15 - 0,35
mitteldicht	0,35 - 0,65
dicht	0,65 - 0,85
sehr dicht	0,85 - 1,00

Angeregt durch dynamische oder statische Einwirkungen werden im Zuge der Verdichtung die einzelnen Mineralbestandteile des Bodens enger zusammengepackt. Infolge der Bodenkomprimierung stellt sich eine Verringerung der mit Wasser bzw. Luft gefüllten Porenräume ein, sodass die Lagerungsdichte zunimmt. Abb. 5 zeigt in einem idealisierten Gedankenmodell die Verdichtungswirkung auf Basis des Bodens als ein Dreiphasengemisch schematisch dargestellt.

unverdichteter Boden

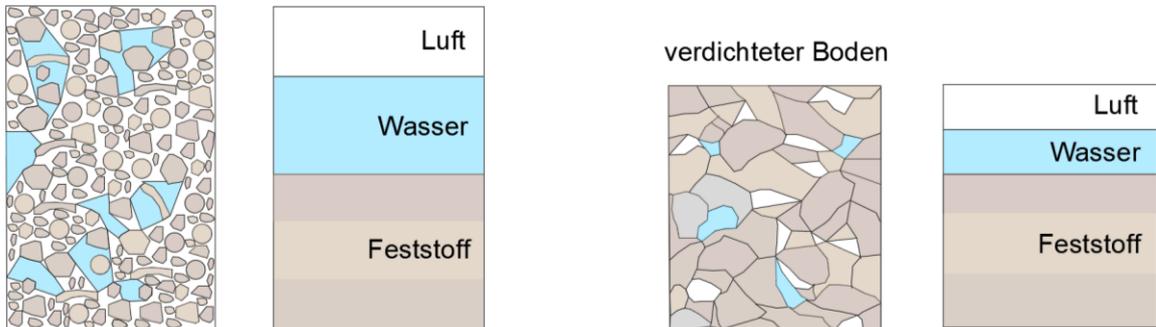


Abb. 5: Bodenverdichtung idealisiert dargestellt

Inwieweit sich ein Boden mit vertretbarem Aufwand verdichten lässt, wird maßgeblich durch dessen „verdichtungsfähige“ sowie dessen „verdichtungswillige“ Eigenschaften bestimmt (Simmer, 1994).

Einerseits die Korngrößenverteilung und andererseits die Kornabstufung können als einflussgebende Faktoren in Bezug auf die Verdichtungsfähigkeit des Bodens genannt werden. Je eher sich die Poren der groben Kornfraktion durch feine Bodenpartikel ausfüllen lassen, desto eher besitzt ein Boden die Fähigkeit sich verdichten zu lassen. Bei bindigen und feinkörnigen Böden ist dieser Vorgang durch die vorhandene Scherfestigkeit (Kohäsion c , Reibungswinkel φ) beeinflusst. Hingegen bestimmen bei grobkörnigen Böden neben innerer Reibungswiderstände der einzelnen Körner mögliche Gefügewiderstände, wie z. B. Verkeilungen oder Verzahnungen, die Verdichtungsfähigkeit. (nach Homann & Hüning, 1997)

Der Widerstand der einzelnen Bodenkörner gegenüber dem Verdichtungsprozess, d. h. der Verlagerung und Verschiebung in eine kompaktere Kornstruktur, wird als Verdichtungswilligkeit bezeichnet. Mit dem Wassergehalt wird der innere Reibungsverbund der Körnungen reduziert, wodurch die Verdichtungswilligkeit des Bodens bis zu einem optimalen Wert ansteigt. Bei grobkörnigen Böden verringert sich hingegen die Verdichtungswilligkeit mit größerer Ungleichförmigkeitszahl C_u und zunehmender innerer Reibung. (nach Homann & Hüning, 1997)

2.2.3 Verfahrens- und Gerätetechnik

Wesentliches Gerät bei der Rütteldruckverdichtung ist der Tiefenrüttler. Dieser setzt sich aus einem zylindrischen Stahlrohr mit kegelförmiger Spitze und einem Elektro- oder Hydraulikmotor zusammen, welcher die im unteren Teil des Tauchrüttlers befindlichen exzentrisch rotierenden Unwuchtmassen in Umdrehung versetzt (Abb. 6).

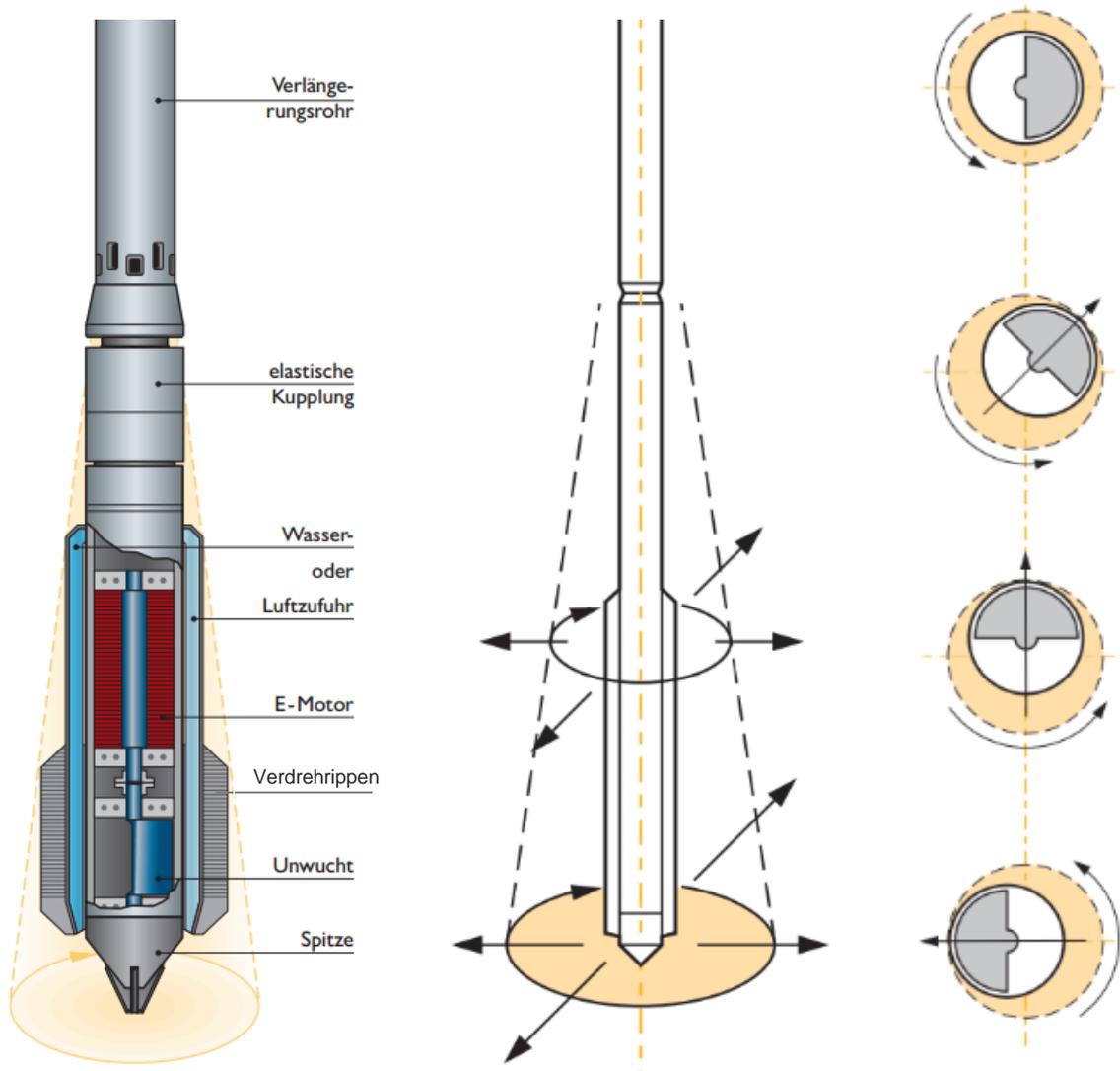


Abb. 6: Aufbau und Funktionsweise eines Tiefenrüttlers (Fa. Keller, 2004)

Die Abmessungen des Rüttlers variieren je nach Fabrikationsmodell und betragen im Durchmesser zwischen 0,3 m bis 0,4 m und in der Länge zwischen 2 m bis 3,5 m. Um den Einsatz in großen Tiefenlagen gewährleisten zu können, wird das im Durchschnitt zwischen 1,5 t bis 2,5 t schwere Vibrationsgerät mithilfe geeigneter Verlängerungsrohre auf die erforderliche Arbeitstiefe abgeteuft und dabei von speziellen Trägergeräten, den sogenannten Tragrapen, geführt. Als Verbindungsstück zwischen Rüttler und Verlängerungsrohr fungiert eine elastische Kupplung als dämpfende Vorrichtung um

eine etwaige Schwingungsübertragung auf die Aufsatzrohre zu verhindern. Die Energieversorgung des Rüttelmotors sowie die als Eindringhilfe benötigte Wasser- oder Luftzufuhr erfolgt ausgehend von der Geländeoberfläche über den hohlraumförmigen Querschnitt der Verlängerungsrohre. (nach Kirsch & Sondermann, 2001)

Tiefenrüttler können einerseits durch Elektromotoren, andererseits durch Hydraulikmotoren angetrieben werden, und die Leistung variiert je nach Modell zwischen 50 kW bis 150 kW. Der im oberen Bereich des Rüttlers liegende Antriebsmotor ist über eine gemeinsame vertikale Welle mit den in der Nähe der Rüttelspitze wirkenden Unwuchtmassen verbunden. (nach Kirsch & Sondermann, 2001)

Ausgehend von der exzentrischen Rotationsbewegung der Unwucht wird das Mantelrohr in Vibration versetzt und induziert auf den Boden eine horizontal wirkende Schlagkraft (Fliehkraft), welche bei Schwingungsfrequenzen von 25 Hz bis 60 Hz zwischen 150 kN bis 472 kN liegt. Eine infolge der Schlagkraft hervorgerufene Verdrehung des Rüttlers wird durch seitlich an den Mantelrohren angebrachte Flügel, den sogenannten Verdrehrippen, weitestgehend verhindert. (nach Fellin, 2000)

Ohne seitliche Behinderung beträgt die horizontale Schwingweite des Tiefenrüttlers zwischen 10 mm bis 30 mm, wodurch an der Rüttlerspitze Beschleunigungswerte von bis zu 500 m/s^2 erzielt werden (Kirsch & Sondermann, 2001). Nach Rodgers (1979) ist bereits eine kritische Beschleunigung von 5 m/s^2 ausreichend um die Strukturfestigkeit von grobkörnigen Böden zu überwinden und den Verdichtungsprozess einzuleiten.

Um den Eindringwiderstand des Bodens zu reduzieren und das Abteufen des Rüttlers zu ermöglichen, befinden sich an der Rüttlerspitze sowie im Bereich der Kupplung Öffnungen, aus denen Wasser oder Druckluft ausgepresst werden kann (nach Kirsch & Sondermann, 2001).

Die Vorgehensweise bei der RDV gliedert sich in 4 voneinander unabhängige Arbeitsschritte und ist in Abb. 7 schematisch dargestellt und im Folgenden erläutert:

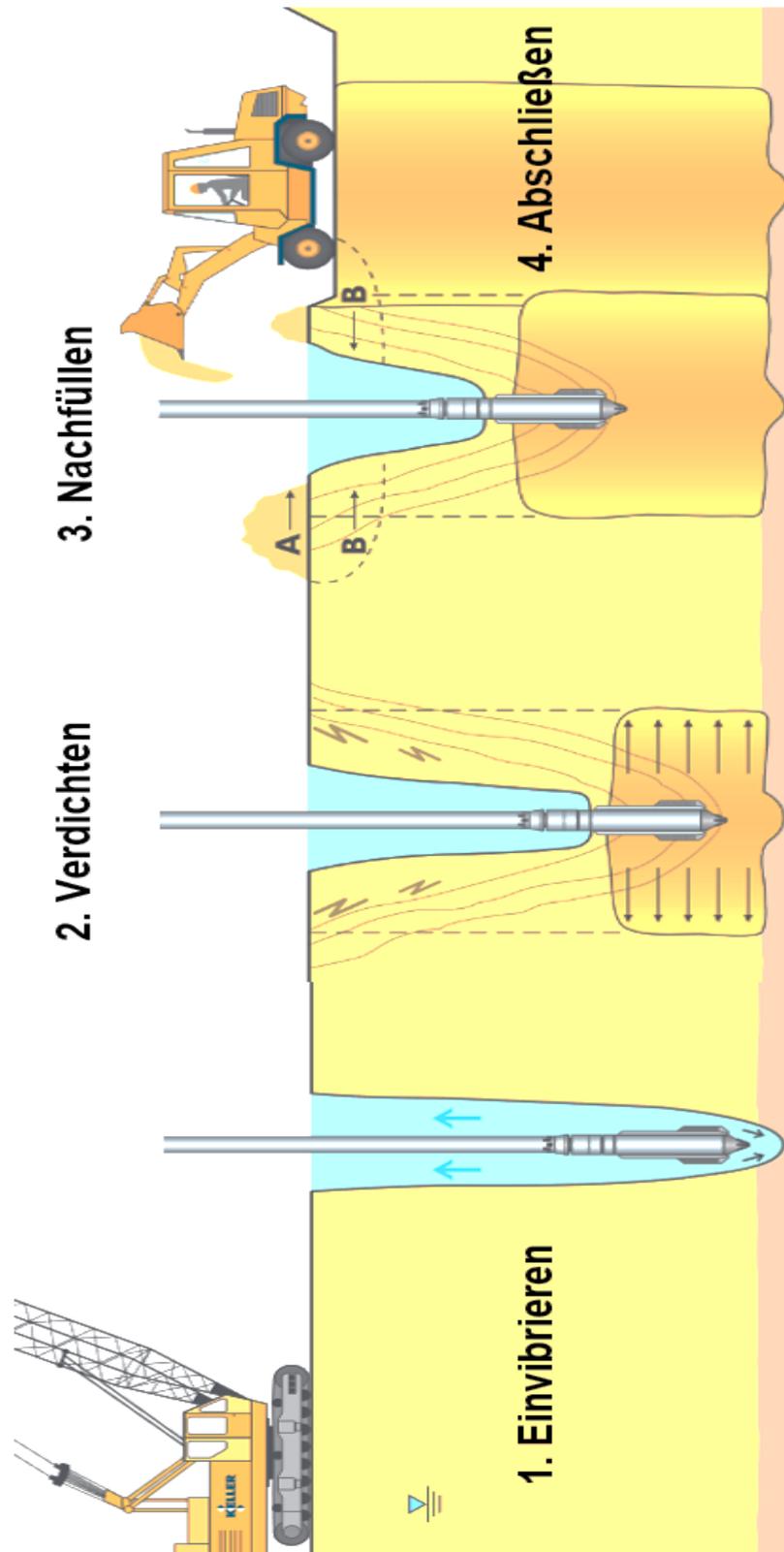


Abb. 7: Verfahrensweise der Rütteldruckverdichtung (Fa. Keller, 2004)

1. Einvibrieren:

Der am Trägergerät durch Verlängerungsrohre geführte Rüttler sinkt infolge dessen Eigengewicht und der Spülkraft des an der Rüttlerspitze austretenden Wasser- oder Luftstrahls bis zur geforderten Endtiefe ab (Simmer, 1994). Die Sinkgeschwindigkeit beträgt laut Fellin (2000) je nach Gewicht des Rüttlers samt Verlängerungsrohre, Menge der Luft- oder Wasserzugabe und der Bodenart zwischen 0,1 m/s bis 0,3 m/s. Durch den Einsatz einer Wasserspülung wird darüber hinaus gelöstes sowie gestörtes Bodenmaterial, welches sich im Ringraum zwischen Rüttlermantel und anstehendem Boden ansammelt, an die Geländeoberfläche gespült. Nach erreichter Absenktiefe werden die für den Versenkvorgang benötigten Eindringhilfen in der Regel abgeschaltet oder zumindest stark reduziert (Kirsch & Sondermann, 2001).

2. Verdichten:

Die Verdichtungswirkung erfolgt durch stufenweises Ziehen des Rüttelgeräts, wobei hinsichtlich zwei verschiedener Methoden zu differenzieren ist (nach Fellin, 2000):

- Der Rüttler verharrt für eine Wirkungszeit von 30 s bis 40 s in einer gewissen Tiefenstufe. Nach Ablauf dieser Zeit oder nach Erreichen eines für den Verdichtungserfolg vordefinierten Kriteriums, beispielsweise bei der Überschreitung eines festgelegten Grenzwerts für die Stromaufnahme oder des maximalen Öldrucks des Motors, erfolgt das Hochziehen des Vibrationsgeräts um 0,3 m bis 1,0 m in die nächste Tiefenstufe.
- Das Vibrationsgerät wird um den Betrag von 0,3 m bis 1,0 m gezogen und anschließend wieder um die halbe Ziehlänge versenkt. Der Wiederversenkvorgang wird solange durchgeführt, bis kein Eindringen des Rüttlers mehr möglich ist oder das vordefinierte Kriterium erreicht wird.

Unabhängig von der gewählten Verdichtungsmethode wird bei der RDV der Boden, ausgehend von der Vibrationswirkung des Tiefenrüttlers, in starke horizontale sowie vertikale Schwingungen versetzt. Durch die Partikelbeschleunigung wird der Reibungsverbund der Bodenkörner soweit aufgehoben bzw. reduziert, dass sich infolge des Bodeneigengewichts eine Strukturänderung mit entsprechender Dichteerhöhung einstellt. Dieser Umlagerungsprozess kann bei Böden oberhalb des Grundwasserspiegels durch die Beseitigung der Kapillarkohäsion mittels gezielter Wasserzugabe beim Rüttelvorgang positiv beeinflusst werden (nach Simmer, 1994).

Bei locker gelagerten wassergesättigten Böden wird eine kreisförmig um das Rüttelgerät auftretende Bodenverflüssigung als Ursache für die Kornumlagerung angeführt. Angeregt durch die dynamischen Schwingungsfrequenzen des Rüttlers, baut sich in den wassergesättigten Hohlräumen ein Porenwasserüberdruck auf, wodurch die effektiv wirkenden Korn-zu-Korn Spannungen stark reduziert bzw. gegebenenfalls aufgehoben werden. Die einzelnen Bodenteilchen befinden sich kurzzeitig in einem Zustand der Schwerelosigkeit und können mit geringster dynamischer Einwirkung in eine dichtere Lagerung gebracht werden. Die Bodenverflüssigung stellt sich jedoch nur dann ein, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Diesbezüglich wirken sich eine lockere Lagerung, eine vollständige Wassersättigung, geringe effektive Spannungen sowie eine eher rundere Kornform begünstigend aus. (nach Nenzda, 2006).

3. Nachfüllen:

Hervorgerufen durch die Volumenreduktion des Bodens kommt es an der Geländeoberkante (GOK) zu der Ausbildung eines Absenktrichters, dessen Tiefe von der Ausgangs- sowie der Endlagerungsdichte abhängt und zwischen 5 % bis maximal 15 % der Verdichtungstiefe variiert (Kirsch & Sondermann, 2001).

Die Auffüllung des Setzungstrichters erfolgt an der GOK durch eine auf die Korngrößenverteilung des Ausgangsbodens sowie auf den gewünschten Verdichtungsgrad abgestimmte Bodenkörnung. Ist das primäre Ziel der Baugrundverbesserung einen Boden mit möglichst geringer Porosität herzustellen, dann werden als Einbaumaterial jene Korngrößen zugegeben, mit denen die Porenräume des Ausgangsbodens gefüllt werden können. In Abhängigkeit der Ausgangslagerungsdichte und dem angestrebten Verdichtungsgrad beträgt das einzubringende Volumen der Zusatzkörnung 7,5 % bis 20 % des zu verdichtenden Erdkörpers (Simmer, 1994).

Sofern entstehende Setzungs- oder Sackungsmulden im oberflächennahen Bereich tolerierbar sind, kann die RDV auch ohne ergänzendes Kompensationsmaterial durchgeführt werden (Kirsch & Sondermann, 2001). Dabei ist während des gesamten Rüttelvorgangs ein ständiger Kontakt zwischen Vibrationsgerät und Boden sicherzustellen, da ansonsten keine Verdichtungsenergie in den Baugrund übertragen werden kann und somit der geforderte Verdichtungserfolg nicht zu gewährleisten ist (Nenzda, 2006). Aus diesem Grund ist bei der RDV ohne Materialzugabe auf ein ausreichendes Nachrutschen des oberflächennahen Erdreichs zu achten.

4. Abschließen:

Im oberflächennahen Bereich zwischen 0,3 m bis 1,5 m unter GOK erfolgt wegen der zu geringen vertikalen Auflast des Bodens keine ausreichende Verdichtungswirkung. Dieser Bereich wird anschließend mittels einer geeigneten Oberflächenverdichtung, wie beispielsweise mit Flächenrüttlern, Vibrationswalzen oder Fallplatten, nachverdichtet und abgezogen. (nach Fellin, 2000)

2.2.4 Eignung und Anwendungsgrenzen

Inwieweit Kornumlagerungen infolge dynamischer Einwirkung möglich sind, hängt von einer Vielzahl bodenspezifischer Faktoren ab. Die Kornverteilung sowie deren Abstufung, der Grad der Wassersättigung, aber auch die Form und Rauigkeit der Bodenkörner bestimmen die Strukturfestigkeit und die diesbezügliche Verdichtungsfähigkeit.

Der Anwendungsbereich der RDV erstreckt sich grundsätzlich auf grob- und gemischt-körnige Böden mit geringer Plastizitätszahl sowie auf Steine (Steffen, 1979). Mit zunehmender Größe der Bodenkörner wird das Absinken des Rüttlers in die gewünschte Tiefenstufe erschwert. Kantige Kornformen mit Längen größer als 50 mm können bei Häufung das Abteufen unmöglich machen (Fellin, 2000).

Einsatz findet die RDV oberhalb und auch unterhalb des Grundwasserspiegels. Nach Brown (1977) besitzen locker gelagerte Sande unterhalb des Grundwasserspiegels wegen der sich einstellenden Bodenverflüssigung besonders gute Verdichtungseigenschaften.

Der maximal zulässige Massenprozentsatz an Feinanteilen schwankt je nach Literatur zwischen 5 % (Fa. Keller, 2004) über 10 % (Kirsch & Sondermann, 2001) bis zu 20 % (Brown, 1977). Als Grund gilt der kohäsive Zusammenhalt (Haftfestigkeit) bindiger Bodenpartikel (Schluff bzw. Ton). Je höher der Anteil an Feinkörnigkeit eines grobkorndominierten Bodens ist, umso mehr wird der geforderte Kornumlagerungsprozess erschwert bzw. beeinträchtigt.

Darüber hinaus beeinflusst der Durchlässigkeitsbeiwert k des Bodens den gewünschten Verdichtungserfolg. Bei wassergesättigten Böden muss die Durchlässigkeit ausreichend hoch sein, um einen Ausgleich des beim Vibrationsprozess auftretenden Porenwasserüberdrucks zu ermöglichen. Andererseits verlangsamt eine zu hohe Durchlässigkeit das Absinken des Rüttlers in den gewünschten Tiefenbereich. Um den effizienten Einsatz der RDV gewährleisten zu können, sollte der Durchlässigkeitsbeiwert k des Bodens im Bereich 10^{-5} m/s bis 10^{-2} m/s liegen (Greenwood & Kirsch, 1983).

In der Baupraxis ist es oftmals zu zeitintensiv und unwirtschaftlich, in den verschiedenen Tiefenstufen repräsentative Bodenproben zu entnehmen und diese auf die Verdichtungsfähigkeit zu überprüfen. Der Einsatz von Ramm- oder Drucksondierungen sind eine Alternative, um die Verdichtbarkeit von Böden auf einfache Art und Weise beurteilen zu können. Abb. 8 zeigt Bereiche unterschiedlicher Verdichtungsfähigkeit in Abhängigkeit des von Drucksondierungen aufgezeichneten Spitzendrucks q_c und dem lokalen Reibungsverhältnis zwischen Mantelreibung f_s und Spitzendruck q_c .

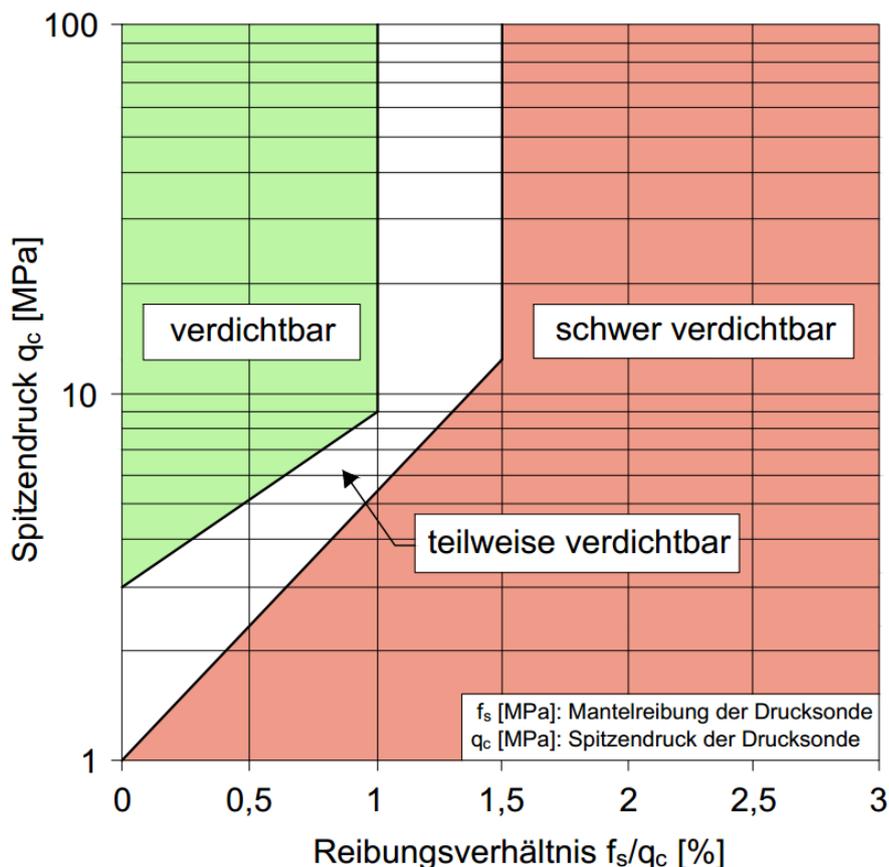


Abb. 8: Verdichtungsfähigkeit von homogenen Böden ausgehend von Drucksondierungen (nach Massarsch, 2016)

Liegt der Quotient aus gemessener lokaler Mantelreibung und Spitzendruck unter 1 % und beträgt der für die Tiefenstufe dazugehörige Spitzendruck zumindest 5 MPa, dann hat der Baugrund für die Anwendung der RDV eine ausreichende Verdichtungsfähigkeit. Böden mit einem Reibungsverhältnis größer als 1,5 % sind für die Eigenverdichtung nicht geeignet. (nach Massarsch, 2016)

2.2.5 Einflussfaktoren der Verdichtung

Das erreichte Verdichtungsergebnis und der dazu benötigte Verdichtungsaufwand sind als projektspezifische Größen anzusehen, da diese in Abhängigkeit von bodenspezifischen Randbedingungen aber auch von technischen Verfahrensparameter variieren. Abb. 9 zeigt eine schematische Darstellung der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Verdichtungsergebnis, die in weiterer Folge erläutert werden:

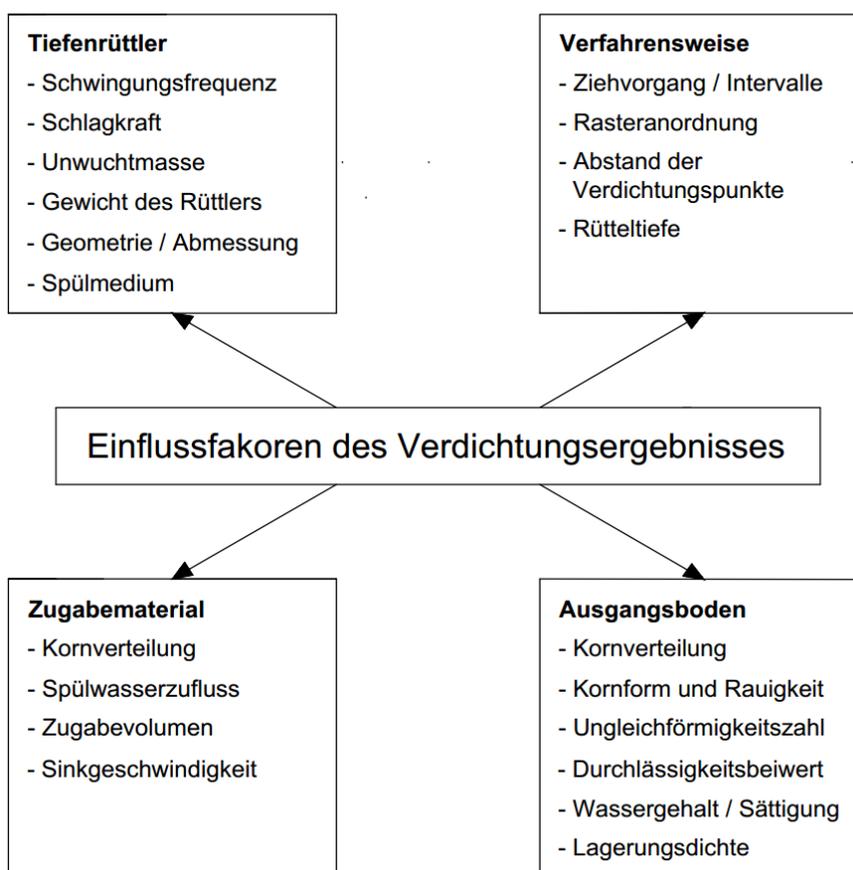


Abb. 9: Einflussfaktoren auf das Verdichtungsergebnis (nach Nenzda, 2006)

- **Tiefenrüttler:**

Bis dato lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsergebnis und dem dazu eingesetzten Vibrationsgerät mit dessen spezifischen Kennwerten, wie z. B. Gewicht, Schwingungsfrequenz, Schlagkraft, Geometrie etc., erkennen.

In der Baupraxis hat sich aber als äußerst wirkungsvoll herausgestellt, sowohl Sande als auch Kiese mit Rüttelfrequenzen nahe deren Eigenfrequenz zu penetrieren. Daher ist es am zweckmäßigsten, grobkörnige Böden mit relativ niedrigen Frequenzen zwischen 25 Hz bis 30 Hz und gegebenenfalls noch deutlich darunter zu verdichten. (nach Kirsch & Sondermann, 2001)

Eine von der Firma Bauer Spezialtiefbau im Jahr 1983 durchgeführte Versuchsreihe bei schwach kiesigen Sanden zeigt, dass stärkere Rüttler mit größerer horizontaler Schlagkraft (Fliehkraft der exzentrisch rotierenden Unwucht) bessere Verdichtungsleistungen in der Nähe des Rüttelzentrums bewirken, jedoch im Gegensatz zu Vibrationsgeräten mit reduzierter Schlagkraft geringere Reichweiten erzielen. Selbiges Phänomen gilt auch für die Schwingungsfrequenz des Rüttlers. Erhöhte Frequenzen bewirken eine zunehmende Verdichtung im Bereich der Rüttlerachse, jedoch eine verminderte Reichweite. (nach Fellin, 2000)

Dieser Zusammenhang konnte von Brown (1977) nicht eindeutig belegt werden. Dieser erzielte bei seinen Versuchen in sandigen Böden mit stärker werdender horizontaler Schlagkraft höhere Verdichtungsgrade sowie größere Reichweiten.

In der Literatur finden sich zahlreiche Theorien die den Einfluss des Rüttlers auf die Verdichtung des Bodens erklären und zu beweisen versuchen, jedoch mit mäßigem Erfolg. Dahingehend ergeben sich für die Baupraxis noch keine direkten Zusammenhänge hinsichtlich der spezifischen Rüttlerkennwerte (wie z. B. Gewicht, Frequenz, Schlagkraft) und der damit erreichbaren Verdichtungswirkung. Die Wahl des geeigneten Vibrationsgeräts sowie die Festlegung der maschinentechnischen Parameter sind im Allgemeinen von firmeninternen Faktoren abhängig, erfolgen jedoch in den meisten Fällen auf empirischer Grundlage. Für eine optimale Auswahl der einzusetzenden Gerätschaften werden bei größeren Bauvorhaben im Vorhinein insitu Testreihen mit dem zu verdichtenden Boden durchgeführt.

- Verfahrensweise:

Der eigentliche Verdichtungsprozess beginnt erst nach dem Abteufen des Vibrationsgeräts bis zur gewünschten Endtiefe. Die Wirkungsdauer des in einer gewissen Tiefenstufe verharrenden Rüttlers sowie die Abschnitte, mit denen das Vibrationsgerät stufenweise gezogen wird, bestimmen den Verdichtungserfolg maßgebend. Jene in der Baupraxis vorzugsweise zur Anwendung kommenden Methoden sind in Kapitel 2.2.3 detailliert beschrieben. In Abhängigkeit der geforderten Dichteerhöhung sowie dem Wirkungsradius des Tiefenrüttlers, beeinflussen Abstand sowie Geometrie der Rüttleransatzpunkte das Verdichtungsergebnis. Mögliche Verdichtungs raster und deren erreichbare Lagerungsdichten werden in Kapitel 2.2.6 vorgestellt.

- Zugabematerial:

Der Verdichtungsergebnis wird weiters durch das verwendete Einbaumaterial, das während des Rüttelvorgangs in den Absenkrichter zugegeben wird, bestimmt. Prinzipiell eignen sich jegliche Sand- und Kiesgemische, aber auch gebrochene Steine oder Asche sind als Zugabematerial einsetzbar (Brown, 1977). Um eine zielführende Bodenverdichtung gewährleisten zu können, sollte das Zugabematerial jene Korngrößen aufweisen, die dem anstehenden Boden fehlen. Jedoch sind an das Verfüllmaterial auch gewisse Anforderungen zu stellen, weshalb im Vorhinein zu überprüfen ist, ob die jeweilige Zugabekörnung für den vorgesehenen Verwendungszweck überhaupt geeignet ist. In Kapitel 2.2.7 wird ein Bewertungskriterium für die Auswahl eines optimalen Einbaumaterials vorgestellt.

- Ausgangsboden:

Besteht der anstehende Baugrund zu einem hohen Massenprozentsatz aus Feinanteilen (Schluff, Ton), so hat dies einen maßgeblichen Einfluss auf das Verdichtungsergebnis. Feinkörnige Bodenpartikel verursachen einerseits eine Dämpfung der Vibrationswirkung, andererseits verkleben diese Sand- bzw. Kieskörner und behindern somit die für die Umlagerung notwendige Relativverschiebung zwischen den einzelnen Bodenbestandteilen. Sind in gewissen Bodenschichten Feinanteile eingelagert, werden diese durch das beim Abteufen des Rüttlers eingesetzte Spülwasser gelöst und gelangen mit diesem auch in sandige oder kiesige Bodenbereiche. Als Folge nimmt die Verdichtungsfähigkeit der jeweiligen Bodenschicht aufgrund des erhöhten Feinkornanteils ab. (nach Fellin, 2000)

Liegt der Grundwasserspiegel sehr tief oder setzt sich der Boden hauptsächlich aus Kies oder dicht gelagertem Sand zusammen, führt dieses zur Reduktion der Einsinkgeschwindigkeit des Rüttlers und das Verfahren wird unwirtschaftlich (Fellin, 2000).

2.2.6 Wirkungsradius und Ausführungsraster

Die Verdichtungswirkung des verwendeten Rüttlers reduziert sich im Allgemeinen mit zunehmendem Abstand vom Rüttelzentrum. Der maximale noch von der Vibrationswirkung des Rüttlers erreichbare Abstand wird als Einflussbereich bezeichnet. So weit ist es gerade noch möglich, eine minimale Erhöhung der Lagerungsdichte im Vergleich zum unverdichteten Boden zu erzielen. Der Wirkungsradius des Rüttlers ist hingegen der Bereich, innerhalb dem die geforderte Dichteerhöhung des Bodens nicht unterschritten wird. (nach Fellin, 2000)

Abb. 10 verdeutlicht den grundlegenden Unterschied zwischen Wirkungsradius und Einflussbereich des Rüttlers in Bezug auf den Lagerungszustand des Bodens:

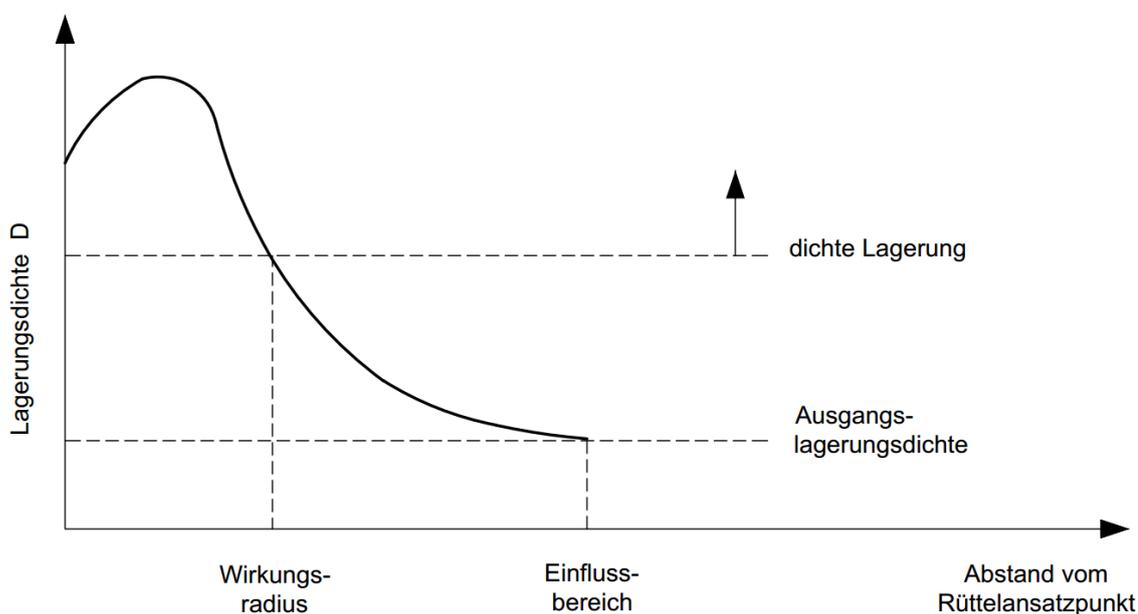


Abb. 10: Qualitativer Verlauf von Einflussbereich und Wirkungsradius (Fellin, 2000)

Als primäre Einflussfaktoren auf den Wirkungsradius eines Rüttlers gelten die geforderte Endlagerungsdichte sowie der eingesetzte Gerätetyp mit dessen spezifischen Kennwerten, wie v. a. Frequenz, Schlagkraft, Gewicht und Geometrie.

Um einen Baugrund zu verdichten, werden in mehreren Punkten (Verdichtungspunkte) eines gewählten Rasters Verdichtungen durchgeführt. Die Konzeption des Verdichtungsrasters erfolgt in der Regel in Abhängigkeit vom jeweiligen Wirkungsradius des Rüttlers sowie dem weiteren Verwendungszweck des Baugrunds.

Für großflächige Gründungen setzt sich das Verdichtungsrastrer häufig aus aneinandergereihten gleichseitigen Dreiecken (Abb. 11) zusammen, wobei quadratische oder rechteckige Rastrer (Abb. 12) vorwiegend bei Verdichtungsarbeiten unter Einzelfundamenten eingesetzt werden. (nach Fellin, 2000)

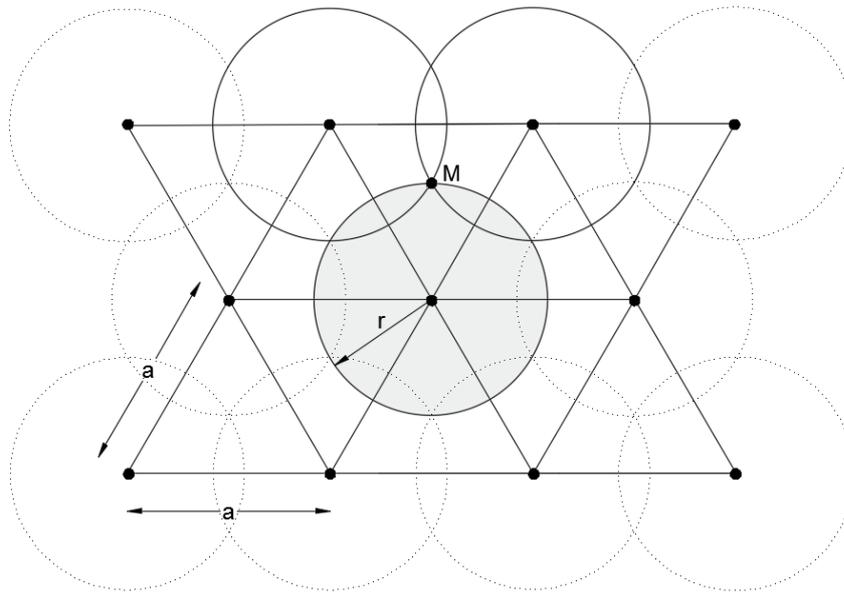


Abb. 11: Dreieckiges Verdichtungsrastrer und Wirkungsflächen (nach Nenzda, 2006)

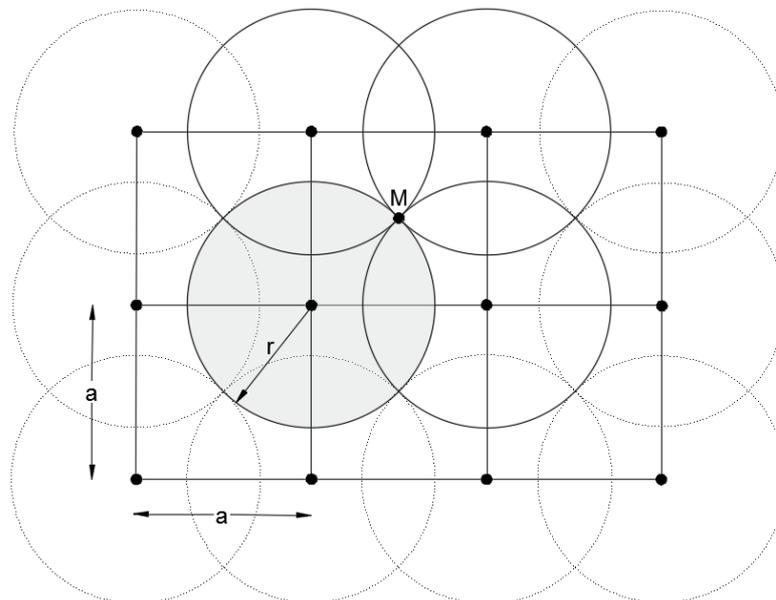


Abb. 12: Quadratisches Verdichtungsrastrer und Wirkungsflächen (nach Nenzda, 2006)

D'Appolonia (1953) stellt ein Verfahren vor, um die Konzeption des Verdichtungsrastrers der geforderten Dichteerhöhung optimal anzupassen. Dabei wird für das gewählte Rastrer jener Punkt bestimmt, der den größten Abstand r zu den umgebenden Verdich-

tungspunkten (Rüttleransatzpunkte) aufweist. In der Regel ist das der Mittelpunkt M von dreiecksförmigen oder quadratischen Rasterfiguren. (nach Fellin, 2000)

Der maximale Abstand r zwischen einem Verdichtungspunkt und dem jeweiligen Zentrum (Mittelpunkt) der Rasterfigur ergibt sich wie folgt (Nendza, 2006):

$$\text{dreieckiges Raster: } r = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5) \quad \text{quadratisches Raster: } r = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

r [m] Abstand der Verdichtungspunkte zum Mittelpunkt der Rasterfigur

a [m] Abstand der Verdichtungspunkte zueinander

Grundlage für die Anwendung dieses Verfahrens ist die Kenntnis über die Verdichtungswirkung des eingesetzten Rüttlers in unterschiedlichen Reichweiten vom Ansatzpunkt entfernt. Um beispielsweise die Verdichtung in Punkt M (Abb. 11 + 12) abschätzen zu können, muss zuerst die Dichteerhöhung durch einen Einzerrüttler im Abstand r (Abb. 11 + 12) von dessen lotrechter Geräteachse bestimmt werden. Multipliziert man die auf die Ausgangslagerungsdichte des Bodens bezogene Dichteerhöhung eines Einzerrüttlers mit der Anzahl der auf den Mittelpunkt M wirkenden Rüttler (Dreieck: 3 bzw. Quadrat: 4), ergibt das annähernd die zu erwartende Dichtungserhöhung im Punkt M. (nach Fellin, 2000)

Die Schwierigkeit besteht darin, dass für jedes Bauvorhaben eine gewisse Anzahl von Proberüttelungen notwendig ist, um die bodenabhängige Verdichtungswirkung des zum Einsatz kommenden Rüttlers evaluieren zu können. Als positiver Aspekt bei der Verwendung dieses Verfahrens gilt, dass ausschließlich durch die Kenntnis der Verdichtungswirkung eines Einzerrüttlers, auf die benötigte Rastergeometrie hochgerechnet werden kann. (nach Fellin, 2000)

Der von einem Verdichtungspunkt ausgehende Wirkungsbereich eines Rüttlers wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Einerseits die vorherrschende Bodenart und die geforderte Dichteerhöhung, andererseits die technischen Betriebsparameter des zur Anwendung kommenden Vibrationsgeräts sind hinsichtlich der erzielbaren Wirkungsweite entscheidend. Bei herkömmlichen Rasteranordnungen variieren die Abstände der Rüttleransatzpunkte zwischen 1,5 m bis 3,3 m (Fellin, 2000).

Abb. 13 veranschaulicht für verschiedene Bodenarten und Gerätetypen empirische Werte bezüglich dem Rüttlerabstand und erreichbarer relativer Lagerungsdichte I_D . Die Verdichtungspunkte sind als gleichseitige Dreiecke mit dem Abstand a (Abb. 11) zueinander angeordnet. Die dargestellten relativen Lagerungsdichten I_D beziehen sich auf das Zentrum (Mittelpunkt) des Rütteldreiecks und auf eine Ausgangslagerungsdichte I_D von 50 %.

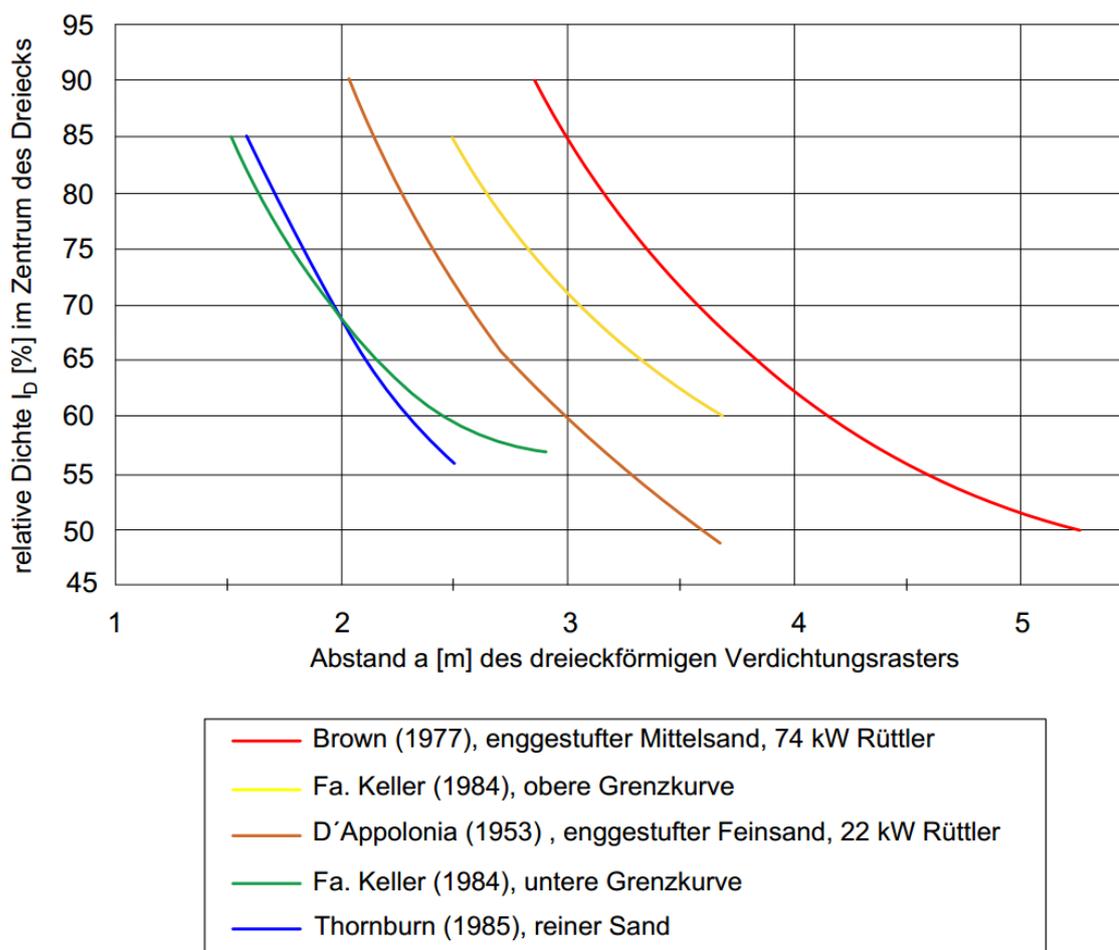


Abb. 13: Relative Lagerungsdichte I_D in Abhängigkeit vom Rüttlerabstand (nach Fellin, 2000)

Die von den jeweiligen Autoren mit großen Differenzen dokumentierten Wirkungsbereiche sind einerseits durch die abweichenden Maschinenparameter, andererseits durch die unterschiedlichen Bodenparameter zu erklären. Aus diesem Grund ist eine Vergleichbarkeit sowie Überprüfbarkeit nicht gegeben. Aufgrund der äußerst komplexen Boden-Rüttler Interaktion und der unzureichenden Kenntnis über die Wirkungs- und Einflussbereiche der Tiefenrüttler basiert die Konzeption von Ausführungsrastern bis dato weitestgehend auf der Grundlage empirischer Anhaltswerte. Um die örtlichen Verfahrensparameter dennoch in die Ausführungsplanung miteinzubeziehen, werden im Vorfeld größerer Bauvorhaben in der Regel insitu Verdichtungsversuche durchgeführt.

2.2.7 Einbau- und Verfüllmaterial

Um die ständige Interaktion zwischen Rüttler und Boden sicherzustellen, wird das an der GOK lagernde Einbaumaterial kontinuierlich in den entstehenden Setzungstrichter zugegeben. Dabei muss gewährleistet sein, dass ausreichend Zugabematerial entlang der Verlängerungsrohre bis zur Rüttlerspitze nachfließt, um dort mit dem anstehenden Baugrund verdichtet zu werden. Ein zu grobkörniges Zugabematerial verkeilt sich im Ringspalt zwischen Verlängerungsrohr und dem anstehenden Boden und behindert stetigen Materialfluss zur Rüttlerspitze. Ein hingegen zu feinkörniges Zugabematerial kann im aufströmenden Spülwasser, das gegebenenfalls als Eindringhilfe zum Abteufen des Rüttlers verwendet wird, nicht bis zur Endtiefe absinken. Die nachfließende Materialmenge, welche tatsächlich bei der Rüttlerspitze ankommt, ist primär abhängig von der Korngröße sowie der Kornabstufung des Zugabematerials. Aus diesem Grund führt Brown (1977) eine Eignungszahl E zur Bewertung der Einbaukörnung an:

$$E = 1,7 \cdot \sqrt{\frac{3}{(d_{50})^2} + \frac{1}{(d_{20})^2} + \frac{1}{(d_{10})^2}} \quad (7)$$

E	[-]	Eignungszahl
d_{20}	[mm]	Korndurchmesser bei 20 Massen-%
d_{20}	[mm]	Korndurchmesser bei 20 Massen-%
d_{10}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 Massen-%

Tab. 2: Bewertung des Zugabematerials (nach Brown, 1977)

Eignungszahl E	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	> 50
Bewertung	sehr gut	gut	mittelmäßig	schlecht	unbrauchbar

Durch die Eignungszahl E kann abgeschätzt werden, in welcher Menge und mit welcher Geschwindigkeit das Zugabematerial im aufströmenden Spülwasserfluss absinkt. Je geringer die Eignungszahl E ist, desto positiver sind die Eigenschaften der Einbaukörnung, um bis zur Rüttlerspitze nachzufließen und dort mit dem anstehenden Baugrund verdichtet zu werden. Nach Brown (1977) ergibt sich mit geringerer Eignungszahl E , einerseits eine bessere Verdichtungsleistung, andererseits besteht durch das schnelle Absinken die Option den Ziehvorgang des Rüttlers zu beschleunigen.

2.2.8 Verdichtungskontrolle und Qualitätssicherung

Da mittels Rütteldruckverfahren mitunter Tiefen von bis zu 25 m verdichtet werden, gibt es derzeit noch keine direkte Kontrollmöglichkeit, die erzielte Dichteerhöhung eines grobkorndominierten Bodens zu messen. Um dennoch qualitative Aussagen über den aktuellen Verdichtungszustand in gewissen Tiefenstufen machen zu können, werden indirekte Überprüfungsmethoden herangezogen. Die Beurteilung des Verdichtungserfolgs gliedert sich grundsätzlich in zwei Schritte, einerseits die Eigenüberwachung, welche während des Rüttelvorgangs durchzuführen ist, andererseits die Begutachtung nach erfolgter Verdichtung, der sogenannten Kontrollprüfung.

Folgende Parameter werden in der Regel während dem Verdichtungsprozess aufgezeichnet und dokumentiert (Steffen, 1979):

- Qualität und Korngrößenverteilung des Einbaumaterials
- Menge des Einbaumaterials je Rüttelpunkt
- Herstellungsdauer jedes einzelnen Verdichtungspunkts
- Relevante Maschinenparameter, wie z. B. Stromstärke oder Öldruck
- Energieverbrauch je Verdichtungspunkt
- Verdichtungstiefe bzw. etwaige Leerstrecken

Die Aufzeichnungen sowie Dokumentationen o. g. Parameter sind pro Verdichtungspunkt zu führen und für die Kontrolle des Verdichtungserfolgs entscheidend. Die ermittelten Parameter dürfen nur in zusammenhängender Weise für die Beurteilung der erzielten Bodenverdichtung herangezogen werden. Allerdings kann es zu Widersprüchen zwischen den Ergebnissen, die aus den o. g. gemessenen Werten gefolgert werden, und den tatsächlichen Verdichtungsresultaten kommen (Nendza, 2006).

Laut Fellin (2000) liefern die notwendige Stromaufnahme sowie der erreichte Öldruck des Rüttelmotors nur einen unzureichenden Aufschluss über die erzielte Bodenverdichtung.

Nach ÖNORM EN 14731:2005 kommen für die Verdichtungskontrolle folgende insitu Prüfungen zur Anwendung:

- Drucksondierungen (CPT und CPTU)
Aufzeichnung des Spitzenwiderstands, der Mantelreibung sowie etwaiger Porenwasserdrücke
- Rammsondierungen (DP)
Aufzeichnung des Eindringwiderstands
- Dilatometerversuche (DMT)
Bestimmung des Dilatometermoduls
- Pressiometerversuche (PMT)
Bestimmung des Ménard-Steifemoduls und des Grenzdrucks
- Standardpenetrationstests (SPT)
Bestimmung des Eindringwiderstands

Die Auswahl der Verdichtungskontrolle ist vom Ziel der Baugrundverbesserung sowie von der vorherrschenden Bodenart abhängig. Nach ÖNORM EN 14731:2005 ist bei der Anwendung der o. g. Kontrollmethoden darauf zu achten, dass ein Vergleich der vor und der nach Baugrundverbesserung ermittelten Kenngrößen nicht zwingend den tatsächlichen Erfolg der Baugrundverbesserung widerspiegelt.

Die Verdichtungskontrollen erfolgen grundsätzlich an jenen Punkten des Verdichtungs-rasters, welche einen maximalen Abstand zu den benachbarten Verdichtungs-punkten aufweisen, d. h. im Zentrum (Mittelpunkt) der dreiecksförmig oder quadratisch angeordneten Rüttleransatzpunkte (Fellin, 2000).

Des Weiteren ist bei der Beurteilung der Sondierergebnisse darauf zu achten, dass die Festigkeitseigenschaften von verdichteten Sanden und Kiesen je nach Zeitpunkt der Messung Unterschiede von 50 bis 100 % aufweisen (Kirsch & Sondermann, 2001). Oft werden die tatsächlichen Schlagzahlen oder Spitzendrücke bei Ramm- bzw. Drucksondierungen erst nach einigen Tagen oder mehreren Wochen nach dem Verdichtungsprozess erreicht. Kirsch & Sondermann (2001) führen dieses Phänomen auf den zeitabhängigen Abbau des durch die Verdichtung entstandenen Porenwasserüberdrucks sowie auf die Wiederherstellung physikalischer und chemischer Bindungskräfte im Korngerüst zurück. Aufgrund dieser abzuwartenden Festigkeitssteigerung ist es durchaus sinnvoll, etwaige Verdichtungskontrollen frühestens 7 Tage nach erfolgter RDV durchzuführen (Kirsch & Sondermann, 2001).

Eine Online-Verdichtungskontrolle während dem Rüttelvorgang wurde von Fellin (2002) erprobt. Der grundlegende Gedanke dieser Methode besteht darin, dass eine durch die Verdichtung hervorgerufene Eigenschaftsveränderung des Bodens, z. B. die Erhöhung der Lagerungsdichte, sich unmittelbar auf die Rüttlerbewegung auswirkt. Diese in der Theorie durch unzählige physikalische und bodendynamische Versuche bestätigte Methode bleibt bis dato in der Baupraxis unberücksichtigt.

Intensive Forschungstätigkeiten hinsichtlich der komplexen Rüttler-Boden-Interaktion und einem daraus ableitbaren Zusammenhang in Bezug auf das Verdichtungsergebnis werden derzeit am Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam durchgeführt.

3 Wasserdurchlässigkeit von Böden

3.1 Grundwasserströmung

Liegt eine Bodenschicht unterhalb des Grundwasserspiegels, sind die Porenräume des Korngerüsts nahezu vollständig mit Wasser gefüllt. Hervorgerufen durch die örtlichen Potentialunterschiede stellt sich zwischen den wassergesättigten Poren, die durch Porenkanäle miteinander verbunden sind, eine Grundwasserströmung ein.

Hinsichtlich der Beurteilung von unterirdischen Strömungsvorgängen bedarf es der einheitlichen Definition des Begriffs Geschwindigkeit. Im Allgemeinen wird dabei zwischen der Abstandsgeschwindigkeit v_a und der Filtergeschwindigkeit v differenziert. Abb. 14 zeigt jedoch zuerst die tatsächliche im Bodenkörper vorherrschende Partikelgeschwindigkeit v_a . Durch die Mittelung der über den gesamten Porenraum in unterschiedlicher Größe wirkenden Geschwindigkeitsvektoren, erhält man die Abstandsgeschwindigkeit v_a (Abb. 15). Die Aufrechnung der Partikelgeschwindigkeit v_a auf die gesamte Querschnittsfläche der betrachteten Bodenschicht, ergibt die Filtergeschwindigkeit v (Abb. 16). Diese gibt die Durchflussmenge Q pro Querschnittsfläche des durchströmten Bodens an. In der Bodenmechanik und im Grundbau wird die vorhandene Durchflussmenge eines Bodenkörpers maßgeblich für die Beurteilung von Grundwasserströmungen herangezogen, weshalb es sich zur Vereinheitlichung eingebürgert hat, mit der Filtergeschwindigkeit v zu rechnen. (nach Kolymbas, 2007)

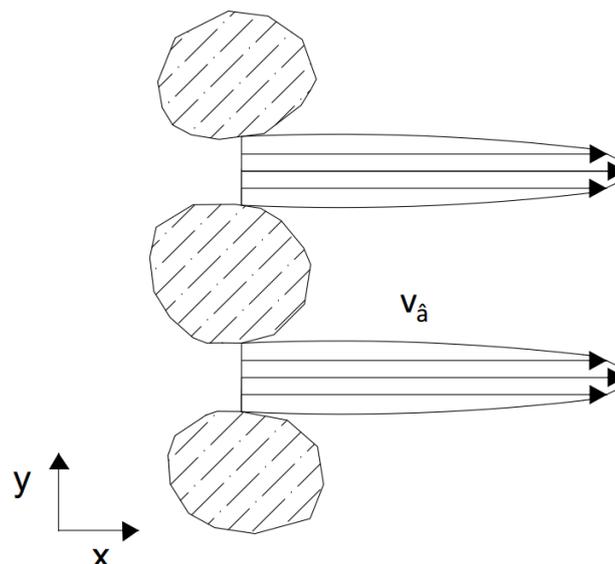


Abb. 14: Geschwindigkeitsvektoren der Partikelgeschwindigkeit v_a (nach Kolymbas, 2007)

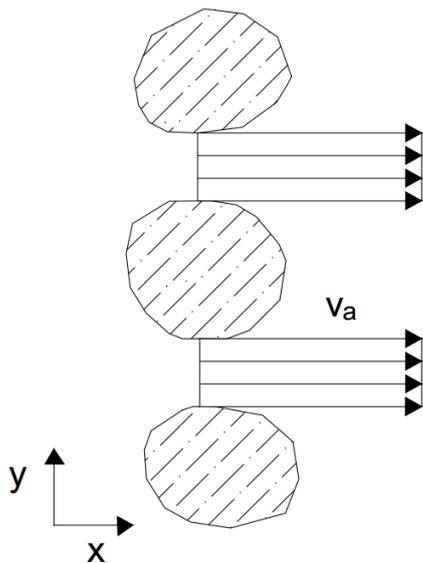


Abb. 15: Über den Porenzwischenraum gemittelte Abstandsgeschwindigkeit v_a (nach Kolymbas, 2007)

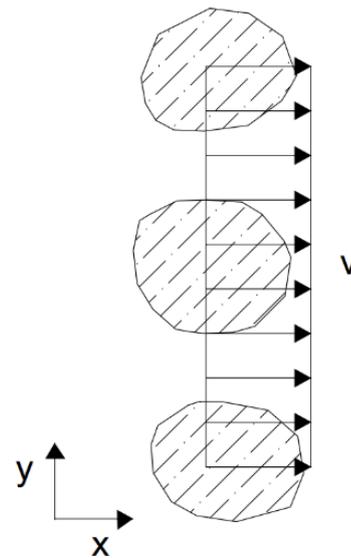


Abb. 16: Auf den gesamten Querschnitt aufgerechnete Filtergeschwindigkeit v (nach Kolymbas, 2007)

Tonig- schluffige Bodenschichten werden wegen der eingeschränkten Bewegungsfreiheit des Wassers, als Grundwasserstauer bezeichnet. Grundwasserleiter sind hingegen durchlässigere Bodenschichten (v. a. Sande, Kiese, Steine) in denen sich das Grundwasser leicht transportieren lässt.

3.1.1 Filtergesetz von Darcy und dessen Gültigkeitsbereich

Im Jahr 1856 stellt Henry Darcy, ausgehend von unzähligen Durchströmungsversuchen an Grob- bis Mittelsanden, einen linearen Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v und dem hydraulischen Gefälle i fest (Abb. 17). Die Abhängigkeit einer linearen, eindimensionalen Strömung infolge der Gravitation, wird als Darcy'sches Gesetz bezeichnet (Schenk, 1967):

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

v	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
i	[-]	hydraulischer Gradient
Δh	[m]	Potentialunterschied
Δl	[m]	durchströmte Fließlänge
Q	[m ³ /s]	Durchflussvolumen je Zeiteinheit
A	[m ²]	Querschnittsfläche des Bodens

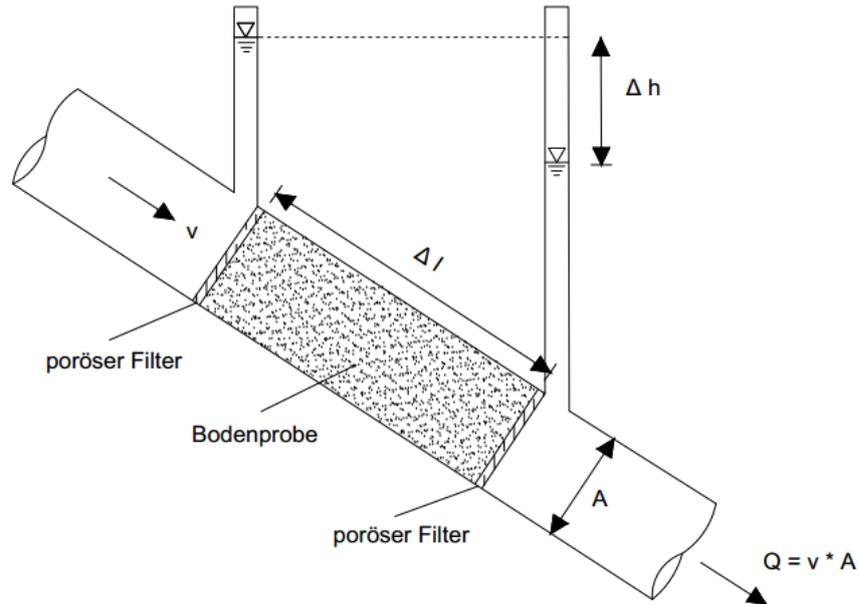


Abb. 17: Versuchsanordnung von Darcy: Prinzipskizze zur Glg. (8) (nach Kolymbas, 2007)

Darcy definiert die Filtergeschwindigkeit v als Verhältnis von Durchfluss Q zu der durchströmten Querschnittsfläche A des Bodens. Die über den gesamten Bodenquerschnitt als konstant angenommene Geschwindigkeit entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit des Wassers. Durch die berechnete Filtergeschwindigkeit v wird die Geschwindigkeit wiedergegeben, welche das Wasser bei einer geradlinigen Durchströmung durch den Bodenkörper hätte. Die tatsächlichen vom Wasser durchfließbaren Strombahnen verlaufen jedoch nicht geradlinig durch den Bodenkörper hindurch (Abb. 18), sondern bestehen aus unregelmäßig gekrümmten sowie teilweise geteilten Kanälen mit ständig veränderlichem Durchmesser (nach Rieß, 2001).

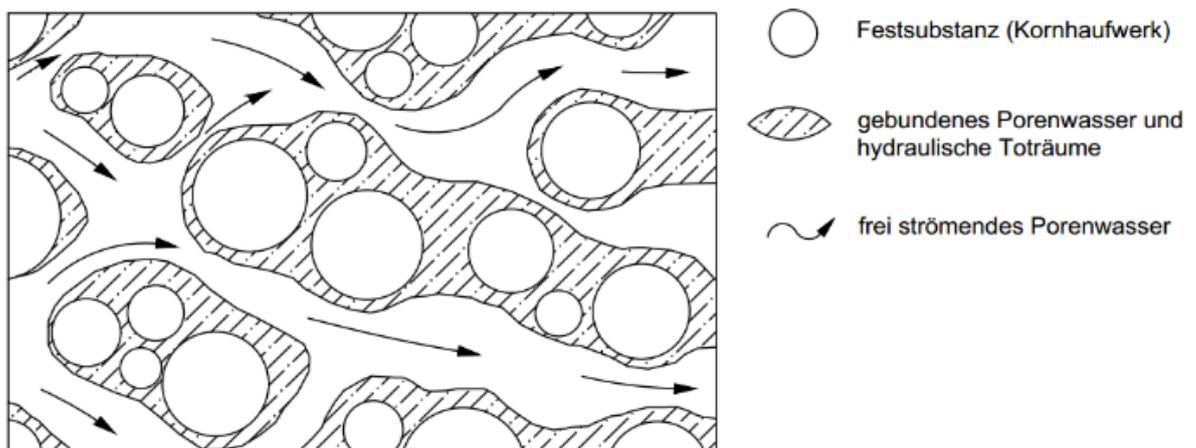


Abb. 18: Tatsächlich vom Wasser durchströmte Wegstrecken in einem Kornhaufwerk (nach Lehnert 1993; nach Rieß, 2001)

Der für das Wasser zur Verfügung stehende Fließquerschnitt stellt nur einen Bruchteil des gesamten Bodenquerschnitts A dar. Die Ausbildungsformen der durchströmbareren Porenkanäle sind einerseits von der Lagerungsdichte, andererseits von der Größe sowie Form der Bodenkörner abhängig. Infolge der Oberflächenspannung zwischen den Bodenkörnern im Porenraum haftendes Adsorptions- oder Kapillarwasser verringern die Weiten der Porenkanäle zunehmend. Der Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Porengeschwindigkeit, als Abstandsgeschwindigkeit v_a bezeichnet, und der Filtergeschwindigkeit v ergibt sich durch die Berücksichtigung des durchströmbareren Porenanteils n_w wie folgt (Beyer, 1967):

$$v_a = \frac{v}{n_w} = \frac{Q}{n_w \cdot A} \quad (9)$$

v_a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit
v	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
n_w	[-]	durchströmbarer Porenanteil
Q	[m ³ /s]	Durchflussvolumen je Zeiteinheit
A	[m ²]	Querschnittsfläche des Bodens

Richtwerte für den durchströmbareren Porenanteil n_w können in Abhängigkeit der Bodenart und des Gesamtporenanteils n der Tab. 3 entnommen werden:

Tab. 3: Durchströmbarer Porenanteil n_w (nach Busch et al. 1993)

Bodenart	Gesamter Porenanteil n [-]	Durchströmbarer Porenanteil n_w [-]
Kies, sandig	0,25 - 0,35	0,20 - 0,25
Sand, kiesig	0,28 - 0,35	0,15 - 0,20
Sand	0,30 - 0,38	0,10 - 0,20
Sand, schluffig	0,33 - 0,40	0,08 - 0,12
Schluff, sandig	0,35 - 0,45	0,05 - 0,10
Schluff, tonig	0,40 - 0,55	0,03 - 0,08
Ton, schluffig	0,45 - 0,65	0,02 - 0,05

Die Anwendung der Darcy-Glg. (8) ist auf laminare Strömungsvorgänge beschränkt. Bei einem Übergang in turbulente Strömungsverhältnisse beeinflussen nichtlineare Effekte, wie z. B. Reibungs-, Trägheits- sowie Oberflächenkräfte, die Strömung und das Gesetz verliert seine Gültigkeit. Der vorherrschende Strömungszustand wird maßgeblich durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers beeinflusst. Des Weiteren be-

stimmt der hydraulische Gradient die Strömung. Mit zunehmendem hydraulischen Gradienten erhöht sich die Fließgeschwindigkeit und die Grundwasserströmung geht mehr und mehr in turbulente Verhältnisse über. Abb. 19 zeigt die Anwendungsbereiche des Darcy'schen Gesetzes in Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten und der Strömungsgeschwindigkeit. Die Gültigkeitsbereiche nach Abb. 19 gelten für grobkörnige Böden, wie v. a. Mittel- bis Grobsande und Kiessande. (nach Lang, 2008)

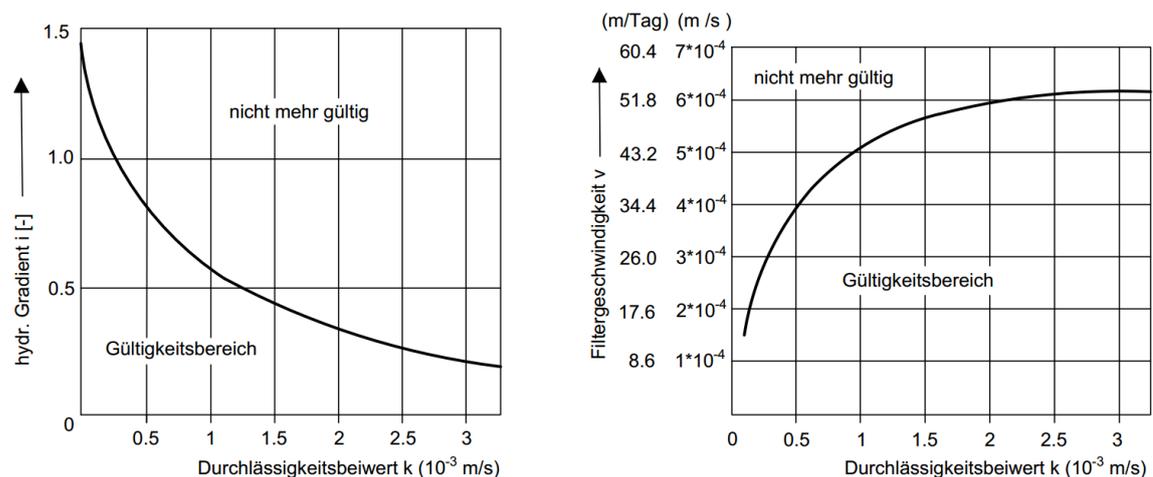


Abb. 19: Anwendungsgrenzen der Glg. (8) (nach Baumgartner & Liebscher, 1996)

3.1.2 Durchlässigkeitsbeiwert k

Als qualitative Messgröße zur Beschreibung der Wasserwegsamkeit eines Bodenkörpers wird der Durchlässigkeitsbeiwert k herangezogen. Die Größe des k -Werts bewegt sich in weiten Grenzen und ist von den Eigenschaften des Bodens abhängig.

Vorwiegend wird dieser Beiwert durch die Dichte und durch die Porosität des Bodenkörpers beeinflusst. Mit zunehmender Verdichtung werden die einzelnen Gesteinskörnungen mehr und mehr aneinandergedrückt, wodurch sich eine Reduktion des Porenraums einstellt. Maßgebender Faktor ist aber nicht der gesamte Hohlraumanteil des Bodens, sondern die Weite bzw. Größe der Porenkanäle. Ein toniger Untergrund wird wegen dessen geringer Durchlässigkeit bekanntlich als Grundwasserstauer bezeichnet, obwohl dieser im Gegensatz zu einem durchlässigeren Kiesboden einen größeren Hohlraumgehalt aufweist (Tab. 3). Dieses resultiert aus der Tatsache, dass Tonminerale stark adsorbierende Eigenschaften gegenüber Wasser aufweisen, dieses an sich binden, und dadurch die Porenkanäle durch Haft- oder Kapillarwasser (Abb. 18) verengt oder zur Gänze verschlossen werden. (nach Lang, 2008)

Des Weiteren ist die Kornabstufung eines nichtbindigen Bodenmaterials ausschlaggebend für die Durchlässigkeit. Je höher die Ungleichförmigkeit eines Bodens ist, desto eher lassen sich die groben Poren mit feiner Bodenkörnung füllen. Daher können grobkörnige Böden mit weitgestufter Kornverteilung mitunter geringere Durchlässigkeitsbeiwerte k aufweisen als enggestufte feinkörnige Böden. (nach Herth & Arndts, 1995)

Der Durchlässigkeitsbeiwert k wird durch die Bodenstruktur sowie Textur beeinflusst. Plattig geschichtete Texturen zeigen eine relativ hohe Durchlässigkeit in der Schichtebene. Hingegen in vertikaler Durchströmungsrichtung, also senkrecht auf die Schichtung, reduziert sich die Beweglichkeit des Wassers um ein Vielfaches. Daraus wird ersichtlich, dass Böden in Abhängigkeit der Fließrichtung des Wassers, unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen können. Dementsprechend sollte die Versuchsanordnung bei einer labortechnischen Durchlässigkeitsbestimmung der späteren Strömungsrichtung des Wassers entsprechen. (nach Lang, 2008)

Die Viskosität des Wassers ist eine weitere auf die Durchlässigkeit auswirkende Größe. Die Viskosität des Wassers nimmt mit zunehmender Temperatur ab, d. h. das Medium wird dünnflüssiger und die Durchlässigkeit steigt an. Um eine Vergleichbarkeit und Vereinheitlichung der Bodendurchlässigkeiten gewährleisten zu können, wird der k -Wert üblicherweise für eine Wassertemperatur von 10°C angegeben. Da die Wassertemperatur bei der Durchlässigkeitsbestimmung in der Regel von den 10°C abweicht, bietet die Formel nach Poissenille-Chardabellas die Möglichkeit, den ermittelten k -Wert auf den geforderten Vergleichswert k_{10} zu korrigieren. Die zugehörige Berechnungsformel der Temperaturkorrektur befindet sich in Kap. 3.3. (nach Lang, 2008)

Die Größe des k -Werts wird außerdem durch die vorhandene Wassersättigung des Bodens beeinflusst. Vor allem in teilgesättigten Böden verengen Luftporen die Fließquerschnitte, weshalb der teilgesättigte Boden im Allgemeinen eine geringere Durchlässigkeit im Vergleich zum vollgesättigten Boden aufweist. (nach Lang, 2008)

Der Durchlässigkeitsbeiwert k hat die Dimension Meter pro Sekunde und beschreibt die Geschwindigkeit, mit der das Wasser infolge des vorherrschenden Druckunterschieds einen Bodenkörper durchströmt. Durch die Umformung der Darcy-Glg. (8) ergibt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k folgendermaßen:

$$k = \frac{v}{i} \quad (10)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
v	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
i	[-]	hydraulischer Gradient

Der die Strömung antreibende Druckunterschied wird als hydraulischer Gradient, des Öfteren auch als hydraulisches Gefälle, bezeichnet und definiert sich wie folgt:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (11)$$

i	[-]	hydraulischer Gradient
Δh	[m]	Potentialunterschied
Δl	[m]	durchströmte Fließlänge

Der Durchlässigkeitsbeiwert k ist eine Konstante, die von der Korngrößenverteilung, Kornbeschaffenheit, Lagerungsdichte und Wassersättigung des Bodens sowie von der Viskosität des durchströmenden Fluids abhängig ist. Je nach Größe des k -Werts differenziert die ÖNORM B 4422-1:1992 zwischen fünf Durchlässigkeitsbereichen, die in Tab. 4 dargestellt sind:

Tab. 4: Relevante Durchlässigkeitsbereiche (ÖNORM B 4422-1:1992)

k [m/s]	Durchlässigkeit
$k \leq 10^{-8}$	sehr gering
$10^{-8} < k \leq 10^{-6}$	gering
$10^{-6} < k \leq 10^{-4}$	mittel
$10^{-4} < k \leq 10^{-2}$	stark
$10^{-2} \leq k$	sehr stark

3.1.3 Abschätzung der Durchlässigkeit anhand von Erfahrungswerten

In der Literatur finden sich immer wieder Erfahrungswerte, um die Durchlässigkeit des anstehenden Bodenkörpers ohne aufwändige Versuchsdurchführungen (z. B. Pump-, Bohrloch-, Einschwingversuche etc.) grob abschätzen zu können. Tab. 5 zeigt für verschiedene Bodenarten die dazugehörigen empirischen Durchlässigkeitsbeiwerte k .

Tab. 5: Auf empirischer Kenntnis basierende Durchlässigkeitsbeiwerte k für unterschiedliche Bodenarten (nach Schultze & Muhs, 1967)

Bodenart	Durchlässigkeitsbeiwerte k (m/s)	
	Grenzbereich	Überwiegend
Steingeröll	10^{-1} bis 5	
Grobkies	10^{-2} bis 1	
Mittelkies		$3,5 \cdot 10^{-2}$
Feinkies	10^{-4} bis 10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$ bis $3 \cdot 10^{-2}$
Grobsand	10^{-5} bis 10^{-2}	10^{-4} bis 10^{-3}
Mittelsand	10^{-6} bis 10^{-3}	10^{-4}
Feinsand	10^{-6} bis 10^{-3}	10^{-5} bis 10^{-4}
Sand, schluffig	10^{-7} bis 10^{-4}	10^{-6}
Schluff	10^{-9} bis 10^{-5}	10^{-9} bis 10^{-7}
Löß	10^{-10} bis 10^{-5}	ungestört: 10^{-5} gestört: 10^{-10} bis 10^{-7}
Lehm	10^{-10} bis 10^{-6}	10^{-9} bis 10^{-8}
Ton	10^{-12} bis 10^{-8}	schluffig: 10^{-9} bis 10^{-8} mager: 10^{-10} bis 10^{-9} fett: 10^{-12} bis 10^{-10}

3.2 Indirekte Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit

Eine weitere Variante den Durchlässigkeitsbeiwert k sinnvoll abzuschätzen, bieten indirekte Bestimmungsmethoden. Auf Basis der Kornverteilung eines Bodens ist es durch unterschiedliche empirische Ansätze möglich, Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit zu ziehen. Die Kenntnis der im Labor bestimmten Kornverteilungskurve ist dabei ausreichend, um mithilfe diverser Regressionsansätze die Durchlässigkeitsbeiwerte k bestimmen zu können. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ausgehend von der Beurteilung eines kleinen Probevolumens, auf die Eigenschaften weit größerer Bodenvolumina rückgeschlossen wird. Aus diesem Grund zeigt es sich als durchaus sinnvoll, mehrere Bodenproben aus unterschiedlichen Bereichen des Aquifers zu entnehmen, diese im Labor zu beurteilen, um folgend einen repräsentativen Referenzwert für die Durchlässigkeit der jeweiligen Bodenschicht angeben zu können. Um durchlässigkeitsrele-

vante Feinbestandteile bei etwaigen Entnahmebohrungen nicht auszuspülen, sollten die Probenentnahmen möglichst ohne Wasserspülung durchgeführt werden. Eine unsachgemäße Entnahme führt zwangsläufig zu einer Fehlinterpretation der vorhandenen Bodendurchlässigkeit im Aquifer. (nach Rieß, 2001)

Es gibt eine Vielzahl von empirischen Formeln, welche die Abhängigkeiten zwischen der Kornzusammensetzung, der vorhandenen Lagerungsdichte und dem Durchlässigkeitsbeiwert k darstellen. Diese Gleichungen zur Beurteilung der hydraulischen Bodeneigenschaften stützen sich vorwiegend auf charakteristische Größen im Kornaufbau bzw. auf repräsentative Punkte der Kornverteilungskurve. Die Grundgleichung der Verfahren zur indirekten Durchlässigkeitsbestimmung lautet wie folgt (Beyer, 1964):

$$k = C \cdot d_w^2 \quad (12)$$

bzw. bei Berücksichtigung des Lagerungszustandes:

$$k = C \cdot f(p) \cdot d_w^2 \quad (13)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
C	[-]	verfahrensspezifischer Faktor
d_w	[mm]	wirksamer Korndurchmesser
$f(p)$	[-]	Funktion des Porengehalts

Der wirksame Korndurchmesser d_w ist eine Kennziffer, mit der alle an der Materialzusammensetzung des Bodens beteiligten Korngrößen mit nur einer charakteristischen Zahl beschrieben werden können. Die relativ aufwändige Ermittlung des kennzeichnenden Korndurchmessers d_w erfolgt über die Berechnung der spezifischen Kornoberfläche des Bodenkörpers. In der Literatur stehen dafür grafische sowie rechnerische Verfahren zur Verfügung. (nach Langguth & Voigt, 2004)

Der Faktor C ist eine verfahrensspezifische Größe, bei der sich der Großteil der Autoren auf die Ungleichförmigkeitszahl C_u des Bodens bezieht. Die Ungleichförmigkeitszahl C_u ist dimensionslos und beschreibt die Steilheit der Körnungslinie im Bereich zwischen d_{10} und d_{60} . Definiert ist die Ungleichförmigkeitszahl C_u wie folgt:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (14)$$

C_u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{60}	[mm]	Korngröße bei 60 % Massenanteil der Körnungslinie
d_{10}	[mm]	Korngröße bei 10 % Massenanteil der Körnungslinie

Um die Lagerungsdichte bei der indirekten k -Wert Berechnung mitberücksichtigen zu können, führen einige Autoren in ihren Formelgleichungen eine Funktion $f(p)$ an. Die Auslegung der Funktion $f(p)$ weist dabei erhebliche Unterschiede auf, jedoch beziehen sich die meisten Methoden dabei auf die Porenzahl e sowie den Porenanteil n .

3.2.1 Verfahren nach Hazen (1892)

Das Verfahren nach Hazen bezieht sich bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts k auf die Korngröße sowie auf das Hohlraumgefüge des Bodenkörpers. Anwendung findet diese Methode ausschließlich bei vormals von Grundwasser durchströmten Böden. Diese Tatsache schließt einen Teil des Feinkornanteils bereits aus (v. a. Ton- und Schluffanteil). Nach der Trocknung der Probe folgt eine im Labor durchgeführte Siebanalyse mit dazugehöriger halblogarithmischer Darstellung der Kornverteilungskurve. Hazen definiert den für die gesamte Kornfraktion stellvertretenden wirksamen Korndurchmesser d_w als Schnittpunkt der Siebkurve mit der in horizontaler Richtung verlaufenden 10 %-Geraden. (nach Keller, 1969)

Als Ergebnis unzähliger bodenphysikalischer Untersuchungen gibt Hazen folgenden empirischen Zusammenhang an:

$$k = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \quad (15)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
d_{10}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang

Das Verfahren nach Hazen ist grundsätzlich für alle grobkörnigen Böden anwendbar, verliert jedoch die Gültigkeit bei einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u \geq 5$ (Keller, 1969).

Die von Hazen auf empirischer Basis formulierte Glg. (15) wurde einige Zeit später um einen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der vorherrschenden Grundwassertemperatur im Aquifer ergänzt.

Durch diese Erweiterung lautet die Formel nach Hazen in der heutzutage üblichen Form (Langguth & Voigt, 2004):

$$k = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \theta) \quad (16)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
d_{10}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang
θ	[°C]	Wassertemperatur

Die Glg. (16) zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts k zeigt sich für fluviatile sowie fluvioglaziale Sedimente als äußerst zuverlässig. Hingegen werden bei grobkörnigen Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u \geq 5$ die Durchlässigkeitsbeiwerte k in der Regel zu hoch ausgegeben. Bei einem lediglich geringen Anteil an Schluff- oder Ton berechnet man mit der Glg. (16) eine geringere als die in der Realität zu erwartenden Durchlässigkeit. (nach Keller, 1969)

3.2.2 Verfahren nach Zieschang (1961)

Im Jahr 1961 modifizierte Zieschang das Verfahren nach Hazen und führt folgende Beziehung an:

$$k = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \theta) \quad (17)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
C	[-]	empirischer Beiwert
d_{10}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang
θ	[°C]	Wassertemperatur

Im Gegensatz zum Verfahren nach Hazen ist der von Zieschang in Glg. (17) angeführte empirische Koeffizient C ein in Abhängigkeit der Bodenart variierender Wert, welcher vom lithologischen Aufbau des Lockergesteins sowie der vorhandenen Ungleichförmigkeitszahl C_u abhängt. Tab. 6 lässt darauf schließen, dass der Anwendungsbereich des Verfahrens nach Zieschang auf $C_u \leq 5$ beschränkt ist.

Tab. 6: Empirischer Koeffizient C als Variable des lithologischen Aufbaus sowie der Ungleichförmigkeitszahl C_u (nach Langguth & Voigt, 2004)

lithologischer Aufbau	Gültigkeitsbereich		
	$C_u = d_{60} / d_{10}$	d_{10}	C
reiner Sand oder kiesiger Sand	1 - 3	0,1 - 0,6 mm	0,0139
reiner Sand oder kiesiger Sand	3 - 5	0,1 - 0,6 mm	0,0116
schwach schluffiger Sand (bis 2 % < 0,01 mm)	< 5	0,1 - 0,6 mm	0,0093
schwach ton- und schluffhaltiger Sand (bis 3 % < 0,01 mm)	< 5	0,08 - 0,6 mm	0,007
ton- und schluffhaltiger Sand (bis 4 % < 0,01 mm)	< 5	0,06 - 0,6 mm	0,0046

3.2.3 Verfahren nach Beyer (1964)

Auf der Grundlage von mehr als 1500 Einzeluntersuchungen von Sanden und Kiesen aus Norddeutschland führt Beyer einen funktionellen Zusammenhang zwischen dem wirksamen Korndurchmesser d_w und der Korngröße d_{10} an. Beyer stellte fest, dass sich die beiden Bodenkenngößen proportional zueinander verändern, sobald das Bodengemisch feiner oder gröber wird. Üblicherweise erfolgt die aufwändige Ermittlung der wirksamen Korngröße d_w über die Berechnung der spezifische Oberfläche der einzelnen Gesteinskörnungen, weshalb diese bei anderen indirekten Bestimmungsverfahren, wie z. B. beim Verfahren nach Hazen (1892) oder Zieschang (1961), zur Vereinfachung mit $d_w = d_{10}$ gleichgesetzt wird. Durch die Auswertung seiner Untersuchungsergebnisse war es Beyer jedoch möglich, die wirksame Korngröße d_w ausschließlich unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeitszahl C_u sowie der Korngröße d_{10} exakt zu bestimmen. Der funktionelle Zusammenhang ist in Tab. 7 angeführt:

Tab. 7: Funktioneller Zusammenhang zwischen d_{10} und d_w in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl C_u (nach Beyer, 1964)

$C_u = d_{60} / d_{10}$ (Bereich)	d_w / d_{10} (Bereichswerte)	d_w / d_{10} (Mittelwert)
1,0 - 1,9	1,0 - 1,6	1,4
2,0 - 2,9	1,6 - 1,9	1,8
3,0 - 4,9	1,9 - 2,2	2,1
5,0 - 9,9	2,2 - 2,5	2,3
> 10	> 2,5	> 2,5

Durch die gefundene gesetzmäßige Abhängigkeit zwischen wirksamer Korngröße d_w und d_{10} war es Beyer möglich, folgende Gleichung zur indirekten Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k anzugeben:

$$k = C \cdot d_{10}^2 \quad (18)$$

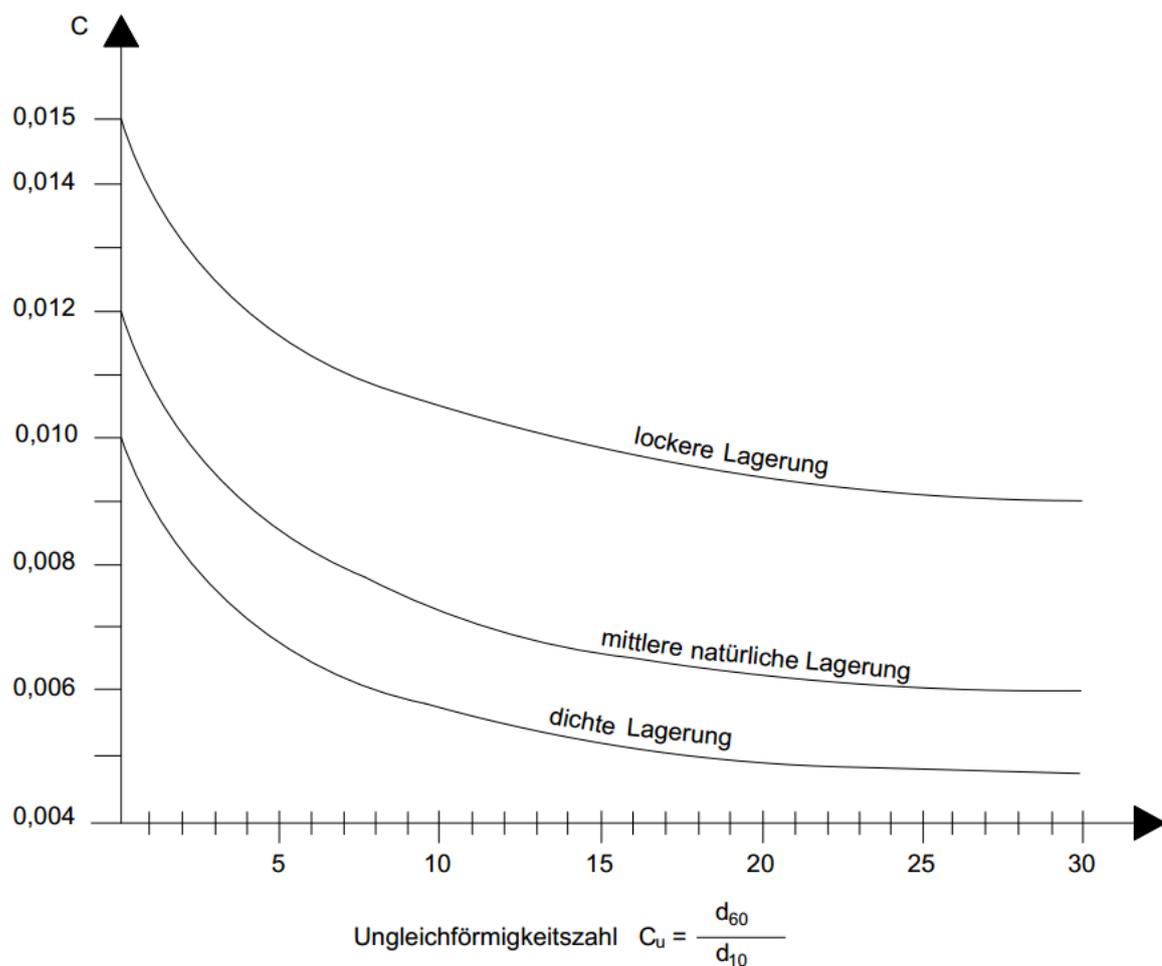
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
C	[-]	Proportionalitätsfaktor
d_{10}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang

Der Proportionalitätsfaktor C berücksichtigt bereits den in Tab. 7 angeführten Zusammenhang von d_{10} zu d_w und kann in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl C_u der Tab. 8 entnommen werden. Die Wertetafel (Tab. 8) hat Gültigkeit für Böden mit einer Lagerungsdichte D von 0,3 bis 0,6 sowie für eine Aquifertemperatur von 10°C.

Tab. 8: Proportionalitätsfaktor C in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl C_u für Böden mit einer Lagerungsdichte D von 0,3 bis 0,6 (nach Beyer, 1964)

$C_u = d_{60} / d_{10}$ (Bereich)	C (Bereichswerte)	C (Mittelwert)
1,0 - 1,9	$(120 - 105) \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$
2,0 - 2,9	$(105 - 95) \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$
3,0 - 4,9	$(95 - 85) \cdot 10^{-4}$	$90 \cdot 10^{-4}$
5,0 - 9,9	$(85 - 75) \cdot 10^{-4}$	$80 \cdot 10^{-4}$
10,0 - 19,9	$(75 - 65) \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
> 20,0	$< 65 \cdot 10^{-4}$	$60 \cdot 10^{-4}$

Für Böden, die in lockerer ($D \leq 0,3$) oder dichter ($D \geq 0,6$) Lagerungsdichte vorliegen, erfolgt die Ermittlung der Proportionalitätskonstante C grafisch nach Abb. 20. Auch hier ist die Abhängigkeit zwischen d_{10} und d_w bereits mitberücksichtigt, weshalb der ausgelesene Proportionalitätsfaktor C direkt in Glg. (18) eingesetzt werden kann.


 Abb. 20: Proportionalitätsfaktor C in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeitszahl C_u und Lagerung (nach Herth & Arndts, 1994)

Auf Grundlage der Auswertung zahlreicher Kornverteilungskurven und Vergleiche der indirekt ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k mit jenen aus Pumpversuchen, gibt Beyer in Tab. 9 einen direkten Zusammenhang zwischen dem Korndurchmesser d_{10} bzw. d_{60} und dem Durchlässigkeitsbeiwert k an.

Tab. 9: Tabellarische Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts k für Böden mit einer Lagerungsdichte D von 0,3 bis 0,6 (nach Beyer, 1964)

d_{60} (mm) ↓	← d_{10} → (mm)														
	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18
0,06	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,08	4,1	5,0	5,8	6,7	7,7	-	-	-	-	-	-	-	10 ⁻⁴ ms ⁻¹	-	-
0,10	4,0	4,7	5,3	6,4	7,3	8,4	9,6	1,2	-	-	-	-	-	-	-
0,12	3,8	4,4	5,0	6,2	7,0	8,1	9,2	1,1	1,4	1,7	-	-	-	-	-
0,15	3,6	4,2	4,9	5,9	6,7	7,8	8,8	1,1	1,4	1,7	2,1	2,3	2,7	-	-
0,20	3,4	4,0	4,7	5,6	6,4	7,3	8,4	1,0	1,3	1,6	2,0	2,2	2,6	2,9	3,8
0,25	3,2	3,8	4,5	5,3	6,1	7,0	8,0	1,0	1,2	1,6	1,9	2,1	2,5	2,8	3,6
0,30	3,1	3,6	4,3	5,1	5,9	6,7	7,7	9,6	1,2	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	3,5
0,40	2,9	3,4	4,1	4,8	5,6	6,3	7,3	9,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	3,3
0,50	2,8	3,3	3,9	4,6	5,3	6,0	7,0	8,6	1,1	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	3,2
0,60	2,7	3,2	3,7	4,4	5,1	5,8	6,7	8,4	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	3,1
0,80	2,5	3,0	3,5	4,2	4,9	5,5	6,3	7,9	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,9
1,0	2,4	2,9	3,4	4,0	4,7	5,2	6,0	7,5	9,5	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,8
1,2	2,3	2,8	3,3	3,8	4,5	5,0	5,8	7,3	9,2	1,2	1,4	1,5	1,8	2,0	2,7
1,5	-	-	3,1	3,6	4,3	4,8	5,5	7,0	8,8	1,0	1,3	1,4	1,8	1,9	2,6
2,0	-	-	-	-	-	-	5,2	6,6	8,3	1,0	1,2	1,4	1,7	1,8	2,4
2,5	-	10 ⁻⁵ ms ⁻¹	-	-	-	-	-	-	7,8	9,5	1,2	1,3	1,6	1,8	2,3
3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,5	1,7	2,2

Fortsetzung Tab. 9:

d_{60} (mm) ↓	← d_{10} → (mm)														
	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35	0,38	0,40	0,42	0,45	0,50	0,55	0,60
0,20	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	4,6	5,6	6,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 ⁻³ ms ⁻¹	-	-
0,30	4,5	5,4	6,6	8,0	9,3	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,40	4,2	5,1	6,3	7,5	8,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	-	-	-	-	-
0,50	4,0	4,9	6,0	7,2	8,4	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	3,0	-	-
0,60	3,8	4,7	5,8	6,9	8,1	9,4	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3	2,9	3,6	4,1
0,80	3,6	4,4	5,4	6,5	7,7	9,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,7	3,4	4,0
1,0	3,5	4,2	5,2	6,2	7,3	8,5	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,6	3,2	3,9
1,2	3,3	4,1	5,0	6,0	7,0	8,1	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	2,0	2,5	3,1	3,7
1,5	3,2	3,9	4,8	5,7	6,7	7,7	9,3	1,1	1,3	1,4	1,6	1,9	2,4	3,0	3,4
2,0	3,0	3,7	4,5	5,5	6,4	7,3	8,7	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,3	2,8	3,3
2,5	2,8	3,5	4,4	5,2	6,1	7,0	8,3	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	2,2	2,7	3,1
3,0	2,7	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	8,0	9,5	1,1	1,3	1,4	1,6	2,1	2,6	3,0
4,0	2,6	3,2	3,9	4,7	5,5	6,3	7,6	9,0	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0	2,5	2,8
5,0	-	-	3,7	4,5	5,2	6,1	7,2	8,5	1,0	1,2	1,3	1,4	1,9	2,4	2,6
6,0	-	-	-	-	5,0	5,9	6,9	8,1	9,7	1,1	1,2	1,3	1,8	2,3	2,7
8,0	-	-	-	-	-	-	-	7,7	9,2	1,0	1,2	1,3	1,7	2,2	2,6
10,0	-	10 ⁻⁴ ms ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	9,7	1,1	1,2	1,6	2,1	2,5
12,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	2,0	2,4

Das Verfahren nach Beyer (1964) besitzt Gültigkeit für grobkörnige Sand- und Kiesgemische im Spektrum $0,06 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 0,6 \text{ mm}$ bis zu einer maximalen Ungleichförmigkeitszahl C_u von 20.

3.2.4 Verfahren nach Konzeny-Köhler (1965)

Das Auswerteverfahren nach Konzeny-Köhler berücksichtigt, wie das Verfahren nach Beyer, den Lagerungszustand des Bodens. Darüber hinaus bezieht die Berechnung die vorhandene Aquifertemperatur sowie die Rauigkeit der Bodenkörnung mit ein. In der heutzutage zur Anwendung kommenden Form lautet die Bestimmungsgleichung von Konzeny-Köhler folgendermaßen (Langguth & Voigt, 2004):

$$k = C \cdot d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot d_w^2 \quad (19)$$

k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
d_w	[mm]	wirksame Korngröße
τ	[-]	kinematisches Zähigkeitsverhältnis von 10°C warmen Wasser und tatsächlicher Grundwassertemperatur $\rightarrow T_{\text{Aquifer}} < 20^\circ\text{C}$ gilt $\tau = 1$
r	[-]	Rauigkeit der Bodenkörner
e	[-]	Porenzahl des Bodens

Der Rauigkeitsgrad r steht im Zusammenhang mit der Form der Bodenkörner und kann der Tab. 10 entnommen werden:

Tab. 10: Rauigkeitsgrade r nach Hütte (Langguth & Voigt, 2004)

Kugel	rundlicher Flusssand	eckiger Sand, nur leicht gerundet	scharfkantiger Bruchsand
$r = 1$	$r = 1$	$2,0 < r < 3,5$	$r = 5,5$

Für die Ermittlung der wirksamen Korngröße d_w wird die Kornverteilungskurve des Bodens in einzelne Kornklassen i zerlegt. Inwieweit die Körnungslinie in separate Kornklassen i unterteilt wird, ist grundsätzlich beliebig und dementsprechend wählbar. Dabei ist es durchaus sinnvoll für weitgestufte Körnungslinien einen engeren Kornklassenabstand zu wählen als für die steil verlaufenden Siebkurvenäste enggestufter Böden. Mit zunehmender Unterteilung der Siebkurve in einzelne Kornklassen i steigt die Genauigkeit der wirksamen Korngröße d_w . (nach Langguth & Voigt, 2004).

Nach Konzeny-Köhler (1965) erfolgt die rechnerische Ermittlung der wirksamen Korngröße d_w anhand folgender Formel:

$$d_w = \frac{\sum \Delta G_i}{\sum \frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i} \quad (20)$$

d_w [mm] wirksame Korngröße

ΔG_i [%] Gewichtsanteil der Körnungen der Kornklasse i

d_i [mm] Gemittelter Korndurchmesser der Kornklasse i

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_u} \right) \quad (21)$$

d_o [mm] Korndurchmesser an der oberen Grenze der jeweiligen Kornklasse i

d_u [mm] Korndurchmesser an der unteren Grenze der jeweiligen Kornklasse i

Zum leichteren Verständnis wird die Berechnung der wirksamen Korngröße d_w nach Glg. (20) anhand der Kornverteilungskurve eines pliozänen Mittel- bis Grobsandes vorgeführt (Abb. 21). In einem ersten Schritt wird die Kornverteilungskurve in zwölf separate (Anzahl beliebig) Korngrößenbereiche unterteilt. Die Bereiche 1-2, 2-3, 3-4 usw. stellen einzelne Kornklassen i dar.

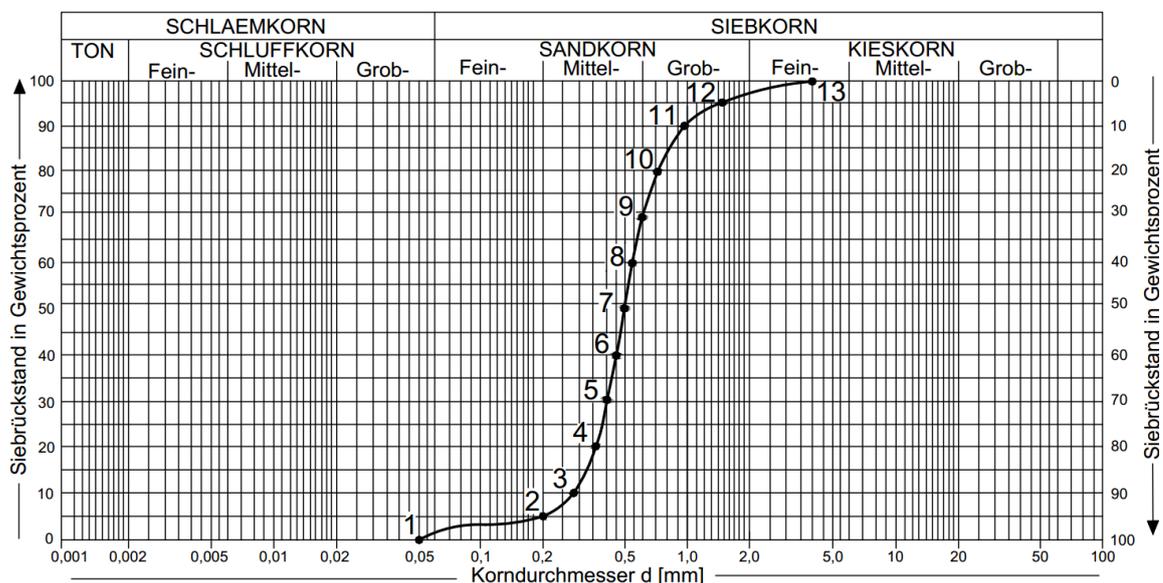


Abb. 21: Unterteilung der Kornverteilungskurve in zwölf separate Kornklassen i (nach Langguth & Voigt, 2004)

Die Auswertung der wirksamen Korngröße d_w erfolgt tabellarisch, wobei grundsätzlich folgende Wertetafel (Tab. 11) herangezogen wird:

Tab. 11: Auswertung der in Abb. 21 dargestellten Kornverteilungskurve zur Bestimmung der wirksamen Korngröße d_w nach Glg. (20)

Kornklasse i [-]	d_u [mm]	d_o [mm]	$1/d_i$ [1/mm]	ΔG_i [%]	$(1/d_i) \cdot \Delta G_i$ [%/mm]
1 – 2	0,00	0,20	2,50	5	12,5
2 – 3	0,20	0,28	4,28	5	21,4
3 – 4	0,28	0,36	3,17	10	31,7
4 – 5	0,36	0,40	2,64	10	26,4
...		
11 – 12	0,95	1,50	0,86	5	4,3
12 – 13	1,50	4,00	0,46	5	2,3
				$\Sigma \Delta G_i$	$\Sigma (1/d_i) \cdot \Delta G_i$

3.2.5 Verfahren nach Seiler (1973)

Ausgehend von über 250 untersuchten kiesigen und sandigen Bodenproben des bayrischen Alpenvorlandes stellt Seiler im Jahr 1973 eine Methode vor, welche folgende Beziehung zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k auf Basis der Kornverteilung angibt:

$$k = \kappa \cdot d_w^2 \quad (22)$$

k	[cm/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
κ	[cm ⁻¹ s ⁻¹]	Proportionalitätsfaktor
d_w	[cm]	wirksamer Korndurchmesser

Seiler gibt für diese Methode der indirekten Durchlässigkeitsberechnung an, dass der für alle Kornfraktionen des Bodens repräsentative Korndurchmesser d_w für Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u \leq 17$ bei 10 % Massendurchgang und für Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u > 17$ bei 25 % Siebdurchgang anzunehmen ist. Der Durchlässigkeitsbeiwert k lässt sich dadurch bis auf eine Genauigkeit von 20 % bestimmen. Der Anwendungsbereich des Verfahrens nach Seiler beschränkt sich auf Kiese und Sande mit einer Ungleichförmigkeitszahl von $5 \leq C_u \leq 100$.

Der in Glg. (22) angeführte Proportionalitätsfaktor κ wird durch die vorhandene Ungleichförmigkeitszahl C_u des Bodens bestimmt und kann der Tab. 12 ($C_u > 17$) bzw.

der Tab. 13 ($C_u \leq 17$) entnommen werden. Das Auslesen des Proportionalitätsfaktors κ ist nachfolgend beispielhaft für eine Ungleichförmigkeitszahl C_u von 56 vorgezeigt.

Ungleichförmigkeitszahl $C_u = 56 > 17 \rightarrow$ Tab. 12: $\kappa = 21,8$

Tab. 12: Proportionalitätsfaktor κ für Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u > 17$ (nach Seiler, 1973)

C_u	Einer \longrightarrow										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zehner \longrightarrow \downarrow	0					50,0	32,0	23,5	17,5	15,0	
	1	13,0	12,0	11,0	10,0	9,5	9,0	8,9	8,8	8,8	8,9
	2	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8	10,0	10,2	10,4	10,6	10,8
	3	11	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7
	4	14,0	14,4	14,8	15,2	15,6	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0
	5	18,5	19,0	19,5	20,0	20,5	21,0	21,8	22,6	23,4	24,2
	6	25,0	25,8	26,6	27,4	28,2	29,0	29,8	30,6	31,4	32,2
	7	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,2	40,4	41,6	42,8
	8	44,0	45,4	46,8	48,2	49,6	51,0	52,6	54,2	55,8	57,4
	9	59,0	60,8	62,6	64,4	66,2	68,0	70,2	72,4	74,6	76,8
	10	79,0									

Tab. 13: Proportionalitätsfaktor κ für Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u \leq 17$ (nach Seiler, 1973)

C_u	Einer \longrightarrow										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zehner \longrightarrow \downarrow	0					215	190	170	150	135	
	1	120	105	94	84	75	67	61	57	57	58
	2	62	66	70	74	78	82	86	90	94	98
	3	102	110	118	126	134	142	150	158	166	174
	4	182	192	202	212	222	232	246	260	274	288
	5	302	318	334	350	366	382	402	422	442	462
	6	482	502	522	542	562	582	612	642	672	702
	7	732	772	812	852	892	932	986	1040	1094	1148
	8	1202	1268	1334	1400	1466	1532	1606	1680	1754	1828
	9	1902	1994	2086	2178	2270	2362	2402	2542	2682	2822
	10	2962	3130	3298	3466	3634	3802	4002	4202	4202	4602
	11	4802									

3.2.6 Verfahren nach Sichardt (1927)

Im Jahr 1927 ermittelt Sichardt für Korngemische mit einem Porenanteil n von 0,4 bei der Durchströmung folgenden Zusammenhang (Rieß, 2001):

$$k = 0,006 \cdot d_m^2 \quad (23)$$

k [m/s] Durchlässigkeitsbeiwert
 d_m [mm] mittlerer Korndurchmesser der Bodenprobe

Im Zuge des Auswerteprozesses bildet man für verschiedene Siebbereiche (z. B. zwischen den Sieben 4 mm und 2 mm) separate Korngruppen i und ermittelt den dazugehörigen mittleren Korndurchmesser $d_{m,i}$.

Der gemittelte Korndurchmesser $d_{m,i}$ einer jeweiligen Korngruppe i ergibt sich wie folgt:

$$\frac{1}{d_{m,i}} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{2}{d_1 + d_2} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (24)$$

$d_{m,i}$ [mm] mittlerer Korndurchmesser der Korngruppe i
 d_1 [mm] Öffnungsweite des unteren Prüfsiebs
 d_2 [mm] Öffnungsweite des oberen Prüfsiebs

Unter Verwendung der nachfolgend angeführten Formel werden die für die jeweiligen Korngruppe i gemittelten Korndurchmesser $d_{m,i}$ zu einem für die gesamte Bodenprobe repräsentativen Korndurchmesser d_m zusammengeführt:

$$d_m = \frac{1}{100} \cdot \sum \frac{d_{m,i}}{G_i} \quad (25)$$

d_m [mm] mittlerer Korndurchmesser der Bodenprobe
 $d_{m,i}$ [mm] mittlerer Korndurchmesser der Korngruppe i
 G_i [%] Masse der Korngruppe i mit dem mittleren Korndurchmesser $d_{m,i}$

Das Verfahren nach Sichardt berücksichtigt im Gegensatz zum Verfahren nach Beyer den gesamten Verlauf der Körnungslinie, weshalb die Durchlässigkeitsermittlung nach Sichardt genauer, jedoch rechenintensiver ist. (nach Herth & Arndts, 1995)

Zum Schluss muss erwähnt werden, dass für die Formel nach Sichardt keine Anwendungsbestimmungen oder Gültigkeitsgrenzen vorliegen. Aufgrund dieser Tatsache bleibt das Verfahren nach Sichardt in der Baupraxis unberücksichtigt. (Lang, 2008)

3.2.7 Weitere in der Literatur erwähnte Verfahren

Bialas et al. (1970) gibt im Jahr 1970 für Geschiebeböden folgende Zahlenwertgleichung zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts k an:

$$k = 0,0036 \cdot d_{20}^{2,3} \quad (26)$$

k [m/s] Durchlässigkeitsbeiwert
 d_{20} [mm] Korndurchmesser bei 20 % Massendurchgang

Seelheim (1880) gibt im Jahr 1880 als erster Autor eine auf die Kornverteilung des Bodens basierende Formel zur Durchlässigkeitsbestimmung an:

$$k = 0,00357 \cdot d_{50}^2 \quad (27)$$

k [m/s] Durchlässigkeitsbeiwert
 d_{50} [mm] Korndurchmesser bei 50 % Massendurchgang

Die Gleichung nach Seelheim gilt für Grundwassertemperaturen von 12°C und der Anwendungsbereich beschränkt sich auf Korngemische mit einer maximalen Ungleichförmigkeitszahl C_u von 5 (Fuchs, 2010).

3.3 Temperaturkorrektur des Durchlässigkeitsbeiwerts k

Wie bereits in Kap. 3.1.2 erwähnt, ist die Zähigkeit eines Fluids temperaturabhängig. Im Allgemeinen sinkt die Viskosität mit steigender Temperatur, d. h. das Grundwasser wird dünnflüssiger. Dies hat zur Folge, dass der Durchlässigkeitsbeiwert k mit steigender Wassertemperatur zunimmt. Bei den in Kap. 3.2 beschriebenen Methoden zur indirekten Durchlässigkeitsbestimmung berücksichtigen ausschließlich die Verfahren nach Hazen (1892), Zieschang (1961) sowie Konzeny-Köhler (1965) die temperaturabhängige Viskosität und den diesbezüglichen Einfluss auf den k -Wert. Die Autoren, welche in ihren Formelgleichungen keinen Term für die vorhandene Grundwassertemperatur anführen, beziehen sich auf eine Normtemperatur von 10°C .

Bei einer davon abweichenden Aquifertemperatur erfolgt die Umrechnung des für eine Normtemperatur von 10°C berechneten Durchlässigkeitsbeiwerts k_{10} auf den Durchlässigkeitsbeiwert k_θ für die tatsächliche Grundwassertemperatur θ durch die Formel von Poissenille-Charadabellas (ÖNORM B 4422-1:1992):

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \theta + 0,00022 \theta^2} \cdot k_\theta = \alpha \cdot k_\theta \quad (28)$$

k_{10}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Normtemperatur von 10°C
θ	$[\text{C}]$	tatsächliche Aquifertemperatur
k_θ	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei tatsächlicher Aquifertemperatur
α	[-]	Temperaturkorrekturbeiwert

Tab. 14: Korrekturbeiwert α zur Berücksichtigung der temperaturabhängigen Zähigkeit des Wassers (ÖNORM B 4422-1:1992):

θ $[\text{C}]$	5	10	15	19	20	21
Korrekturfaktor α	1,158	1,000	0,874	0,792	0,771	0,754
θ $[\text{C}]$	22	23	24	25	26	27
Korrekturfaktor α	0,737	0,720	0,703	0,686	0,669	0,652

3.4 Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Porenzahl

Kézdi (1969) führt eine Beziehung an, welche eine Durchlässigkeitsabschätzung auf Grundlage eines bekannten Durchlässigkeitsbeiwerts k und einer bekannten Porenzahl e ausschließlich durch die Porenzahlveränderung ermöglicht:

$$k_1 : k_2 = \frac{e_1^2}{1 + e_1} : \frac{e_2^2}{1 + e_2} \quad (29)$$

k_1	[m/s]	bekannter Durchlässigkeitsbeiwert
k_2	[m/s]	gesuchter Durchlässigkeitsbeiwert
e_1	[-]	bekannt zu k_1 gehörige Porenzahl
e_2	[-]	bekannt zu k_2 gehörige Porenzahl

Liegt ein Bodenkörper mit der Kenntnis über dessen Durchlässigkeitsbeiwert k_1 sowie dazugehöriger Porenzahl e_1 vor, kann der neue Durchlässigkeitsbeiwert k_2 durch Umformung der Glg. (29) in Abhängigkeit der veränderten Porenzahl e_2 ermittelt werden.

4 Suffosion weitgestufter nichtbindiger Böden

4.1 Allgemeines

Wird eine Bodenschicht von Wasser durchströmt kann dieses zu lokal begrenzten Kornumlagerungen sowie in weiterer Folge zur Umstrukturierung des vorhandenen Kornaufbaus führen. Das Phänomen des hydraulisch bedingten Materialtransports kann in unterschiedlichen Erscheinungsformen, Ausbildungen sowie potentiellen Schadenswirkungen vorkommen und kann eine Gefahr für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Erdbauwerken darstellen. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen einem erosiven und einem suffosiven Transportvorgang.

Stellt sich infolge der hydraulischen Einwirkung eine Umlagerung sowie ein Massentransport der gesamten im Boden enthaltenen Kornfraktionen ein, spricht man von Erosion. Als kennzeichnend für einen erosiven Transportvorgang kann angeführt werden, dass im Zuge dieses hydraulisch bzw. dynamisch bedingten Mobilisierungsprozesses nicht nur die in der Grobstruktur eingebettete Feinteilfraktion, sondern auch die Körnungen der tragenden Struktur vom Materialtransport betroffen sind. Diese werden nach und nach in benachbarte Bodenbereiche umgelagert, sodass dies bei langanhaltender Durchströmung zur Zerstörung des grobkörnigen Traggerüsts und in weiterer Folge zu einem Verlust der Bodentragfähigkeit führt. Im Boden stattfindende Erosionsvorgänge beeinträchtigen die Stabilität und Standsicherheit von Erd-, Damm- und Massivbauwerken. (nach BAW, 2013)

Stellt sich infolge der hydraulischen Strömungskraft ausschließlich ein Massentransport der feinkörnigen Fraktion ein, spricht man von Suffosion. Kennzeichnend für einen suffosiven Transportvorgang ist, dass bedingt durch die hydraulische Einwirkung, eine Umlagerung bzw. ein Transport der feinkörnigen Bodenpartikel in die Porenräume der groben Kornfraktionen stattfindet, jedoch der tragende Bodenaufbau davon unbetroffen und daher unzerstört bleibt. Durch den Prozess des Herauslösen und dem anschließenden Weitertransport der feinkörnigen Bodenpartikel in die Porenräume größerer Körnungsbereiche stellt sich für den suffosiven Boden eine Zunahme der Porosität (Porenzahl e , Porenanteil n) sowie daraus folgend eine Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit ein. Des Weiteren führt der Bodenaustrag zur Abnahme der Dichte. Trägt die Bodenumlagerung sowie ein sich einstellender Partikelaustrag zur Stabilitätsverminderung des tragenden Korngerüsts bei, können fortschreitende Suffosionsvorgänge den Erosionsbeginn begünstigend beeinflussen. Der Übergang von einem suffosiven zu einem erosiven Materialtransport erfolgt in der Regel fließend. (nach BAW, 2013)

4.2 Transportmechanismus

Das Auftreten eines im Boden stattfindenden Partikeltransports ist grundsätzlich an zwei Bedingungen geknüpft. Einerseits muss die Bodenstruktur derartige geometrische Voraussetzungen erfüllen, dass ein Materialtransport kinematisch überhaupt stattfinden kann (effektive Öffnungsweite bzw. Durchgängigkeit der Porenpfade). Ist eine potentielle Kornumlagerung geometrisch möglich, muss andererseits die hydraulische Einwirkung (Grundwasser, Sickerwasser) eine derartig große Schleppkraft auf die Bodenpartikel ausüben, dass diese überhaupt in Bewegung gesetzt werden können.

Das Phänomen des suffosiven Materialtransports tritt vorwiegend bei kohäsionslosen bis schwach kohäsiven Böden auf. Durch die fehlenden oder kaum vorhandenen chemischen bzw. physikalischen Anziehungskräfte sind die einzelnen Bodenkörner derartig schwach oder gar nicht aneinander gebunden, dass diese, sofern es die Porenstruktur zulässt (geometrische Bedingung), bei einer bestimmten äußeren Einwirkung (hydraulisches Bedingung) mobilisiert und transportiert werden. (nach BAW, 2013)

Die Gefahr des suffosiven Materialtransports ist bei kohäsiven Böden aufgrund der vorhandenen Bindungskräfte der Körnungen und der damit eingeschränkten Beweglichkeit wesentlich geringer als bei kohäsionslosen Bodengemischen. Jedoch ist es auch bei bindigen Böden durchaus möglich, dass entlang von Störungszonen bewegliche und transportfähige Bodenaggregate herausgelöst werden. (nach BAW, 2013)

Weitgestufte natürliche Böden (z. B. residuale Verwitterungsböden, Flusssedimente) sind aufgrund der meist un stetigen Massenverhältnisse im Bereich des Fein- und Mittelkorns potentiell suffosionsgefährdet. Die Ursache ist die bimodale Kornzusammensetzung mit Anteilen der Grob- sowie Feinkornfraktion. In Abhängigkeit vom Proportionsverhältnis zwischen feiner und grober Körnung bilden bimodal zusammengesetzte Böden verschiedene Packungsstrukturen, auf die im Folgenden eingegangen wird. (nach Witt, 2014)

Beträgt der Anteil an feiner Bodenkörnung mindestens 30 % der Gesamtmasse, ist diese Fraktion strukturbildend und nimmt die Funktion des tragenden Korngerüsts ein. Die groben Körnungen sind dabei verteilt in der Feinteilmatrix eingebettet und besitzen keinen kraftübertragenden Korn-zu-Korn-Kontakt. Demzufolge wird der mechanisch wirksame Kornaufbau sowie die hydraulisch wirksame Porengeometrie ausschließlich durch die feine Kornmatrix bestimmt. (nach Witt, 2014)

Anderenfalls, sofern der feine Anteil eines bimodalen Bodens unter 30 Massen-% liegt, beteiligt sich die Feinfraktion nicht an der Strukturbildung. Die tragende Funktion übernimmt die grobe Kornmasse. Die Körnungen der feinen Fraktion sind dabei lose in den Porenräumen der groben Fraktion eingelagert. Die Grobstruktur bestimmt folglich die physikalischen Eigenschaften (v. a. Durchlässigkeitsbeiwert k) und ist für die Bildung möglicher Porenkanäle der inneren Suffosion verantwortlich. (nach Witt, 2014)

Weitgestufte bimodale Böden mit einem Feinkornanteil von unter 30 % der Gesamtmasse weisen demnach ein erhöhtes Suffosionspotential auf. Als primär ausschlaggebend gelten dabei das Verhältnis zwischen Fein- und Grobanteil (Korngrößenverteilung), der Lagerungszustand sowie die aus den zuvor erwähnten Parametern resultierende Durchgängigkeit bzw. Öffnungsweite der Porenpfade. Grundsätzlich ist ein Bodengemisch suffosionsgefährdeter, umso geringer der grobporige Füllgrad. Sind die Poren der strukturbildenden Körnung nur teilweise gefüllt, hat eine lediglich geringfügige hydraulische Einwirkung einen Partikeltransport (Defraktionierung) der eingelagerten Feinanteile zur Folge. Die statisch dominante Struktur (Groskelett) übernimmt dabei die Filterfunktion und hat die Aufgabe, den hydraulisch bedingten Partikeltransport an Porenengstellen zurückzuhalten. Existieren mobile Partikel, deren Durchmesser größer sind als die effektiven Öffnungsweiten des Filters, verstopfen oder blockieren diese zuvor durchgangswirksame Porenpfade (Abb. 22). Dies führt dazu, dass sich im Boden vorübergehend stabile Transportverhältnisse einstellen. Im Fall geänderter Strömungsverhältnisse kann der Materialtransport reaktiviert werden. (nach Witt, 2014)

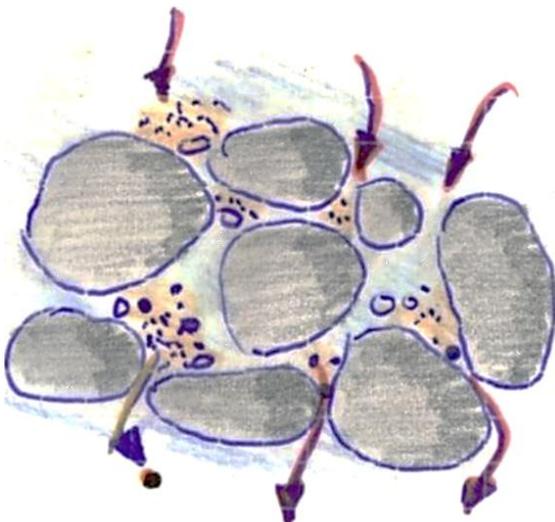


Abb. 22: Suffosiver Feinteiltransport durch die Porenkanäle des grobkörnigen Traggerüsts (Witt, 2014)

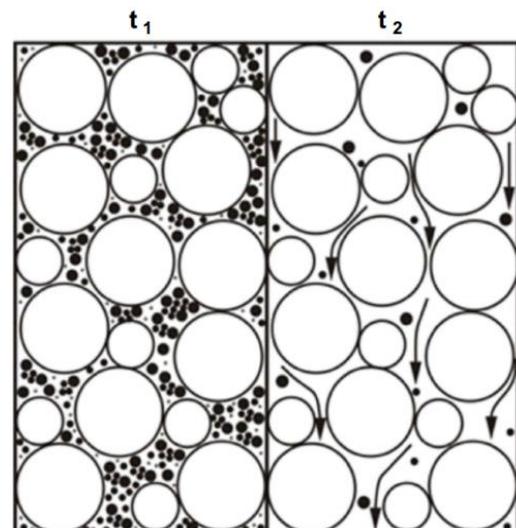


Abb. 23: Ablauf der Suffosion zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 (BAW, 2013)

Auf Grundlage experimenteller Untersuchungen und theoretischer Analysen differenziert Witt (2014) hinsichtlich folgender suffosiver Transportverhältnisse:

- Quasi stabil (geometrisch)

Das Porensystem des Grobskeletts blockiert den Feinteiltransport auf kurzen Wegen. Der hydraulisch bzw. dynamisch verursachte Partikeltransport beläuft sich größenordnungsmäßig auf den Zentimeter- bzw. Dezimeterbereich.

- Instabil (geometrisch)

Bei einer für den Partikeltransport ausreichend großen äußeren Einwirkung kommt es entlang bevorzugter Porenpfade zu einer signifikanten Verlagerung sowie bei langanhaltender hydraulischer bzw. dynamischer Beanspruchung zu einem unbegrenzten Austrag der feinen Kornfraktionen (Masseverlust).

- Strukturkollaps (hydraulisch)

Die strukturbildende Grobkornfraktion wird infolge konzentrierter hydraulischer bzw. dynamischer Einwirkung sukzessive aus dem tragenden Skelett gelöst, verlagert und schlussendlich aus dem Bodenkörper ausgetragen. Dies führt anfänglich zu einer lokalen Zerstörung (Erosion) der Tragstruktur und endet bei fortschreitender Auflösung in einem Strukturkollaps.

4.3 Indirekte Verfahren zur Ermittlung der Suffosionsstabilität

Zur Beurteilung des Suffosionspotentials weitgestufter nichtbindiger Böden werden in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher und nach theoretischen oder empirischen Gesichtspunkten fundierte Nachweismethoden angeführt. In diesem Kapitel werden vier einfache und zuverlässige Nachweisverfahren zur Sicherheit gegen Materialtransport (Suffosion) vorgestellt. Die nachfolgend angeführten Verfahren beziehen sich bei der Beurteilung des Suffosionspotentials auf geometrische Kriterien (Kornverteilungskriterien). Die Überprüfung eines möglichen Materialtransports ausschließlich auf die geometrischen Gegebenheiten (Durchgängigkeit bzw. Öffnungsweite der Porenpfade) zu beschränken, liegt auf der sicheren Seite. Sofern Suffosion geometrisch nicht möglich ist, kann unabhängig von der hydraulischen Einwirkung (hydraulischer Gradient i) kein nennenswerter Partikeltransport (Umlagerung, Austrag) stattfinden. Wird das geometrische Kriterium nicht erfüllt, ist gegebenenfalls ein hydraulisches Suffosionskriterium zu überprüfen. Dabei ist zu ermitteln, ob die Strömungskraft bzw. Schleppkraft des Wassers zur Mobilisierung der „freien“ Partikel ausreicht. Die Evaluierung der hydraulischen Suffosionsbedingung ist derzeit Ziel zahlreicher Forschungsarbeiten, weshalb es nach heutigem Stand der Technik noch keine allgemein gültigen sowie nach-

weislich von der Ingenieurpraxis als tauglich klassifizierten hydraulischen Nachweisführungen gibt.

4.3.1 Einfaches Verfahren (BAW, 2013)

Die Grundlage dieses Nachweises zur Abschätzung der Suffosionsstabilität weitgestufter Kornverteilungen basiert auf Ziems (1970) angeführte und vom „Merkblatt Materialtransport im Boden (BAW, 2013)“ abgeleitete Versuchsergebnisse für Sande und Kiese mit einem stetigen Körnungsverlauf.

Nach dem einfachen Verfahren gelten Böden mit einer Lagerungsdichte D von 0,3 bis 0,6 als suffosionssicher, sofern nachfolgend angeführte Voraussetzungen erfüllt sind:

- Ungleichförmigkeitszahl $C_u < 8$
- Stetiger Körnungsverlauf

Unter einem stetigen Körnungsverlauf wird dabei eine Kornverteilung ohne Ausfall- oder Fehlkörnung sowie ohne markante Krümmungsänderungen verstanden. Sind beide Kriterien erfüllt, kann der Boden ohne weiteren Nachweis als suffosionsstabil eingestuft werden.

4.3.2 Verfahren nach Ziems (1967)

Das Verfahren nach Ziems bezieht sich bei der Suffosionsbeurteilung auf die theoretische Betrachtung der Porenstruktur sowie der Porenengstellenverteilung innerhalb eines Bodenkörpers (BAW, 2013).

Nach Ziems sind Böden suffosionsstabil, sofern folgende Gleichung erfüllt ist:

$$\frac{d_{min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5 \quad (30)$$

d_{min}	[mm]	minimaler Korndurchmesser
F_s	[-]	Schlupfmaß
d_k	[mm]	maßgebender Porenkanaldurchmesser
1,5	[-]	Sicherheitsniveau

d_{min} definiert den größten Korndurchmesser, welcher infolge der hydraulisch Einwirkung ausgetragen werden darf. Sofern ein gewisser Materialaustrag tolerierbar ist, beispielsweise bei untergeordneten Erdbauwerken (Dämmen, Böschungen), kann nach Busch et al. (1993) der Korndurchmesser d_{min} bis zu einem Korndurchmesser d_3 bei 3 % Siebdurchgang angesetzt werden.

Ziems bezieht sich bei der Ermittlung des maßgebenden Porenkanaldurchmessers d_k auf die Berechnungsformel nach Pavcic (BAW, 2013):

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} \quad (31)$$

d_k	[mm]	mittlerer Porenkanaldurchmesser
C_u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
e	[-]	Porenzahl
d_{17}	[mm]	Korndurchmesser bei 17 % Massendurchgang

Glg. (31) nach Pavcic besitzt Gültigkeit für stetige Körnungsverläufe ohne Fehlkornbereiche und markante Krümmungsänderungen. Da Ziems Beurteilung der Suffosionsstabilität nach Glg. (30) auf den von Pavcic nach Glg. (31) mittleren Porenkanaldurchmesser d_k aufbaut, kann das Verfahren nach Ziems bei un stetigen Körnungsverläufen nicht angewendet werden. (nach BAW, 2013)

Unterstützt durch zahlreiche Durchströmungsversuche an Kiesen und Sanden sieht Ziems sich in seiner These bestätigt, dass ein Bodenfilter mit der maßgebenden Porenkanalweite d_k durchaus Partikelgrößen kleiner als d_k zurückhalten kann. Das Phänomen führt Ziems auf die Kornrauigkeit sowie auf die inhomogene Form der Bodenkörnung zurück. Um diese in natürlichen Böden auftretende Erscheinung angemessen zu berücksichtigen, führt Ziems einen Abminderungsfaktor (Schlupfmaß F_s) ein. In Abhängigkeit der Strömung nimmt das dimensionslose Schlupfmaß F_s Werte zwischen 0,4 (ruhende gleichmäßige Durchströmung) bis 0,6 (dynamische pulsierende Durchströmung) an. (nach BAW, 2013)

Infolge der Inhomogenität von Böden bezüglich der Lagerung und Kornverteilung verwendet Ziems in Glg. (30) ein Sicherheitsniveau von 1,5.

4.3.3 Verfahren nach Kenney und Lau (1985 & 1986)

Auf Grundlage einer Versuchsreihe an sandigen Kiesen führen Kenney und Lau eine auf die Korngrößenverteilung des Bodens basierende Grenzbedingung zwischen stabilen und potentiell suffosiven Transportverhältnissen an. Das von Kenney und Lau aus den Durchströmungsversuchen abgeleitete Suffosionskriterium bezieht sich dabei nicht auf den gesamten Körnungsverlauf des Bodens, sondern betrachtet ausschließlich die feinere, frei in der Porenstruktur bewegliche Kornfraktion. Die Ermittlung des für den Nachweis relevanten Massenprozentsatzes an feinerer Körnung erfolgt durch die Aufspaltung der Körnungslinie in einen feineren (0 - 30 Massen-%) sowie in einen größeren (30 - 100 Massen-%) Bereich. Beläuft sich die Ungleichförmigkeitszahl des groben

Kornspektrums (30 - 100 Massen-%) auf $C_{u,grob} \leq 3$, sind die feinsten 30 % Siebdurchgang für die Berechnung maßgebend. Andernfalls, sofern der Grobkornbereich eine Ungleichförmigkeit von $C_{u,grob} > 3$ aufweist, wird das Suffosionskriterium nach Kenney und Lau durch die feinsten 20 Massen-% bestimmt. (nach BAW, 2013)

Der Ansatz des Suffosionsverfahrens nach Kenney und Lau beruht auf Überlegungen hinsichtlich der strukturellen sowie geometrischen Porenausbildung eines Kugelhaufwerks. Kenney und Lau gehen davon aus, dass sich Bodenkörner mit dem Durchmesser d durch Porenräume, welche aus Körnungen des Durchmessers $4d$ gebildet werden, transportieren lassen. (nach BAW, 2013)

Der eigentliche Suffosionsnachweis basiert darauf, die Körnungslinie des Bodens in eine durch die Wertepaare $H + F$ (Abb. 24) ausgedrückte Formkurve umzuwandeln. Der Parameter F beschreibt dabei den Massenanteil an Körnung der Größe kleiner d , wobei der Parameter H den Massenanteil an Körnung zwischen dem Korngrößenbereich d bis $4d$ darstellt. Wird für mehrere Korndurchmesser d der maßgebenden feineren Fraktion (d_{10} bis d_{20} bzw. d_{30}) der Siebdurchgang F , sowie der zum 4-fachen Korndurchmesser $4d$ dazugehörige Massendurchgang $F + H$ ermittelt, kann die in Abb. 24 dargestellte $H(F)$ -Formkurve grafisch erstellt werden. (nach BAW, 2013)

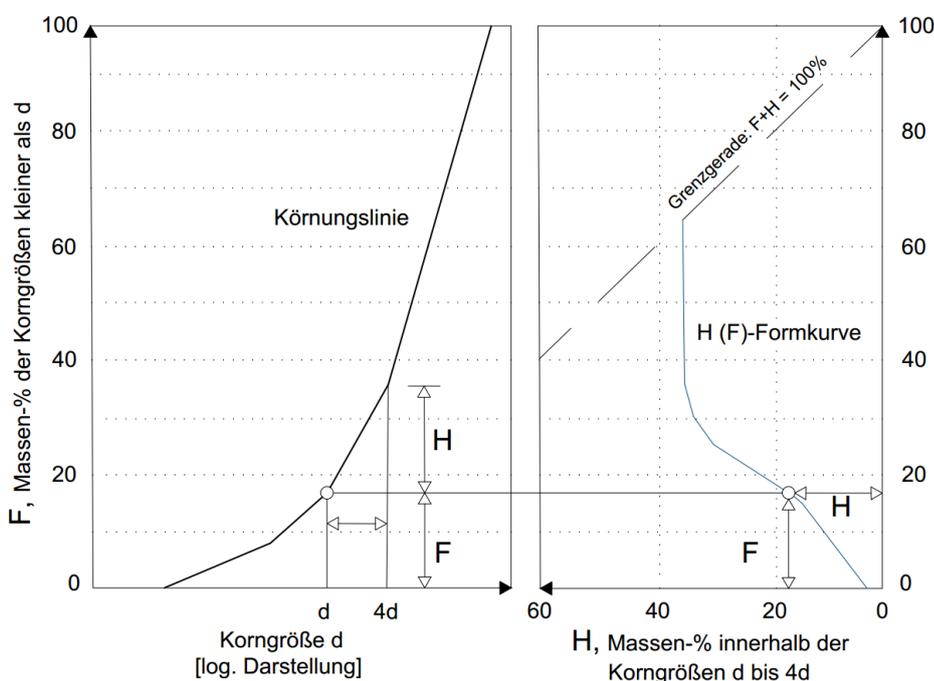


Abb. 24: Grafische Anfertigung der Formkurve nach Kenney und Lau (nach BAW, 2013)

Um die Suffosionsstabilität eines Bodens auf Basis der Kornverteilung nachzuweisen, darf der Körnungsverlauf im Bereich d bis $4d$ eine gewisse Sekantensteigung (H/F -Verhältnis) nicht unterschreiten. Kenney und Lau differenzieren dabei zwischen einem

weichen ($H = 1,0 \cdot F$) und einem harten Kriterium ($H = 1,3 \cdot F$). Die Überprüfung auf Einhaltung dieser beiden Suffosionsbedingungen erfolgt in grafischer Weise in einem $H(F)$ -Diagramm nach Abb. 25 (90° gedrehte Formkurve nach Abb. 24). Verläuft der $H(F)$ -Kurvenverlauf in der dunkelgrau angelegten Rechteckfläche ($H > F$, weiches Kriterium) oder schneidet diesen Bereich, so ist der Boden nach Kenney und Lau als suffosiv einzustufen. Führt die $H(F)$ -Formkurve durch den hellgrau hinterlegten Bereich ($H < 1,3 \cdot F$, hartes Kriterium) oder schneidet diesen, befindet sich der Boden im Grenzbereich zwischen suffosiven und stabilen Transportverhältnissen. Sofern beide grau dargestellten Flächen von der $H(F)$ -Kurve ungeschnitten bleiben, hat der Boden nach Kenney und Lau ausreichende Suffosionsstabilität. (nach BAW, 2013)

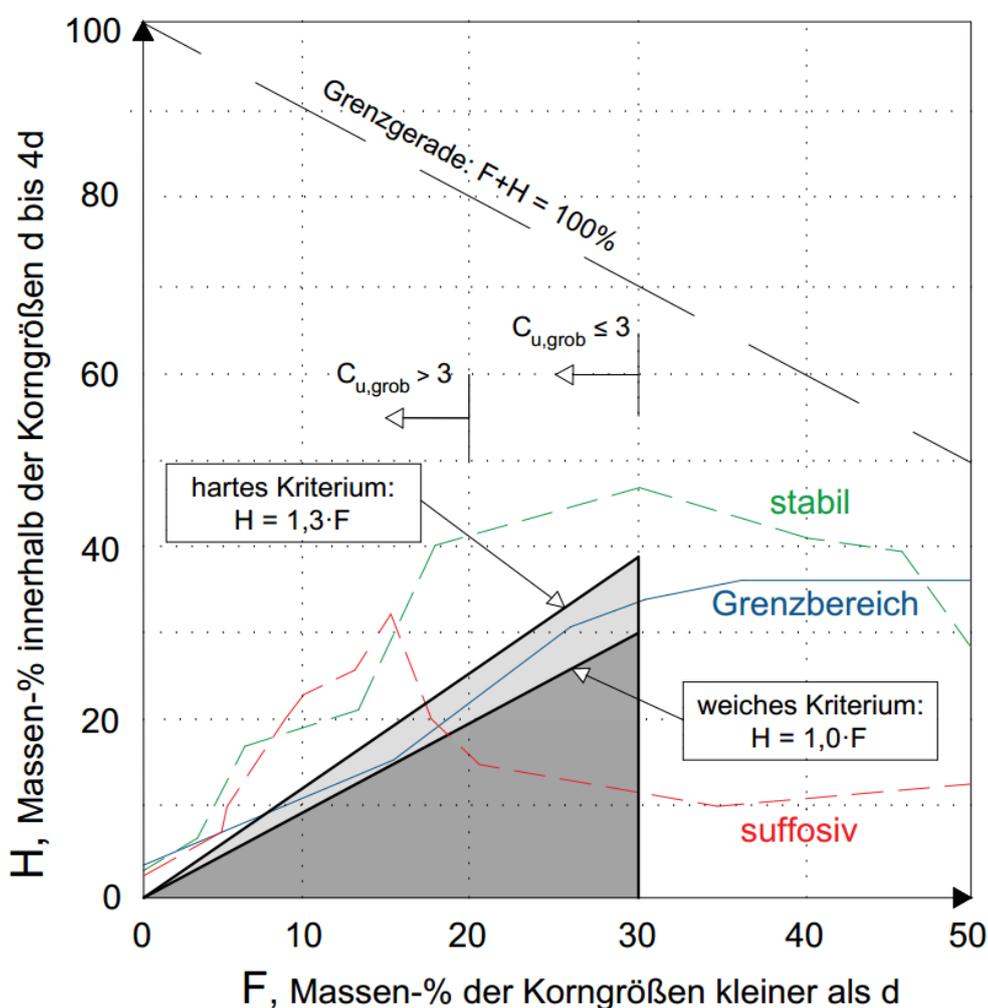


Abb. 25: Suffosionsnachweis nach Kenney und Lau für drei schematisch dargestellte Körnungslinien (nach BAW, 2013)

Der Anwendungsbereich dieses Verfahrens erstreckt sich auf nichtbindige, weitgestufte Kornverteilungen. Darüber hinaus lässt sich das Verfahren nach Kenney und Lau auch bei un stetigen Körnungsverläufen und sogar auf Böden mit Fehl- oder Ausfallkörnung anwenden. (nach BAW, 2013)

4.3.4 Verfahren nach Burenkova (1993)

Burenkova stellt die Überlegung an, den Übergangskorngrößenbereich zwischen tragender (Korngerüst) und frei beweglicher (Porenfüller) Körnung auf experimentelle Weise zu untersuchen. Die diesbezüglichen Laborversuche erfolgten an weitgestuften Böden mit einer maximalen Ungleichförmigkeitszahl C_u von 200 sowie einem Größtkorndurchmesser d_{max} von bis zu 100 mm. (nach BAW, 2013)

Im Zuge der Versuchsauswertung führt Burenkova die bodenbeschreibenden Kenngrößen h' sowie h'' ein. Darauf aufbauend gilt nach Burenkova ein Boden als suffosionsstabil, sofern folgende Bedingung erfüllt ist:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1 \quad (32)$$

$h' = d_{90} / d_{60}$ [-] Quotient aus Korngröße bei 90 % und 60 % Massendurchgang

$h'' = d_{90} / d_{15}$ [-] Quotient aus Korngröße bei 90 % und 15 % Massendurchgang

Abb. 26 zeigt die Versuchsergebnisse von Burenkova in einer h'' - h' - Darstellung. Demnach gelten nach Burenkova Böden, welche sich innerhalb der zwei Grenzgeraden (grau hinterlegt) befinden, als stabil, andernfalls als suffosiv.

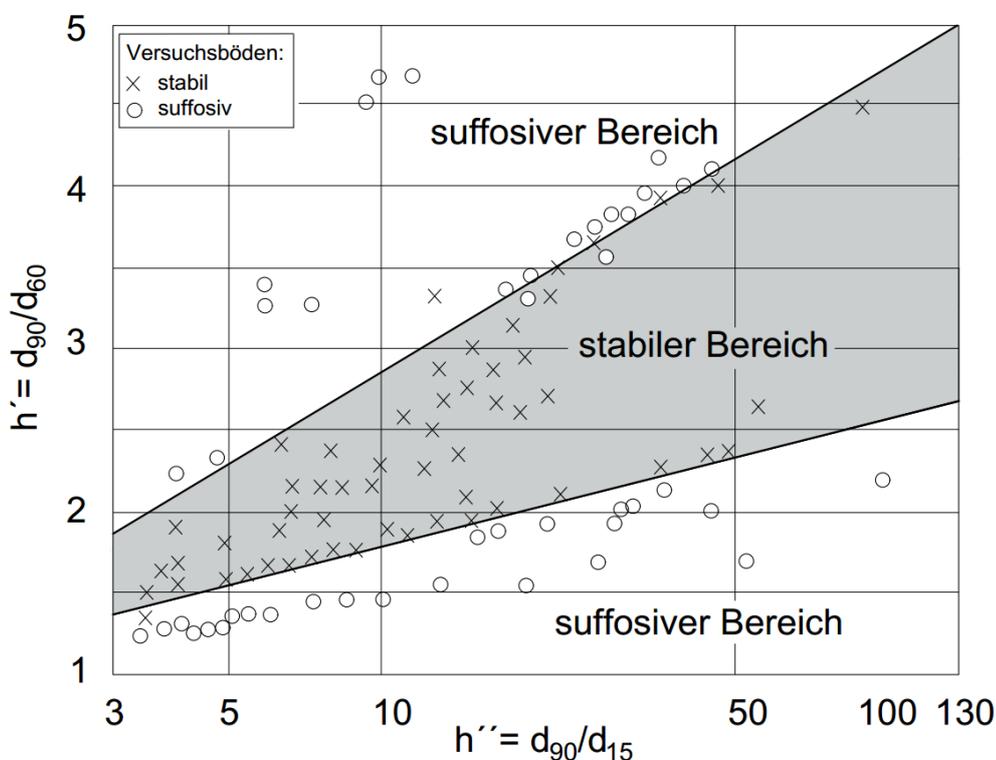


Abb. 26: Versuchsergebnisse von Burenkova mit Grenzbereich (nach BAW, 2013)

Nach Abb. 26 ist das Suffosionskriterium nach Burenkova auf den Gültigkeitsbereich von $1 \leq h' \leq 5$ bzw. $3 \leq h'' \leq 130$ beschränkt.

4.4 Chronologie der Nachweisführung

Die in Kap. 4.3 vorgestellten Verfahren zur Beurteilung der Suffosionsstabilität auf Basis der Korngrößenverteilung des Bodens unterscheiden sich hinsichtlich Komplexität und Anwendungsbereich. Das Bestreben der Ingenieurpraxis besteht grundsätzlich darin, die Nachweise möglichst einfach zu halten, aber diese dennoch auf ein weites Spektrum verschiedener Böden anwenden zu können. Auf Grundlage einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungsweise gibt die Bundesanstalt für Wasserbau in seinem herausgegebenen Merkblatt zum „Materialtransport im Boden (BAW, 2013)“ eine systematische Vorgehensweise bei der Anwendung der in Kap. 4.3 erläuterten Suffosionsverfahren an (Abb. 27), die im Folgenden näher erläutert wird:

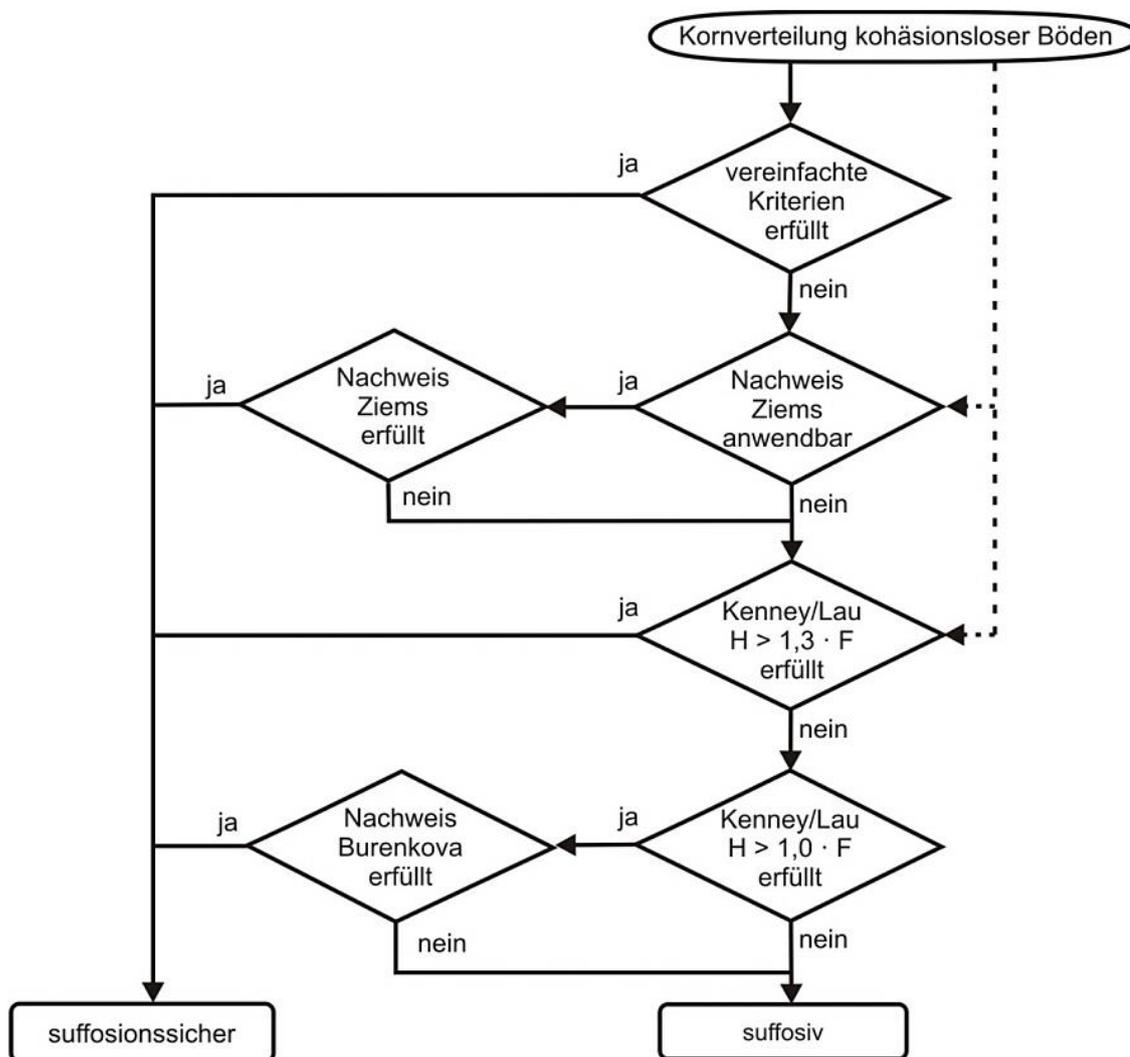


Abb. 27: Von der Bundesanstalt für Wasserbau empfohlenes Ablaufschema bei der Anwendung der Suffosionsverfahren (BAW, 2013)

In einem ersten Schritt erfolgt die Überprüfung anhand dem einfachen Verfahren (Kap. 4.3.1). Ist das Kriterium des einfachen Verfahrens erfüllt, gilt der Boden ohne weiteren Nachweis als suffosionssicher, anderenfalls wird mit dem Verfahren nach Ziems (Kap. 4.3.2) fortgefahren. Vorweg muss dabei überprüft werden, ob das Verfahren nach Ziems überhaupt zur Suffosionsbeurteilung herangezogen werden kann. Sofern die Gültigkeitsbedingungen erfüllt sind und sich aus dem Verfahren nach Ziems keine Suffosionsgefährdung ergibt, darf der Boden ohne weitere Überprüfung als stabil klassifiziert werden. Anderenfalls, sofern die Anwendungsgrenzen überschritten oder Ziems Suffosionskriterium nicht erfüllt ist, wird in einem nächsten Schritt der Nachweis nach Kenney und Lau (Kap. 4.3.3) herangezogen. Hierbei wird empfohlen, zuerst den Ansatz des harten Kriteriums ($H > 1,3 \cdot F$) zu überprüfen. Bei der Erfüllung des harten Kriteriums gilt der Boden als stabil. Sofern das harte Kriterium nicht erfüllt wird, ist zu kontrollieren, ob sich die Formkurve im Grenzbereich zwischen dem harten und dem weichen Kriterium ($1,0 \cdot F < H \leq 1,3 \cdot F$) befindet. Tritt der Fall ein, dass die Formkurve des Bodens im Übergangsbereich zwischen stabilen bzw. suffosiven Verhältnissen liegt, ist es nicht möglich, mithilfe des Ansatzes nach Kenney und Lau eine eindeutige Aussage zu treffen. Aufgrund dieser Unklarheit wird empfohlen, eine zusätzliche Absicherung auf Basis des Suffosionskriteriums nach Burenkova (Kap. 4.3.4) durchzuführen. Der Boden gilt ohne weitere Nachweisführung als suffosiv, sobald Ziems weicher Suffosionsansatz ($H \leq 1,0 \cdot F$) nicht erfüllt ist.

Darüber hinaus soll erwähnt sein, dass es für eine rasche Suffosionsbeurteilung nicht zwingend erforderlich ist chronologisch nach dem empfohlenen Ablaufschema nach Abb. 27 vorzugehen, sondern die Nachweisführung direkt mit dem Verfahren nach Ziems oder nach Kenney & Lau zu beginnen.

5 Laborarbeit

5.1 Allgemeines

Die primäre Aufgabe der Labortätigkeit ist darauf ausgerichtet, die bodenphysikalischen Eigenschaften, im Besonderen die Durchlässigkeitsbeiwerte k , für drei grob- bzw. gemischtkörnige Bodenproben in Abhängigkeit der Lagerungsdichte zu bestimmen. Darüber hinaus wird das weitergehende Ziel verfolgt, mithilfe eines entsprechend adaptierten Durchlässigkeitsversuchs den Einfluss der Verdichtung in Bezug auf die Suffosionsstabilität weitgestufter nichtbindiger zu untersuchen. Die Versuchsdurchführung erfolgte im Labor des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung erfolgt für die zu untersuchenden Böden die Ermittlung der Korngrößenverteilung nach ÖNORM B 4412:1974. Die Korngrößenverteilung wird auf Grundlage einer Siebanalyse ($GK \geq 0,063$ mm) und einer etwaigen Schlämmanalyse ($GK < 0,063$ mm) erstellt. Für Proben mit ausschließlich grobkörnigen, nicht bindigen Anteilen wird die Trockensiebung bis zu einer Maschenweite von 0,063 mm durchgeführt. Hingegen werden Proben mit schluffigen oder tonigen Anteilen unter Zuhilfenahme einer Wasserspülung bis zu einer Maschenweite von 0,125 mm gesiebt. Für den Massendurchgang $\leq 0,125$ mm wird die Korngrößenverteilung mittels Schlämmanalyse (Aräometerverfahren) bestimmt. Die grafische Darstellung der Korngrößenverteilung wird durch das Softwareprogramm „BodenLab“ realisiert. Die bodenspezifischen sowie bodenbeschreibenden Kornverteilungskurven sowie die daraus ableitbaren Kenngrößen, wie z. B. die vorhandene Ungleichförmigkeitszahl C_u oder die Krümmungszahl C_c , bilden die Grundlage für die Durchlässigkeitsermittlung auf Basis der in Kap. 3.2 erläuterten indirekten Bestimmungsmethoden.

Um reale Vergleichswerte zu den indirekt auf Basis der Kornverteilung berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k zu erhalten, werden die Bodenproben mit unterschiedlichen Verdichtungsgraden in einen Versuchszylinder eingebaut und mithilfe eines aufgesetzten Standrohrs bei einem veränderlichen hydraulischen Gefälle durchströmt. Die Beschreibung und Vorgehensweise der direkten Durchlässigkeitsbestimmung findet sich in Kapitel 5.2.1.

Die Durchströmungsversuche zur Ermittlung der Suffosionsstabilität werden mit einem entsprechend modifizierten Durchlässigkeitszylinder durchgeführt. Die Versuchsböden werden mit unterschiedlichen Verdichtungsgraden in die Versuchszelle eingebaut und werden entgegen der Schwerkraft bei einem hydraulischen Gradienten $i = 1$ durch-

strömt. Aufgezeichnet werden der Feinteilaustrag aus der Probe sowie die Kornumlagerung im Inneren der Probe. Die Erläuterung und grafische Veranschaulichung der Versuchsdurchführung findet sich in Kap. 5.2.2.

Im Zuge der Laborarbeit werden drei grob- bzw. gemischtkörnige Bodenproben untersucht. Die Ausgangsprobe (VP1) ist dabei eine natürliche „Murschotterkörnung“, wobei die beiden weiteren Proben (VP2, VP3) ausgehend von den Körnungen der VP1 künstlich erzeugt werden.

Im Überblick handelt es sich dabei um folgende Bodenmaterialien:

Tab. 15: Allgemeine Beschreibung der Versuchsproben

Versuch Nr.	Boden-Art	Entnahme-Art	Herkunft bzw. Erzeugung	Zusätzliche Beschreibung
1	si" sa Gr	gestört	Aushubmaterial	Murschotter von der Baustelle „Südgürtel Graz“
2	co' sa' Gr	gestört	künstlich erzeugt	Murschotter mit reduziertem Kornanteil ≤ 2 mm
3	co" si' Gr	gestört	künstlich erzeugt	Murschotter mit Ausfallkörnung von 0,125 bis 4 mm

5.2 Versuchsdurchführung und Beschreibung

5.2.1 Ermittlung der lagerungsabhängigen Durchlässigkeit

Nach DIN 18126:1996 wird für die Bestimmung der Trockendichte ρ_d bei lockerster und dichtester Lagerung ein, in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser d_{\max} und der Ungleichförmigkeitszahl C_u der Probe, zulässiger Versuchszylinder gewählt. Für die untersuchten Bodenproben ergibt sich daraus ein Stahlzylinder mit der Höhe sowie dem Durchmesser von 25 Zentimeter (Abb. 28). Zu Beginn wird der Versuchszylinder auf eine Filterplatte aufgesetzt und mit dieser verschraubt. Im Anschluss daran wird mit dem Einlegen des Filtervlieses fortgefahren. Das Filtervlies wird lose auf die Filterplatte aufgelegt und hat die Aufgabe, das Auswaschen von durchlässigkeitsrelevanten Feinkornbestandteilen bei den anschließenden Durchströmungsversuchen zu verhindern.

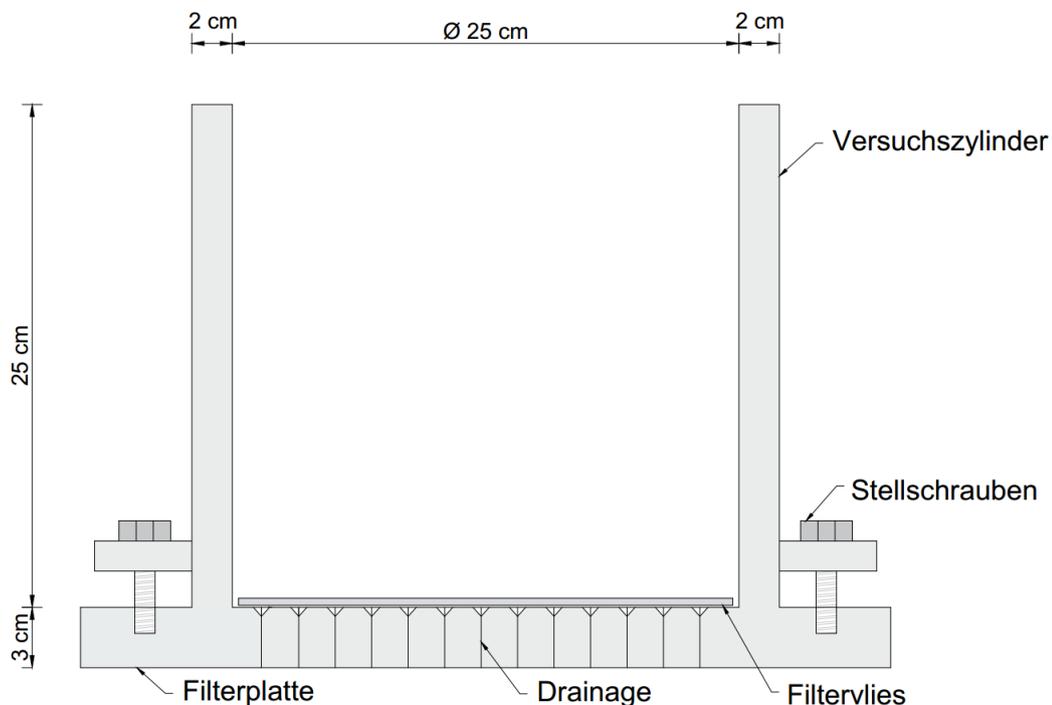


Abb. 28: Schematischer Aufbau des verwendeten Versuchszylinders (nach DIN 18126:1996)

Im Zuge der lagerungsabhängigen Durchlässigkeitsversuche werden die Proben hinsichtlich vier unterschiedlicher Verdichtungsgrade untersucht. In Abhängigkeit der Einbaudichte erfolgt der Einbau der Proben in den Versuchszylinder unterschiedlich und wird nachfolgend für jeden erzeugten Lagerungszustand erläutert:

- Lockerste Lagerung (gemäß DIN 18126:1996):

Die ofengetrocknete Probe wird mit einer für grobkörnige Böden geeigneten Handschaufel in den Versuchszylinder eingebaut (Abb. 29). Durch vorsichtiges Auskippen der feinen Bodenkörnungen sowie sanftem händischen Auflegen der groben Körnun-

gen, kann das Versuchsgefäß lagenweise von unten nach oben bis zur Zylinderoberkante gefüllt werden. Bezieht man die in den Versuchszylinder eingebaute Probenmasse auf das Volumen des Stahlzylinders, ergibt dies die geringstmögliche für die Bodenart sich einstellende Trockendichte ρ_d . Die lockerste Lagerung wird für jede Versuchsprobe an mindestens drei unterschiedlichen Teilproben durchgeführt.

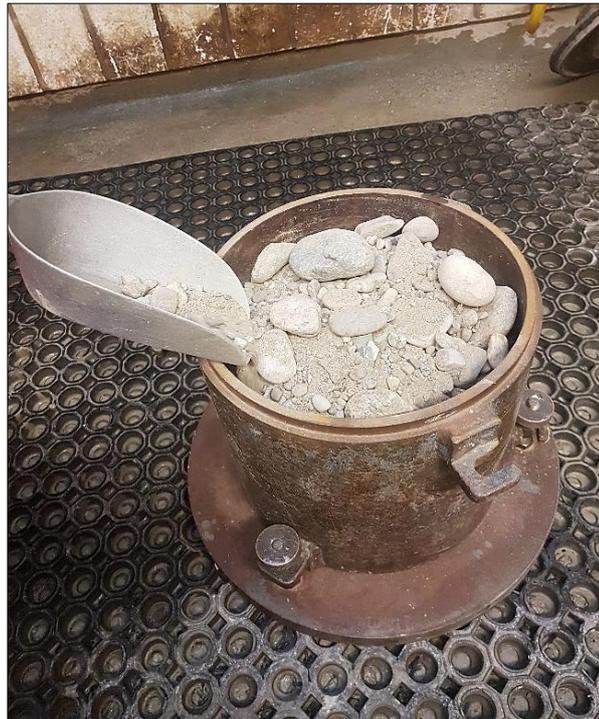


Abb. 29: Lockerster Lagerungseinbau mittels Handschaufel nach DIN 18126:1996

- „Eher lockere“ Lagerung:

Die Probe wird in lockerer Lagerung randvoll in den Versuchszylinder eingebaut, welcher anschließend mithilfe einer Spannvorrichtung auf dem Rütteltisch befestigt wird. Um während der Probeneinrüttelung das „Aufhüpfen“ bzw. „Aufspringen“ oberflächennaher Bodenkörnungen zu verhindern, wird auf die Probenoberfläche eine mit einer Auflast beschwerte Kopfplatte aufgesetzt (Abb. 30). Dadurch ist es möglich, für jeden im Zuge dieser Arbeit mittels Rütteltisch durchgeführten Einrüttelversuch, eine Normalspannung von 10 kN/m² auf die Probenoberfläche zu gewährleisten (DIN 18126:1996). Die Einrüttelung auf eine „eher lockere“ Lagerungsdichte erfolgt über einen Zeitraum von 30 s mit einer Frequenz von 30 U/min. Die im Prüfzylinder durch die Vibrationswirkung entstehende Volumenverringerng kann über die Probensetzung bestimmt werden, wobei mittels Schublehre an sechs im Umfang von 60° versetzten Punkten der Abstand zwischen Zylinderoberkante und Probenoberfläche gemessen wird (Abb. 31). Durch die Differenzbildung von Volumen des Einbauzylinders und Volumen der Probensetzung ist es möglich, das nach der Einrüttelung vorhandene Probenvolumen zu

bestimmen. Unter Berücksichtigung der eingebauten Probenmasse kann die vorhandene Trockendichte ρ_d ermittelt werden. Die „eher lockere“ Lagerung wird für jede Versuchsprobe an mindestens zwei unterschiedlichen Teilproben durchgeführt.



Abb. 30: Probenverdichtung mittels Rütteltisch nach DIN 18126:1996



Abb. 31: Abstandsmessung mittels Schublehre zur Ermittlung der Probensetzung an sechs im Umfang von 60° versetzten Punkten

- „Eher dichte“ Lagerung:

Die Probeneinrüttelung auf eine „eher dichte“ Lagerung erfolgt prinzipiell wie bereits für die Verdichtung auf eine „eher lockere“ Lagerung erläuterten Vorgehensweise, jedoch wird die Einrütteldauer auf 90 s und die Rüttelintensität auf 40 U/min erhöht. Die „eher dichte“ Lagerung wird für jede Versuchsprobe an mindestens zwei unterschiedlichen Teilproben durchgeführt.

- Dichteste Lagerung (gemäß DIN 18126:1996):

Die Verdichtungsarbeit erfolgt mittels Rütteltisch unter Zuhilfenahme einer vollständigen Wassersättigung während der gesamten und 5-minütigen Versuchsdauer. Die Probeneinrüttelung wird dabei mit einer erhöhten Schwingungsfrequenz von 60 U/min realisiert. Die dichteste Lagerung wird für jede Versuchsprobe an mindestens drei unterschiedlichen Teilproben durchgeführt.

- Zusammenfassung:

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur besseren Vergleichbarkeit werden die im Vorhinein beschriebenen Erzeugungsverfahren zur Erlangung unterschiedlicher Verdichtungsgrade in tabellarischer Form (Tab. 16) zusammenfassend dargestellt:

Tab. 16: Realisierter lagerungsabhängiger Probeneinbau

	lockerste Lagerung	eher lockere Lagerung	eher dichte Lagerung	dichteste Lagerung
Einbaugefäß	Versuchs- zylinder	Versuchs- zylinder	Versuchs- zylinder	Versuchs- zylinder
Füllhilfe	Handschaufel	Handschaufel	Handschaufel	Handschaufel
Verdichtungsgerät	–	Rütteltisch	Rütteltisch	Rütteltisch
Rüttelfrequenz	–	30 U/min	45 U/min	60 U/min
Rütteldauer	–	30 s	90 s	300 s
Wassersättigung	Nein	Nein	Nein	Ja

Nachdem die Versuchsprobe lagenweise und gut durchmischt mit der gewünschten Lagerungsdichte in den Versuchszylinder eingebaut wurde, erfolgt die Durchlässigkeitsbestimmung mit einem für gemischtkörnige bzw. mitteldurchlässige Böden geeigneten Standrohr. Dazu wird das Prüfgerät auf die im Versuchszylinder eingebaute Probenoberfläche aufgesetzt und die Kontaktzone zwischen Zylinderinnenkante und Standrohrfußplatte mittels Ton- bzw. Bentonitmasse abgedichtet (Abb. 32). Bei dieser vorwiegend insitu praktizierten Durchlässigkeitsprüfung wird der Probenkörper in Schwerkraftichtung bei einem veränderlichen hydraulischen Gradienten durchströmt, wobei der Durchfluss je Zeiteinheit indirekt über die Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels zwischen zwei im Abstand von 10 cm am Standrohr angebrachten Messmarken ermittelt wird. (nach ÖNORM B 4422-1:1992)

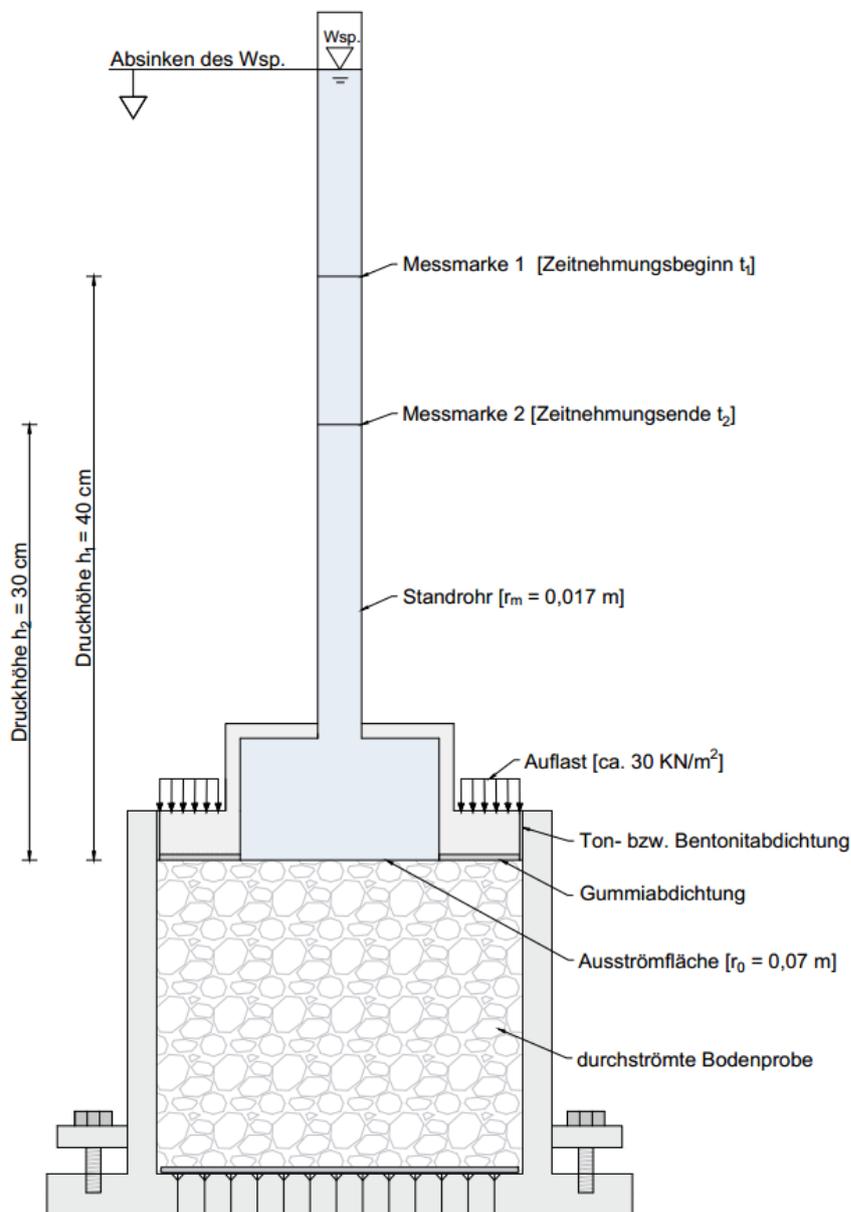


Abb. 32: Durchlässigkeitsermittlung mittels Standrohrversuch (nach ÖNORM B 4422-1:1992)

Durch die Aufbringung einer Auflast auf die kreisförmige Fußplatte des Standrohrs wird dem hydrostatischen Auftrieb entgegengewirkt. Für jeden lagerungsabhängigen Teilversuch werden die Messungen solange wiederholt, bis sich eine konstante Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels einstellt und sich für die Probe ein konstanter und damit repräsentativer Durchlässigkeitsbeiwert k ergibt. Um einen vergleichbaren Durchlässigkeitsbeiwert k bei einer Normtemperatur von 10° angeben zu können, wird bei jeder Messung die vorhandene Wassertemperatur bestimmt. Die Ermittlung des Durchlässigkeitswerts k_{10} mittels Standrohrversuch bei einem veränderlichen hydraulischen Gefälle erfolgt nach folgender Gleichung (ÖNORM B 4422-1:1992):

$$k_{10} = \alpha \cdot \frac{r_m^2}{0,88 \cdot r_0 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (33)$$

k_{10}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Normtemperatur von 10°C
α	[-]	Temperaturkorrekturbeiwert
r_m	[m]	Radius des Standrohrs (mit: $r_m = 0,017$ m)
r_0	[m]	Radius der Ausströmfläche (mit: $r_0 = 0,07$ m)
t_1	[s]	Beginn der Zeitnehmung
t_2	[s]	Ende der Zeitnehmung
h_1	[m]	Druckhöhe im Standrohr bei t_1 (mit: $h_1 = 0,4$ m)
h_2	[m]	Druckhöhe im Standrohr bei t_2 (mit: $h_2 = 0,3$ m)



Abb. 33: Realisierte Standrohrmessung zur Bestimmung der Probendurchlässigkeit

5.2.2 Ermittlung der lagerungsabhängigen Suffosionsstabilität

Das Versuchsinstrumentarium für den Suffosionsversuch ist ein adaptierter Durchlässigkeitszylinder ($h_z = 35 \text{ cm}$, $\varnothing_z = 25 \text{ cm}$). Die Versuchsproben werden in lockerster $\rho_{d,LL}$ und dichtester Lagerung $\rho_{d,DL}$ in den Zylinder eingebaut und anschließend bei einem hydraulischen Gradienten von 1 entgegen der Schwerkraft durchströmt (Abb. 34).

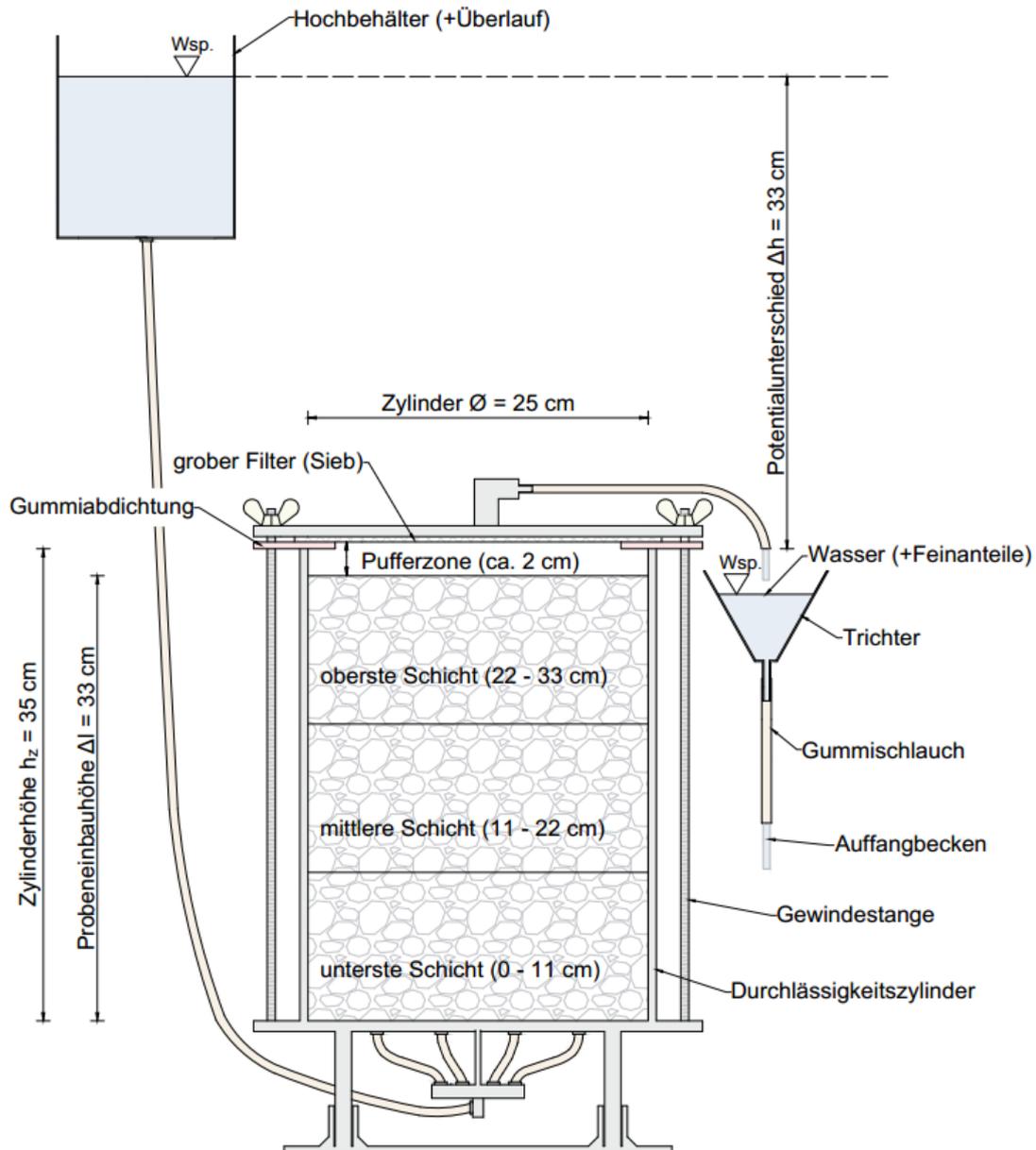


Abb. 34: Suffosionsversuch mittels adaptiertem Durchlässigkeitszylinder

Der für den Durchströmungsversuch adaptierte Durchlässigkeitszylinder wird dabei als „offenes System“ ausgebildet. Das bedeutet, dass den oberen Abschluss des Zylinders ein grober Filter (Sieb) bildet, sodass die durch die Schleppekraft des Wassers mobilisierten feinen Kornpartikel aus der Versuchszelle ausgetragen werden können. Der Wasserzufluss erfolgt über einen an einem Leitungswasseranschluss gekoppelten

Hochbehälter (Oberwasser). Zur Gewährleistung einer konstanten Wasserspiegelhöhe während der gesamten Versuchsdauer dient eine im Hochbehälter angebrachte Überlaufeinrichtung. Die Abführung des die Probe durchströmten und mit Feinanteilen kontaminierten Wassers wird über einen freien Auslauf im Kopfbereich des Zylinders realisiert. Über einen Trichter mit einem angeschlossenen Gummischlauch werden die Feinanteile in ein Auffangbecken übergeführt (Abb. 35). Der Durchströmungsversuch wird für jede Probe mit dazugehöriger Lagerung solange durchgeführt, bis sich der Feinteilaustrag einstellt.

Die Versuchsauswertung erfolgt nach zwei Grundsätzen, nämlich, einerseits den Feinteilaustrag aus der Probe, andererseits die Kornumlagerung in der Probe zu evaluieren.

Durch die im Auffangbecken sedimentierten und im Anschluss ofengetrockneten Feinanteile kann die ausgetragene Masse bestimmt werden. Um den Austrag hinsichtlich dem enthaltenen Körnungsspektrum (v. a. \emptyset Größtkorn) genauer zu untersuchen, wird eine anschließende Schlämmanalyse durchgeführt.

Zur Evaluierung etwaiger in der Probe stattfindender Kornumlagerungen wird die Probe in Abhängigkeit der Einbauhöhe in drei gleichgroße Schichten unterteilt und dementsprechend aus der Versuchszelle ausgebaut (Abb. 34 + 36). Um Kornumlagerungen nachweisen zu können, wird für die Bodenvolumina der untersten, der mittleren sowie der obersten Schicht eine separate Kornverteilung erstellt. Die Nasssiebungen erfolgen bis zu einer Maschenweite von 0,063 mm. Für die Durchgangskörnung $\leq 0,063$ mm wird die Trockenmasse bestimmt. Auf die Untersuchung der Feinkornzusammensetzung $\leq 0,063$ mm mittels Schlämmanalyse wird verzichtet.



Abb. 35: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Suffusionsstabilität auf Basis eines adaptierten Durchlässigkeitsversuchs



Abb. 36: Lagenweiser Probenausbau aus dem Zylinder nach beendeter Durchströmung (drei separate Bereiche: unterste, mittlere, oberste Schicht)

5.3 Versuch Nr. 1

Versuchsprobe 1 stellt eine gemischtkörnige „Murschotterkörnung“ dar, welche von der Baustelle „Südumfahrung Graz – weiterführende Errichtung des Südgürtels in Graz“ entnommen wurde. Die Entnahme erfolgte in gestörter Weise von einem während der Bauausführung zwischengelagerten Aushubmaterial (Abb. 37).



Abb. 37: Versuchsprobe 1 (si“ sa Gr): Murschotter

Die Versuchsprobe 1 zeigt einen dominierenden Anteil an Kies von 74 % der Gesamtmasse. Der Anteil an Sand beträgt 19 % und der Anteil an Schluff ergibt sich zu 5 %. Steine sind zu 2 % der Gesamtmasse enthalten (Tab. 17). Die Versuchsprobe 1 hat eine stetige und weitgestufte Körnungslinie mit der kennzeichnenden Ungleichförmigkeitszahl C_u von 94 sowie der Krümmungszahl C_c von 5 (Abb. 38).

Tab. 17: Korngrößenverteilung der Versuchsprobe 1

Korngrößenverteilung (gemäß ÖNORM B 4412:1974)		
Körnungsbereich [mm]	Massenanteil [%]	Art
90 - 63	2	Steine 2 %
63 - 45	11	Kies 74 %
45 - 31,5	13	
31,5 - 16	22	
16 - 8	15	
8 - 4	9	
4 - 2	4	
2 - 1	3	Sand 19 %
1 - 0,5	3	
0,5 - 0,25	6	
0,25 - 0,125	5	
0,125 - 0,063	2	
0,063 - 0,002	5	Schluff 5 %

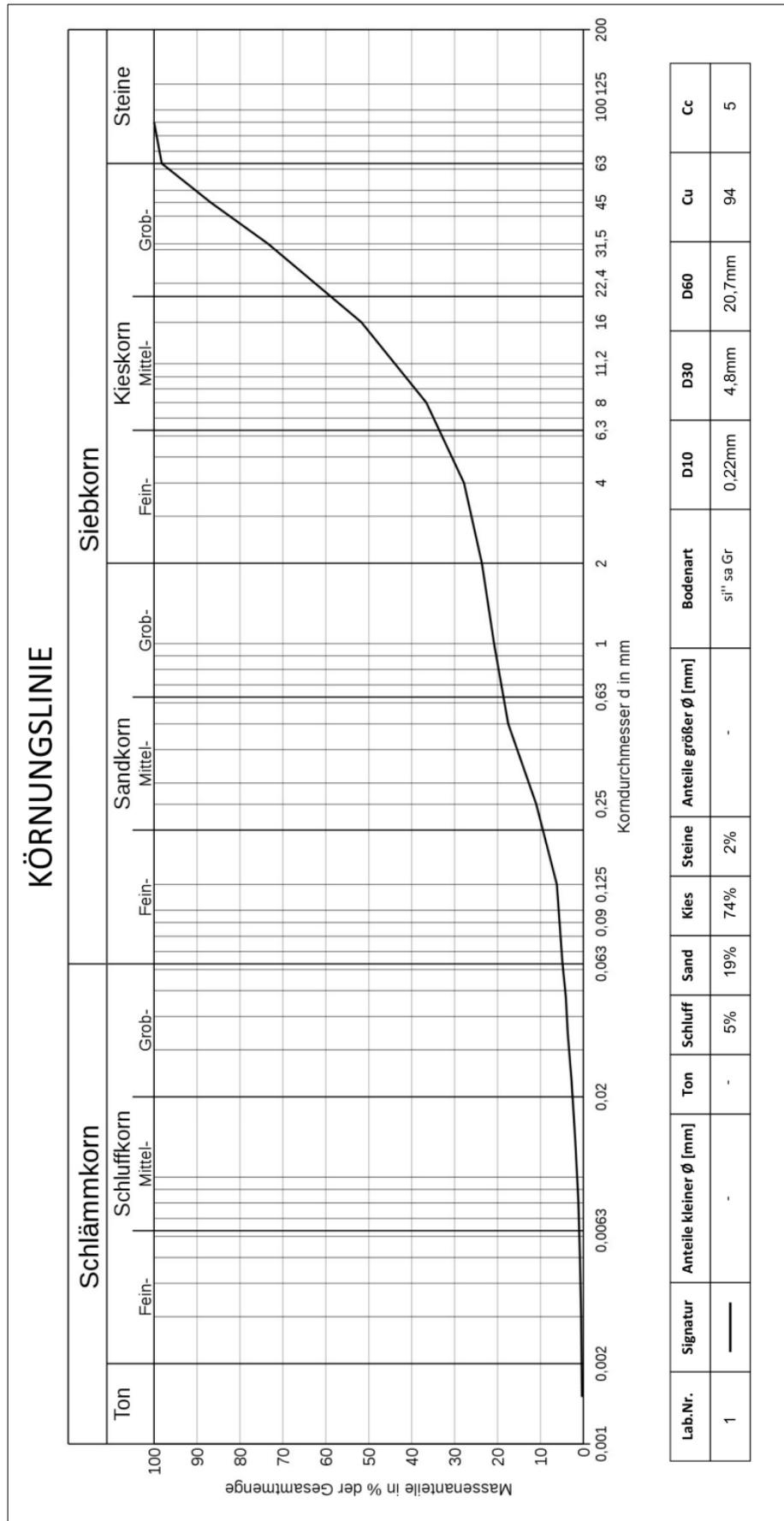


Abb. 38: Körnungslinie der Versuchsprobe 1 (nach ÖNORM B 4412:1974)

5.3.1 Lagerungsabhängige Durchlässigkeit

Nachfolgend sind die mittels Standrohr ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k der Versuchsprobe 1 (VP1) für jeden Teilversuch eines Verdichtungsgrades angegeben. Die Abhängigkeit zwischen dem k -Wert und der Trockendichte ρ_d , der Porenzahl e sowie dem Porenanteil n ist tabellarisch (Tab. 18 - 21) und grafisch (Abb. 39 - 41) dargestellt.

Tab. 18: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die lockerste Lagerungsdichte (VP1)

Einbauzustand:	lockerste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	1.1	1.2	1.3
ρ_d [g/cm ³]	2,01	2,03	2,01
e [-]	0,36	0,35	0,36
n [%]	27	26	27
k_{10} [m/s]	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$

Tab. 19: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher lockere“ Lagerungsdichte (VP1)

Einbauzustand:	„eher lockere“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	1.4	1.5	–
ρ_d [g/cm ³]	2,07	2,08	–
e [-]	0,32	0,32	–
n [%]	24	24	–
k_{10} [m/s]	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	–

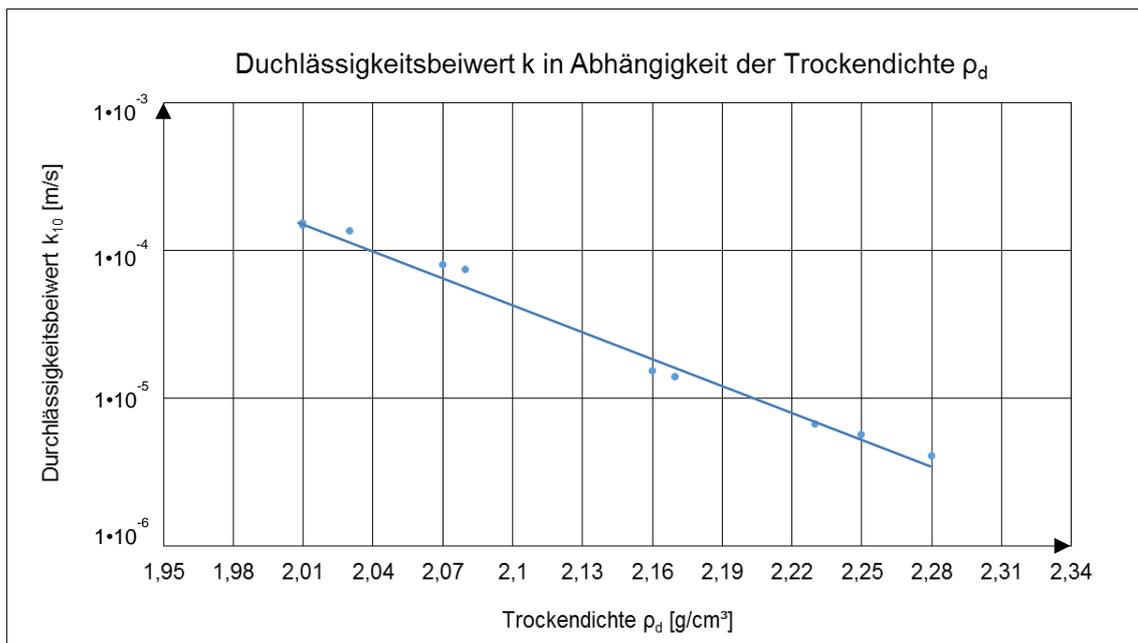
Tab. 20 : Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher dichte“ Lagerungsdichte (VP1)

Einbauzustand:	„eher dichte“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	1.6	1.7	–
ρ_d [g/cm ³]	2,17	2,16	–
e [-]	0,26	0,27	–
n [%]	20	21	–
k_{10} [m/s]	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	–

Tab. 21: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die dichteste Lagerungsdichte (VP1)

Einbauzustand:	dichteste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	1.8	1.9	1.10
ρ_d [g/cm ³]	2,23	2,25	2,28
e [-]	0,23	0,22	0,20
n [%]	19	18	17
k_{10} [m/s]	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$

Für die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse wird eine Ausgleichsgerade herangezogen, um die Abhängigkeitsbeziehung zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k und den einzelnen lagerungsabhängigen Parametern (Trockendichte ρ_d , Porenzahl e , Porenanteil n) darzustellen:

Abb. 39: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Trockendichte ρ_d (VP1)

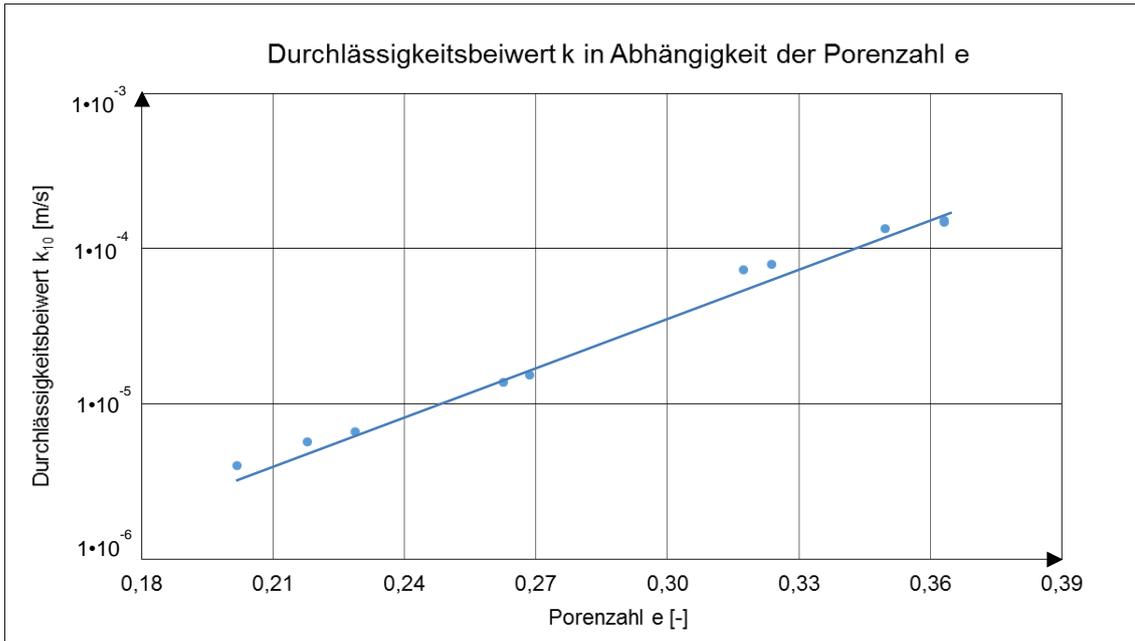


Abb. 40: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Porenzahl e (VP1)

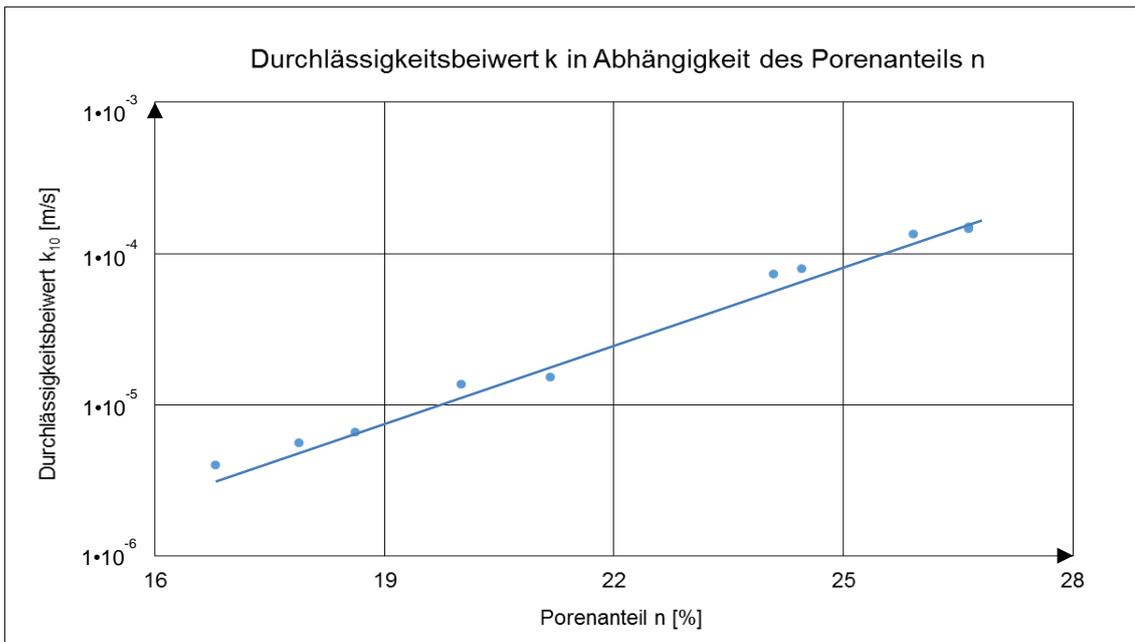


Abb. 41: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit des Porenanteils n (VP1)

In einer zusammenfassenden Darstellung (Tab. 22) werden die in Abhängigkeit der Lagerungsdichte mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k den berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k aus den indirekten Verfahren gegenübergestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die im Labor für einen Probeneinbauzustand ermittelten Teilergebnisse als gemittelter Durchlässigkeitsbeiwert k angegeben.

Die notwendigen Formeln sowie die Anwendungsgrenzen der indirekten Verfahren sind in Kap. 3.2 angeführt. Die für die Berechnung benötigten Kornverteilungsparameter, wie die Ungleichförmigkeitszahl C_u sowie der wirksame Korndurchmesser d_w , werden der Kornverteilungskurve aus Abb. 38 entnommen.

Tab. 22: Vergleich der mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k mit den indirekt auf Basis der Kornverteilung berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten (VP1)

	lockerste Lagerung	eher lockere Lagerung	eher dichte Lagerung	dichteste Lagerung
Versuch Nr.	1.1 - 1.3	1.4 - 1.5	1.6 - 1.7	1.8 - 1.10
Trockendichte ρ_d [g/cm³]	2,02	2,08	2,17	2,25
Porenanteil n [%]	27	24	21	18
Porenzahl e [-]	0,36	0,32	0,27	0,22
Lagerungsdichte D [-]	0	0,33	0,67	1
Relative Dichte I_D [-]	0	0,29	0,64	1
Nachfolgend werden die direkt sowie indirekt ermittelten k_{10} -Werte angegeben [m/s]:				
Standrohrversuch	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$
Hazen (1892)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Zieschang (1961)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Beyer (1964)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 20$ überschritten			
Konzeny-Köhler (1965)	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Seiler (1973)	$4,1 \cdot 10^{-2}$			
Sichardt (1927)	$1,4 \cdot 10^{-3}$			
Bialas et al. (1970)	$2,2 \cdot 10^{-3}$			
Seelheim (1880)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			

5.3.2 Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Suffosionsversuchs für die Versuchsprobe 1 im lockersten Lagerungszustand $\rho_{d,LL}$ angeführt. Die Auswertung der Kornumlagerung (Partikeltransporte) sowie des Feinteilaustrags (Masseverlust) erfolgt zuerst in einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung (Tab. 23), welche in weiterer Folge durch eine grafische Visualisierung (Abb. 42) unterstützt wird.

Tab. 23: Auswertung der Kornumlagerung sowie des Feinteilaustrags für die lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$ (Versuchsprobe 1)

Suffosionsversuch mittels adaptierten Durchlässigkeitszylinder				
Bodenkennwerte:		Versuchskennwerte:		
Einbaumasse ($1639 \text{ g} \leq 0,063 \text{ mm}$): <u>32778 g</u>		hydraulischer Gradient: <u>$i = 1$</u>		
Einbauhöhe ($\varnothing_{\text{Zylinder}} = 25 \text{ cm}$): <u>33 cm</u>		Durchströmungsdauer: <u>240 min</u>		
Trockendichte: $\rho_d = \underline{2,02 \text{ g/cm}^3}$		Datum: <u>08.12.2016</u>		
Kornumlagerung im Zylinder (VP1: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)				
Korngröße [mm]	Ausgangskörnung [Massen-%]	unterste Schicht [Massen-%]	mittlere Schicht [Massen-%]	oberste Schicht [Massen-%]
≥ 63	2	0	5	0
63 - 2	74	64	69	75
2 - 0,5	6	10	7	6
0,5 - 0,25	6	11	8	7
0,25 - 0,125	5	7	5	5
0,125 - 0,063	2	3	2	3
$\leq 0,063$	5	5	4	4
Feinteilaustrag aus Zylinder (VP1: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)				
Ausgeschwemmte Masse:	<u>131,2 g</u>	bezogen auf die Einbaumasse: <u>0,4 %</u> bezogen auf die Feinkornmasse $\leq 0,063 \text{ mm}$: <u>8,0 %</u>		
\varnothing Größtkorn (Kornverteilung):	<u>0,063 mm</u>	(100 % Schluff)		

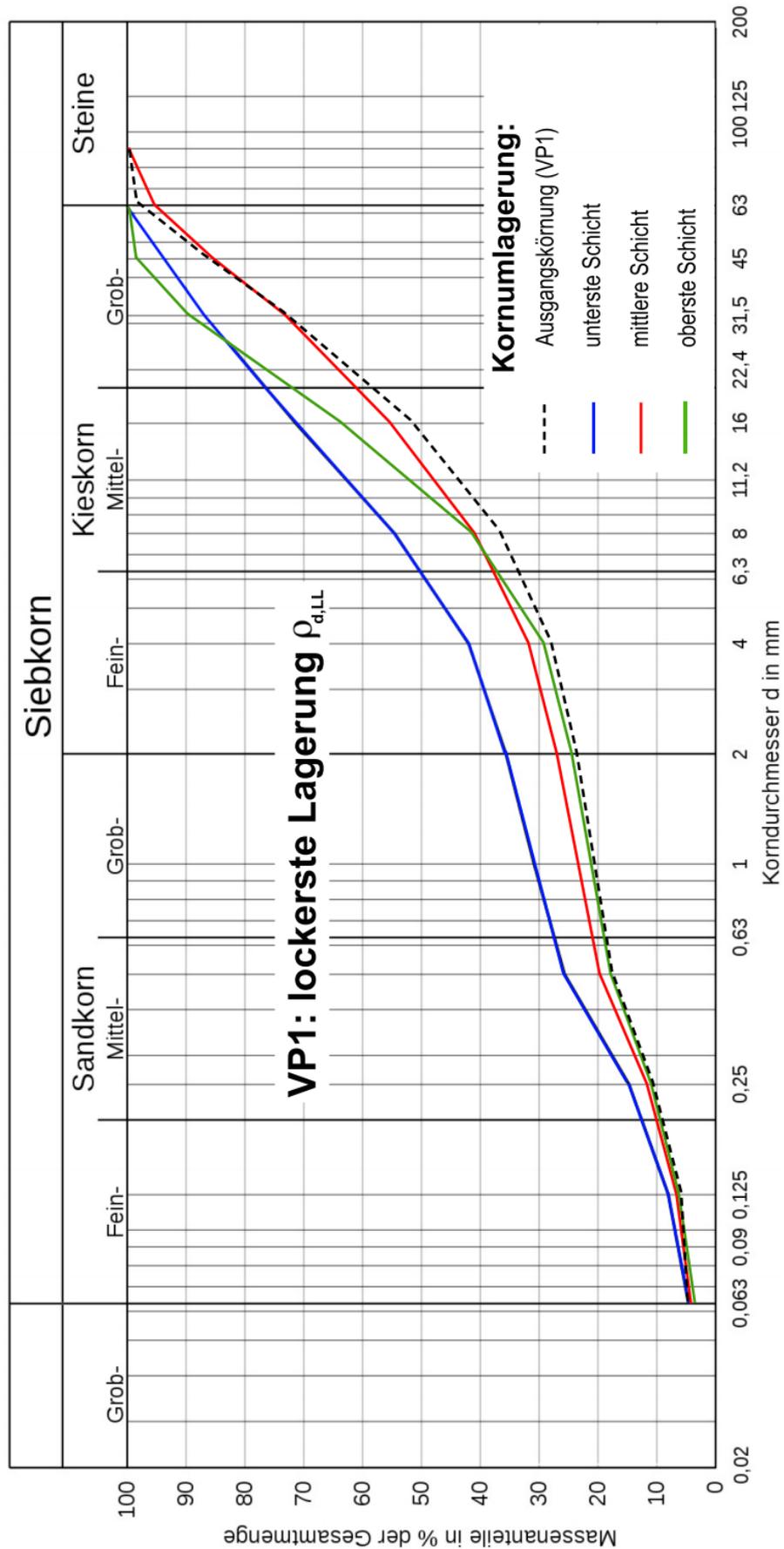


Abb. 42: Auswertung der Kornumlagerung auf Grundlage einer in drei Zylinderschichten durchgeführten Korngrößenverteilung (Versuchsprobe 1: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Suffosionsversuchs für die Versuchsprobe 1 im dichtesten Lagerungszustand $\rho_{d,DL}$ angeführt. Die Auswertung der Kornumlagerung (Partikeltransporte) sowie des Feinteilaustrags (Masseverlust) erfolgt zuerst in einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung (Tab. 24), welche in weiterer Folge durch eine grafische Visualisierung (Abb. 43) unterstützt wird.

Tab. 24: Auswertung der Kornumlagerung sowie des Feinteilaustrags für die dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$ (Versuchsprobe 1)

Suffosionsversuch mittels adaptierten Durchlässigkeitszylinder				
Bodenkennwerte:		Versuchskennwerte:		
Einbaumasse ($1819 \text{ g} \leq 0,063 \text{ mm}$): <u>36373 g</u>		hydraulischer Gradient: <u>$i = 1$</u>		
Einbauhöhe ($\varnothing_{\text{Zylinder}} = 25 \text{ cm}$): <u>33 cm</u>		Durchströmungsdauer: <u>240 min</u>		
Trockendichte: $\rho_d = \underline{2,25 \text{ g/cm}^3}$		Datum: <u>11.12.2016</u>		
Kornumlagerung im Zylinder (VP1: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)				
Korngröße [mm]	Ausgangskörnung [Massen-%]	unterste Schicht [Massen-%]	mittlere Schicht [Massen-%]	oberste Schicht [Massen-%]
≥ 63	2	3	0	0
63 - 2	74	63	73	73
2 - 0,5	6	9	7	8
0,5 - 0,25	6	10	8	8
0,25 - 0,125	5	7	5	5
0,125 - 0,063	2	3	2	3
$\leq 0,063$	5	5	5	3
Feinteilaustrag aus Zylinder (VP1: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)				
Ausgeschwemmte Masse:	<u>51,2 g</u>	bezogen auf die Einbaumasse: <u>0,1 %</u> bezogen auf die Feinkornmasse $\leq 0,063 \text{ mm}$: <u>2,8 %</u>		
\varnothing Größtkorn (Kornverteilung):	<u>0,063 mm</u>	(100 % Schluff)		

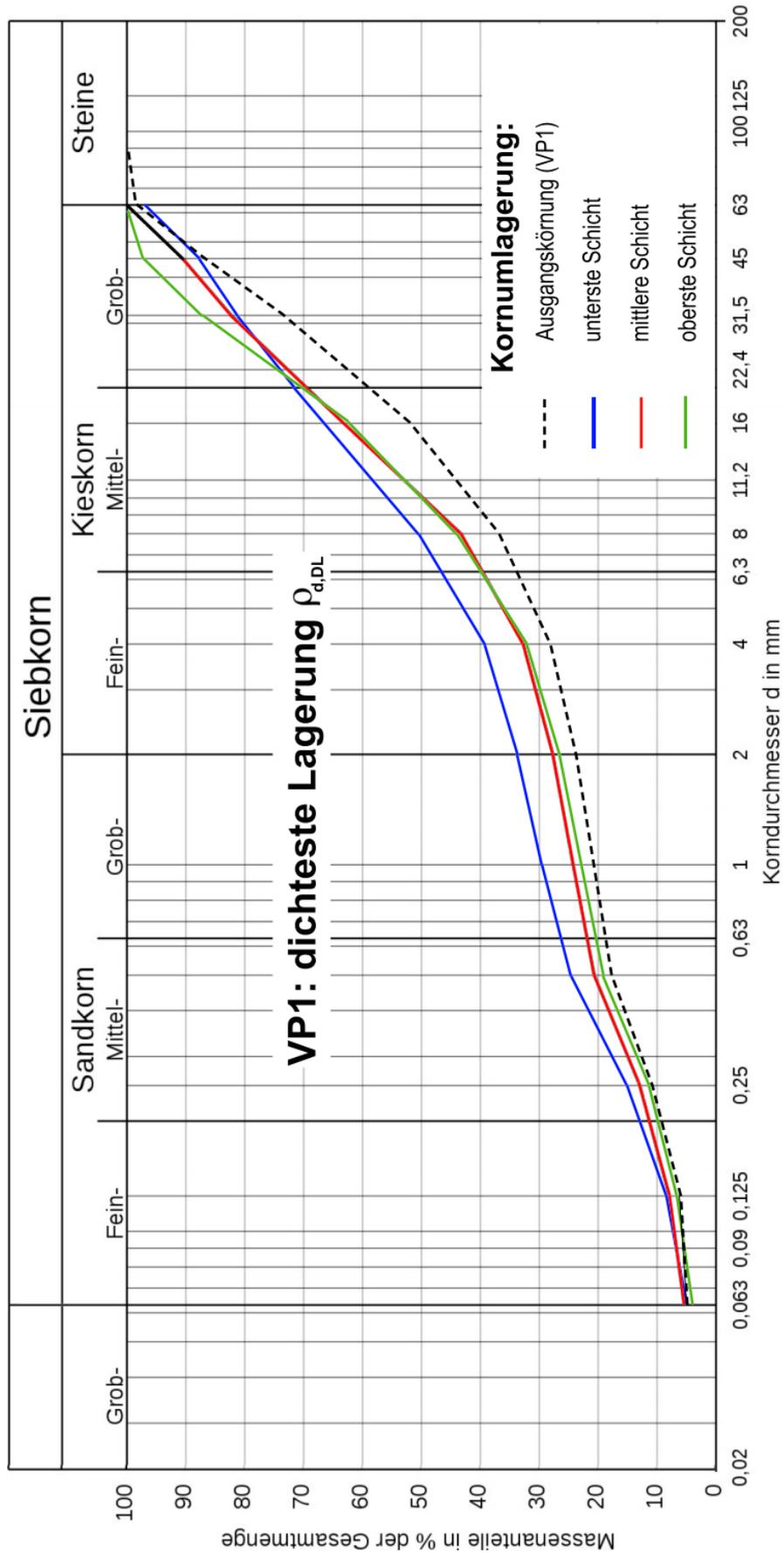


Abb. 43: Auswertung der Kornumlagerung auf Grundlage einer in drei Zylinderschichten durchgeführten Korngrößenverteilung (Versuchsprobe 1: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)

5.3.3 Bewertung der Ergebnisse

Für die Versuchsprobe 1 ergibt sich im Mittel aus den Teilversuchen eine minimale Trockendichte $\rho_{d,\min}$ von $2,02 \text{ g/cm}^3$ sowie eine maximale Dichte $\rho_{d,\max}$ von $2,25 \text{ g/cm}^3$. Der Durchlässigkeitsbeiwert k variiert in Abhängigkeit der Lagerungsdichte zwischen $k = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ und $k = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Hervorgerufen durch die hohe Ungleichförmigkeitszahl C_u und dem stetigen Körnungsverlauf hat die Versuchsprobe 1 dahingehend positive Verdichtungseigenschaften, dass der Durchlässigkeitsbeiwert k im dichtesten Lagerungszustand $\rho_{d,DL}$ um einen Faktor von 26 gegenüber dem lockersten Probenlagerungszustand $\rho_{d,LL}$ reduziert werden kann. Da es mithilfe der Rütteldruckverdichtung möglich ist eine Lagerungsdichte D von 0,8 bis 0,9 zu erzielen und ein natürlich gelagerter Boden nicht in lockerster Lagerung $\rho_{d,LL}$ (eher im Dichtebereich D von 0,2 bis 0,4) vorliegt, verringert sich der Faktor der möglichen Durchlässigkeitsreduzierung auf den ca. 8 bis 12-fachen Wert.

In aufwändigen Durchströmungsversuchen kann bestätigt werden, dass der Bodenlagerungszustand gegenüber hydraulisch bedingten Suffosionserscheinungen entscheidenden Einfluss nimmt. Infolge einer kontinuierlichen, gegen die Schwerkraft gerichteten, Durchströmung kann für den lockersten Probeneinbauzustand ($\rho_{d,LL} = 2,02 \text{ g/cm}^3$) ein Massenausstrag von 0,4 % festgestellt werden. Für den dichtesten Lagerungszustand ($\rho_{d,DL} = 2,25 \text{ g/cm}^3$) reduziert sich der Massenverlust auf 0,1 % der Gesamtmasse. Der Größtkorndurchmesser des Austrags beträgt unabhängig von der Lagerung 0,063 mm. Bezieht man sich bei der prozentualen Beurteilung der ausgespülten Masse ausschließlich auf den in der Probe enthaltenen Feinkornanteil $\leq 0,063 \text{ mm}$, beträgt der Massenverlust 8,0 % für die lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$ und reduziert sich auf 2,8 % für die dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$.

Begründet ist die lagerungsabhängige Erhöhung der Suffosionsstabilität durch den stetigen und weitgestuften Körnungsverlauf der Versuchsprobe 1. Im Zuge der Verdichtung ($\rho_{d,DL} = 2,25 \text{ g/cm}^3$) kann die Filterleistung der groben strukturbildenden Kornfraktion positiv beeinflusst werden, sodass der Feinteilaustrag $\leq 0,063 \text{ mm}$ gegenüber der lockersten Lagerung ($\rho_{d,LL} = 2,02 \text{ g/cm}^3$) um den Faktor von 2,9 auf 35 % reduziert wird. Die Versuchsprobe 1 hat einen hohen Anteil an feinerer Körnung $\leq 2 \text{ mm}$, um während der Verdichtung die Porenräume der gröberen Struktur $\geq 2 \text{ mm}$ ausreichend zu füllen. Der feinere Kornanteil wird aktiv in die Strukturbildung einbezogen, was sich stabilisierend auf einen hydraulischen bedingten Partikeltransport auswirkt.

Auf Grundlage der in drei Zylinderschichten (unterste, mittlere, oberste Schicht) durchgeführten Korngrößenverteilung können keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich im Probeninneren stattgefunder Kornumlagerungen getroffen werden. Aufgrund der geringen hydraulischen Einwirkung (hydraulischer Gradient $i = 1$) sind die minimal ungleichen Körnungsverläufe der einzelnen Zylinderschichten, insbesondere im Korngrößenspektrum zwischen 0,2 bis 63 mm, eher auf etwaige Streuungen hinsichtlich eines homogenen Probeneinbaus zurückzuführen. Verglichen mit der unteren bzw. der mittleren Zylinderschicht zeigt die Kornverteilung der oberen Zylinderschicht den geringsten Massenprozentsatz an Feinkörnung $\leq 0,063$ mm, woraus zu schließen ist, dass der Bereich nahe des Strömungsaustritts vorwiegend von einem suffosiven Partikelaustrag betroffen ist. In der unteren sowie der mittleren Zylinderzone kann keine signifikante Umlagerung bzw. Verlagerung der feinen Körnung festgestellt werden, sodass der hydraulisch bedingte Feinteiltransport $\leq 0,063$ mm auf Distanzen innerhalb der Höhe einer Zylinderschicht begrenzt bleibt (0 - 11cm).

5.4 Versuch Nr. 2

Bei der Versuchsprobe 2 (Abb. 44) handelt es sich nicht um ein natürlich entnommenes, sondern um ein künstlich im Labor erzeugtes Bodengemisch. Das für die künstliche Probenherstellung benötigte Ausgangsmaterial bildet die in Kap. 5.3 dargestellte „Murschotterkörnung“, welche als Versuchsprobe 1 geprüft wurde.



Abb. 44: Versuchsprobe 2 (co' sa' Gr): Murschotter mit reduzierter Körnung ≤ 2 mm

Im Vergleich mit der Versuchsprobe 1 hat die Probe 2 einen um 8 % auf 82 Massen-% höheren Kiesanteil und einen um 7 % auf 12 Massen-% geringeren Sandanteil. Der Anteil an Steine beträgt 6 Massen-%. Die Versuchsprobe 2 hat keinen Ton- bzw. Schluffgehalt (Tab. 25). Die Körnungslinie zeigt eine Ungleichförmigkeitszahl C_u von 32 und eine Krümmungszahl C_c von 4 (Abb. 45).

Tab. 25: Korngrößenverteilung der Versuchsprobe 2

Korngrößenverteilung (gemäß ÖNORM B 4412:1974)		
Körnungsbereich [mm]	Massenanteil [%]	Art
90 - 63	6	Steine 6 %
63 - 45	16	Kies 82 %
45 - 31,5	16	
31,5 - 16	21	
16 - 8	18	
8 - 4	8	
4 - 2	3	
2 - 1	2	Sand 12 %
1 - 0,5	1	
0,5 - 0,25	4	
0,25 - 0,125	3	
0,125 - 0,063	2	

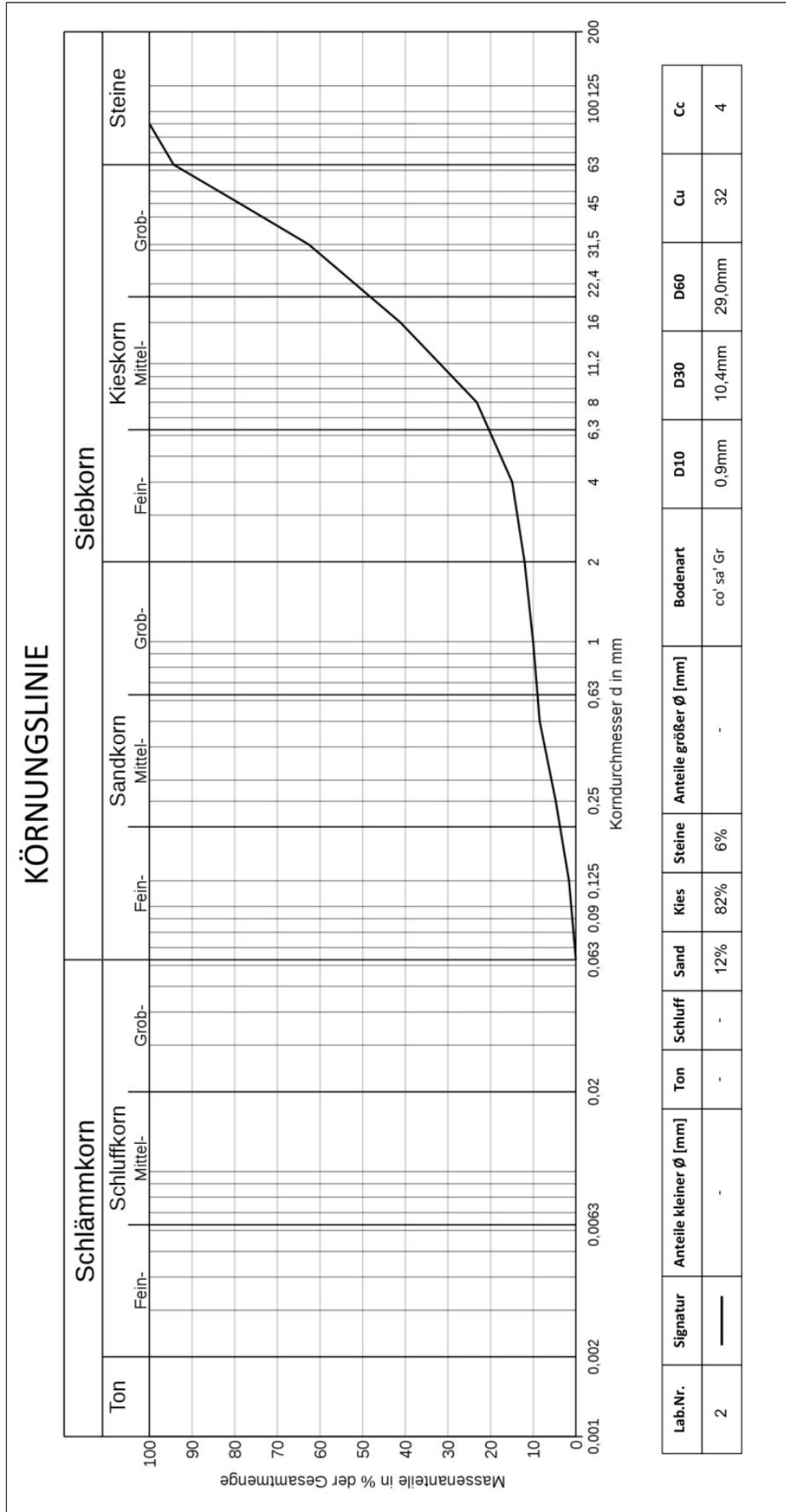


Abb. 45: Körnungslinie der Versuchsprobe 2 (nach ÖNORM B 4412:1974)

5.4.1 Lagerungsabhängige Durchlässigkeit

Nachfolgend sind die mittels Standrohr ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k der Versuchsprobe 2 (VP2) für jeden Teilversuch eines Verdichtungsgrades angegeben. Die Abhängigkeit zwischen dem k -Wert und der Trockendichte ρ_d , der Porenzahl e sowie dem Porenanteil n ist tabellarisch (Tab. 26 - 29) und grafisch (Abb. 46 - 48) dargestellt.

Tab. 26: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die lockerste Lagerungsdichte (VP2)

Einbauzustand:	lockerste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	2.1	2.2	2.3
ρ_d [g/cm ³]	1,98	1,97	1,96
e [-]	0,38	0,39	0,40
n [%]	28	28	28
k_{10} [m/s]	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$

Tab. 27: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher lockere“ Lagerungsdichte (VP2)

Einbauzustand:	„eher lockere“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	2.4	2.5	–
ρ_d [g/cm ³]	2,06	2,04	–
e [-]	0,33	0,34	–
n [%]	25	26	–
k_{10} [m/s]	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	–

Tab. 28: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher dichte“ Lagerungsdichte (VP2)

Einbauzustand:	„eher dichte“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	2.6	2.7	–
ρ_d [g/cm ³]	2,12	2,14	–
e [-]	0,29	0,28	–
n [%]	23	22	–
k_{10} [m/s]	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	–

Tab. 29: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die dichteste Lagerungsdichte (VP2)

Einbauzustand:	dichteste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	2.8	2.9	2.10
ρ_d [g/cm ³]	2,17	2,20	2,18
e [-]	0,26	0,25	0,26
n [%]	21	20	20
k_{10} [m/s]	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Für die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse wird eine Ausgleichsgerade herangezogen, um die Abhängigkeitsbeziehung zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k und den einzelnen lagerungsabhängigen Parametern (Trockendichte ρ_d , Porenzahl e , Porenanteil n) darzustellen:

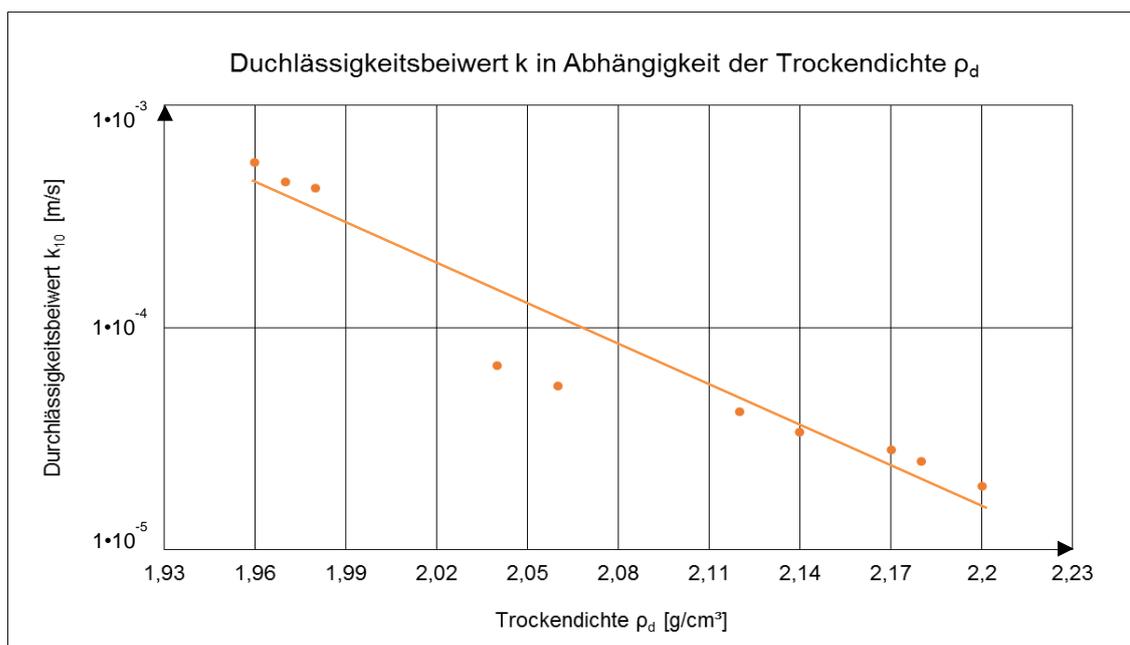


Abb. 46: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Trockendichte ρ_d (VP2)

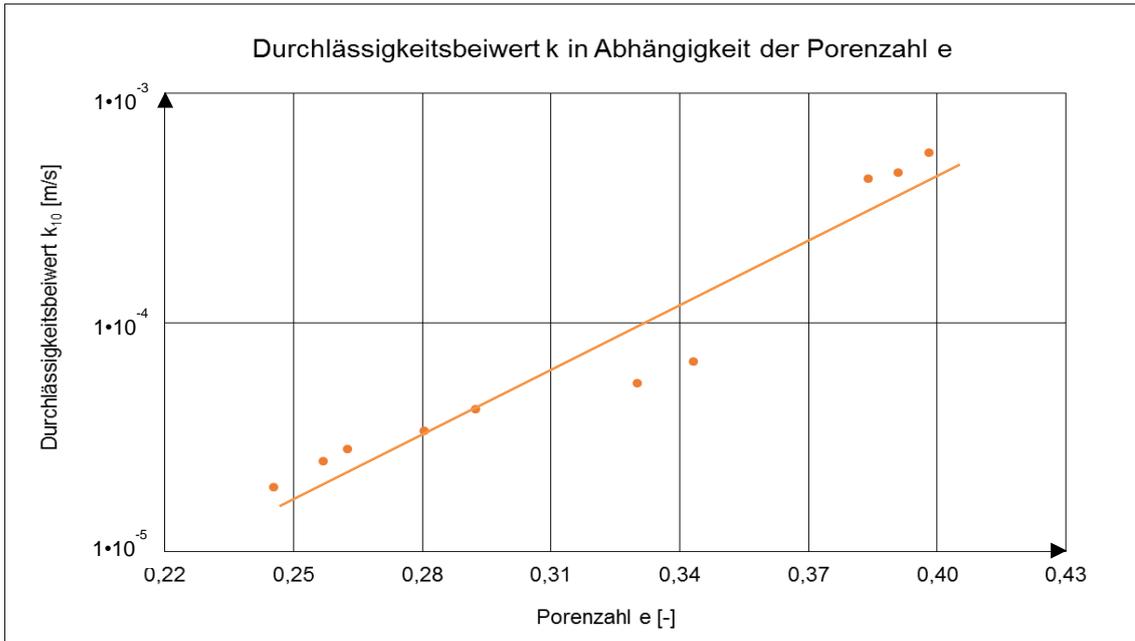


Abb. 47: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Porenzahl e (VP2)

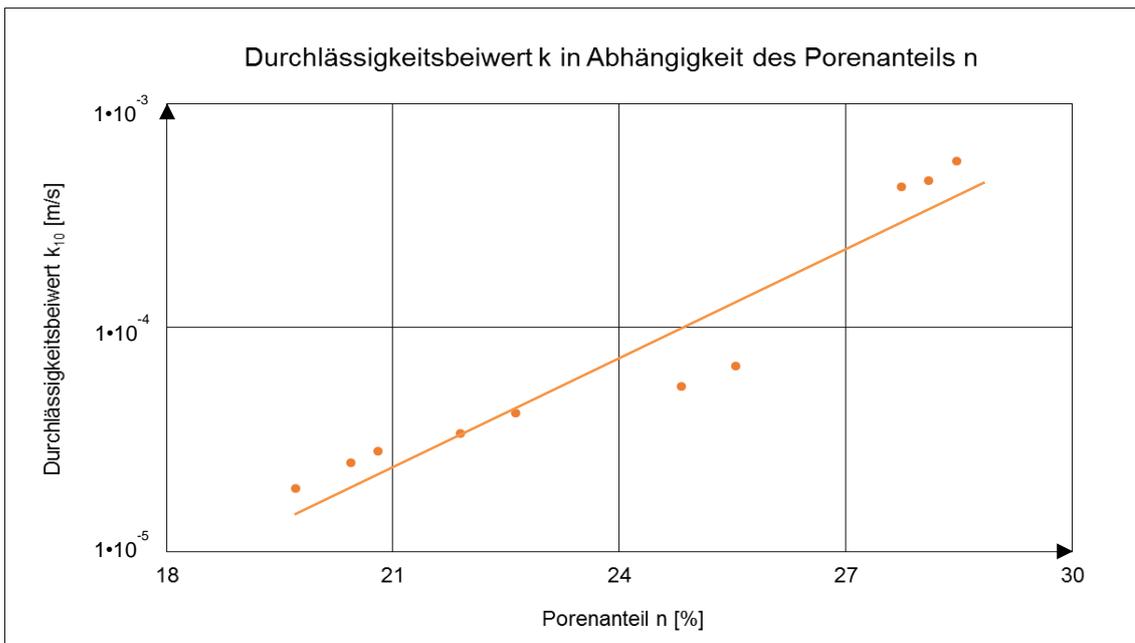


Abb. 48: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit des Porenanteils n (VP2)

In einer zusammenfassenden Darstellung (Tab. 30) werden die in Abhängigkeit der Lagerungsdichte mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k den berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k aus den indirekten Verfahren gegenübergestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die im Labor für einen Probeneinbauzustand ermittelten Teilergebnisse als gemittelter Durchlässigkeitsbeiwert k angegeben.

Die notwendigen Formeln sowie die Anwendungsgrenzen der indirekten Verfahren sind in Kap. 3.2 angeführt. Die für die Berechnung benötigten Kornverteilungsparameter, wie die Ungleichförmigkeitszahl C_u sowie der wirksame Korndurchmesser d_w , werden der Kornverteilungskurve aus Abb. 45 entnommen.

Tab. 30: Vergleich der mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k mit den indirekt auf Basis der Kornverteilung berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k (VP2)

	lockerste Lagerung	eher lockere Lagerung	eher dichte Lagerung	dichteste Lagerung
Versuch Nr.	2.1 - 2.3	2.4 - 2.5	2.6 - 2.7	2.8 - 2.10
Trockendichte ρ_d [g/cm³]	1,97	2,05	2,13	2,18
Porenanteil n [%]	28	26	23	20
Porenzahl e [-]	0,39	0,34	0,29	0,26
Lagerungsdichte D [-]	0	0,25	0,63	1
Relative Dichte I_D [-]	0	0,38	0,77	1
Nachfolgend werden die direkt sowie indirekt ermittelten k_{10} -Werte angegeben [m/s]:				
Standrohrversuch	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Hazen (1892)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Zieschang (1961)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Beyer (1964)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 20$ überschritten			
Konzeny-Köhler (1965)	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Seiler (1973)	$8,4 \cdot 10^{-2}$			
Sichardt (1927)	$3,2 \cdot 10^{-4}$			
Bialas et al. (1970)	$1,8 \cdot 10^{-1}$			
Seelheim (1880)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			

5.4.2 Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität

Da die Kornverteilung der Versuchsprobe 2 keinen Feinkornanteil $\leq 0,063$ mm aufweist, besteht im Allgemeinen für den Boden keine Suffosionsgefahr. Der Boden hat daher und aufgrund der weitgestuften und stetigen Körnungslinie positive Eigenfiltrationseigenschaften, sodass bedingt durch den hydraulischen Gradienten von 1 mit keiner inneren Kornumlagerung sowie in weiterer Folge mit keinem Massenausstrag zu rechnen ist. Ausgehend von der Bewertung der Kornverteilungskurve wird die Versuchsprobe 2 hinsichtlich der Suffosionsstabilität als stabil erachtet, weswegen auf den Suffosionsversuch verzichtet wird.

5.4.3 Bewertung der Ergebnisse

Ausgehend von den Laborergebnissen hat die Versuchsprobe 2 die minimale Trockendichte $\rho_{d,\min}$ von $1,97 \text{ g/cm}^3$ und die maximale Trockendichte $\rho_{d,\max}$ von $2,18 \text{ g/cm}^3$. Die mittels Standrohr durchgeführten Durchströmungsversuche zeigen lagerungsabhängige Durchlässigkeitsbeiwerte k von $4,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ bis $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Im Vergleich mit der Versuchsprobe 1, bei der sich zwischen lockerster Lagerung $\rho_{d,LL}$ und dichtester Lagerung $\rho_{d,DL}$ eine Reduzierung des Durchlässigkeitsbeiwerts k um den Faktor 26 einstellt, verringert sich die lagerungsabhängige k -Wert-Beeinflussung der Versuchsprobe 2 auf den Faktor 20. Liegt die Versuchsprobe 2 mit der Lagerungsdichte D von 0,2 bis 0,4 vor und wird diese auf eine mittels der Rütteldruckverdichtung herstellbare Lagerungsdichte D von 0,8 bis 0,9 gebracht, beträgt die k -Wert-Reduzierung das 2 bis 10-fache.

5.5 Versuch Nr. 3

Das Basismaterial für die künstliche Versuchsprobe 3 bildet wiederum die in Kap. 5.3 beschriebene „Murschotterkörnung“ (Versuchsprobe 1). Die Probenherstellung war darauf ausgerichtet, eine bei Flussschottern übliche Kornverteilungskurve mit künstlicher Fehlkörnung im Korngrößenbereich zwischen 0,125 mm bis 4 mm zu generieren.



Abb. 49: Versuchsprobe 3 (co“ si‘ Gr): Murschotter mit künstlicher Ausfallkörnung im Korngrößenbereich 0,125 bis 4 mm

In Bezug auf die 87 % Kiesanteil beträgt der Sandanteil lediglich 2 % der Gesamtmasse. Steine sind mit 5 Massen-% enthalten, wobei die Schlämmkörner (Schluff + Ton) 6 % der Gesamtmasse darstellen (Tab. 31). Die Kornverteilung der Versuchsprobe 3 hat die Ungleichförmigkeitszahl C_u von 6 sowie die Krümmungszahl C_c von 1 (Abb. 50).

Tab. 31: Korngrößenverteilung der Versuchsprobe 3

Korngrößenverteilung (gemäß ÖNORM B 4412:1974)		
Körnungsbereich [mm]	Massenanteil [%]	Art
90 - 63	5	Steine 5 %
63 - 45	13	Kies 87 %
45 - 31,5	16	
31,5 - 16	26	
16 - 8	20	
8 - 4	12	
4 - 2	0	Ausfallkörnung
2 - 1		
1 - 0,5		
0,5 - 0,25		
0,25 - 0,125		
0,125 - 0,063	2	Sand 2 %
0,063 - 0,002	5	Schluff 5 %
< 0,002	1	Ton 1 %

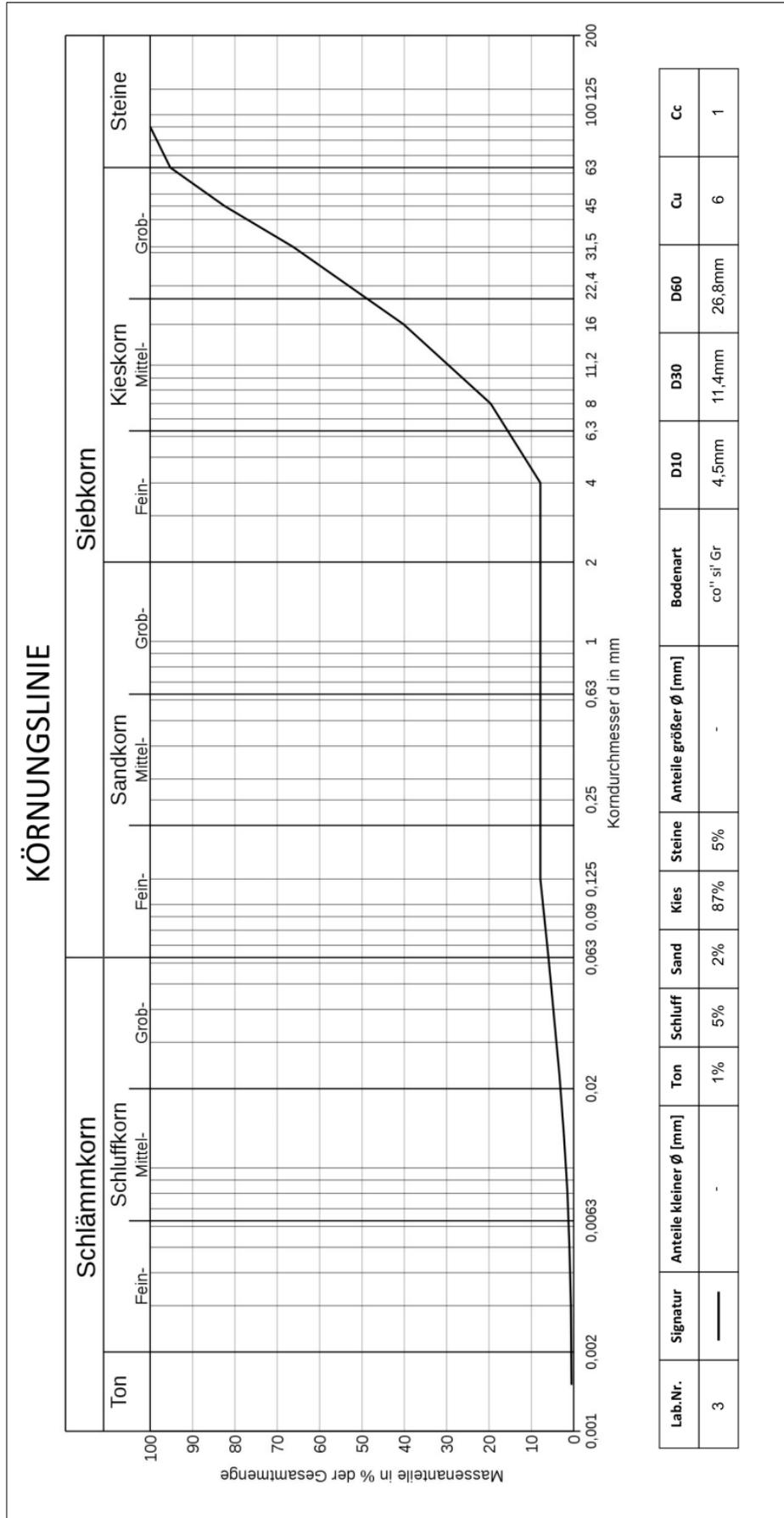


Abb. 50: Körnungslinie der Versuchsprobe 3 (nach ÖNORM B 4412:1974)

5.5.1 Lagerungsabhängige Durchlässigkeit

Nachfolgend sind die mittels Standrohr ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k der Versuchsprobe 3 (VP3) für jeden Teilversuch eines Verdichtungsgrades angegeben. Die Abhängigkeit zwischen dem k -Wert und der Trockendichte ρ_d , der Porenzahl e sowie dem Porenanteil n ist tabellarisch (Tab. 32 - 35) und grafisch (Abb. 51 - 53) dargestellt.

Tab. 32: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die lockerste Lagerungsdichte (VP3)

Einbauzustand:	lockerste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	3.1	3.2	3.3
ρ_d [g/cm ³]	1,89	1,88	1,87
e [-]	0,45	0,46	0,47
n [%]	31	31	32
k_{10} [m/s]	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Tab. 33: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher lockere“ Lagerungsdichte (VP3)

Einbauzustand:	„eher lockere“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	3.4	3.5	–
ρ_d [g/cm ³]	1,98	1,96	–
e [-]	0,38	0,40	–
n [%]	28	28	–
k_{10} [m/s]	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	–

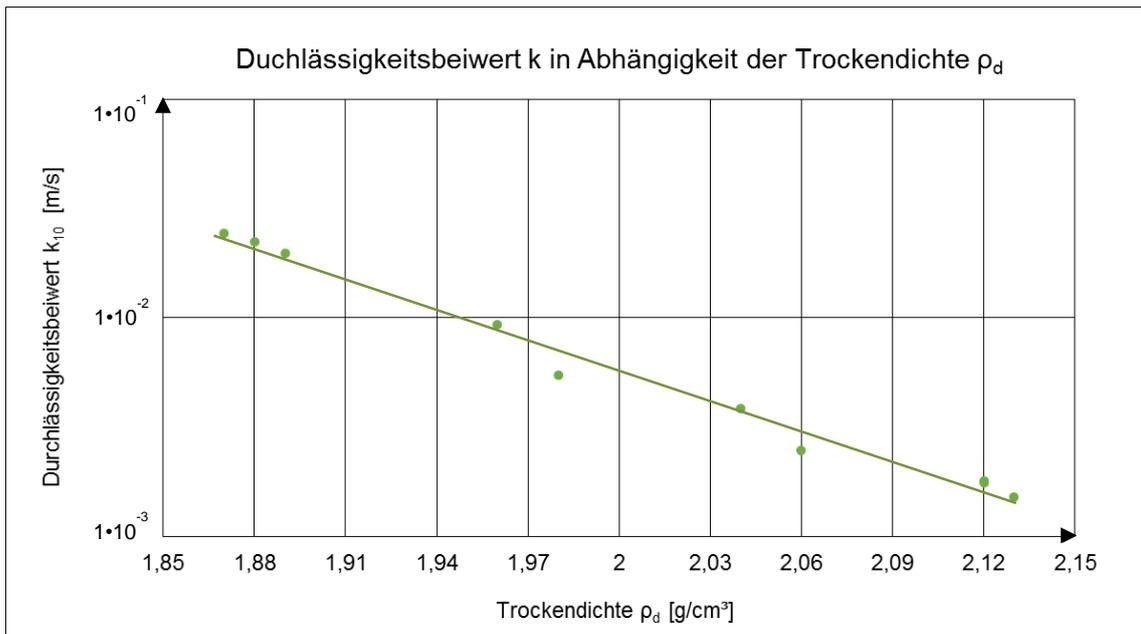
Tab. 34: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die „eher dichte“ Lagerungsdichte (VP3)

Einbauzustand:	„eher dichte“ Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	3.6	3.7	–
ρ_d [g/cm ³]	2,06	2,04	–
e [-]	0,33	0,34	–
n [%]	25	26	–
k_{10} [m/s]	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	–

Tab. 35: Durchlässigkeitsbeiwerte k für die dichteste Lagerungsdichte (VP3)

Einbauzustand:	dichteste Lagerung		
	1. Teilversuch	2. Teilversuch	3. Teilversuch
Versuch Nr.	3.8	3.9	3.10
ρ_d [g/cm ³]	2,13	2,12	2,12
e [-]	0,29	0,29	0,29
n [%]	22	23	23
k_{10} [m/s]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

Für die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse wird eine Ausgleichsgerade herangezogen, um die Abhängigkeitsbeziehung zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k und den einzelnen lagerungsabhängigen Parametern (Trockendichte ρ_d , Porenzahl e , Porenanteil n) darzustellen:

Abb. 51: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Trockendichte ρ_d (VP3)

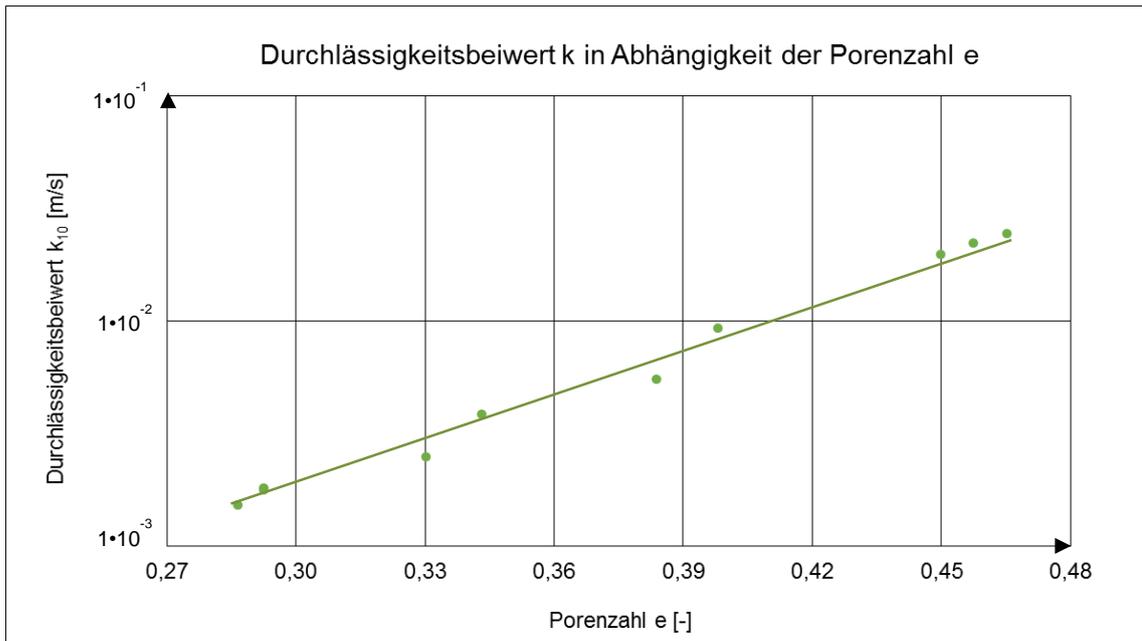


Abb. 52: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit der Porenzahl e (VP3)

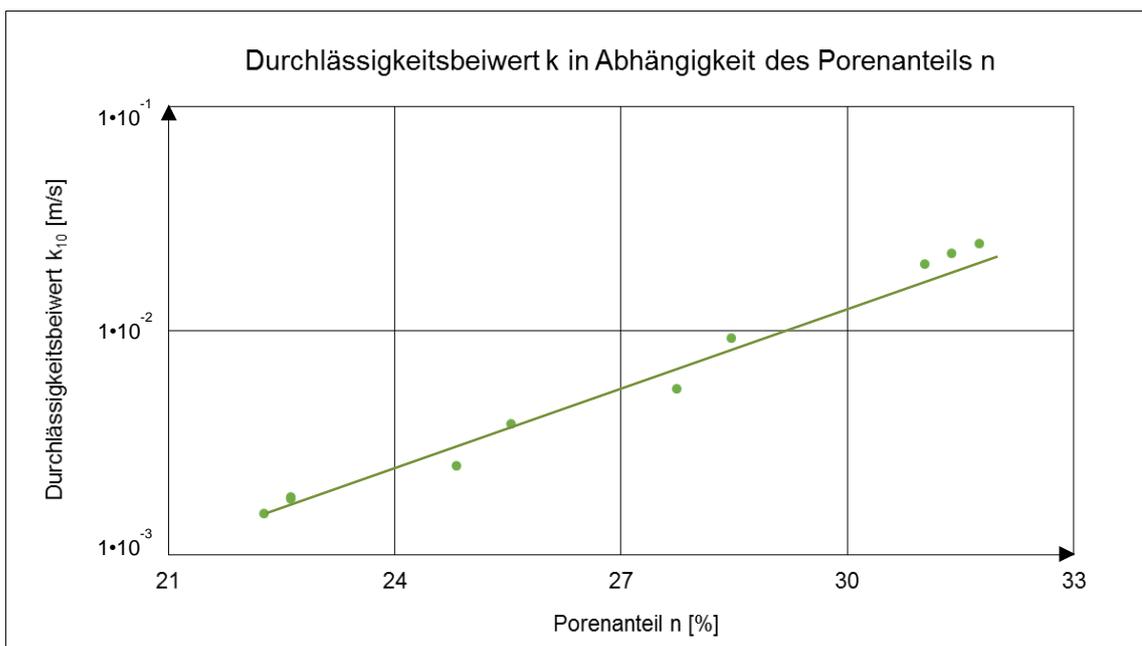


Abb. 53: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit des Porenanteils n (VP3)

In einer zusammenfassenden Darstellung (Tab. 36) werden die in Abhängigkeit der Lagerungsdichte mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k den berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k aus den indirekten Verfahren gegenübergestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die im Labor für einen Probeneinbauzustand ermittelten Teilergebnisse als gemittelter Durchlässigkeitsbeiwert k angegeben.

Die notwendigen Formeln sowie die Anwendungsgrenzen der indirekten Verfahren sind in Kap. 3.2 angeführt. Die für die Berechnung benötigten Kornverteilungsparameter, wie die Ungleichförmigkeitszahl C_u sowie der wirksame Korndurchmesser d_w , werden der Kornverteilungskurve aus Abb. 50 entnommen.

Tab. 36: Vergleich der mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k mit den indirekt auf Basis der Kornverteilung berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten k (VP3)

	lockerste Lagerung	eher lockere Lagerung	eher dichte Lagerung	dichteste Lagerung
Versuch Nr.	3.1 - 3.3	3.4 - 3.5	3.6 - 3.7	3.8 - 3.10
Trockendichte ρ_d [g/cm³]	1,88	1,97	2,05	2,12
Porenanteil n [%]	31	28	26	23
Porenzahl e [-]	0,46	0,39	0,34	0,29
Lagerungsdichte D [-]	0	0,38	0,63	1
Relative Dichte I_D [-]	0	0,41	0,71	1
Nachfolgend werden die direkt sowie indirekt ermittelten k_{10} -Werte angegeben [m/s]:				
Standrohrversuch	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Hazen (1892)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Zieschang (1961)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			
Beyer (1964)	Anwendungsgrenze von $0,06 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 0,6 \text{ mm}$ nicht erfüllt			
Konzeny-Köhler (1965)	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
Seiler (1973)	$3,9 \cdot 10^{-1}$			
Sichardt (1927)	$3,2 \cdot 10^{-4}$			
Bialas et al. (1970)	$4,4 \cdot 10^{-1}$			
Seelheim (1880)	Anwendungsgrenze von $C_u \leq 5$ überschritten			

5.5.2 Lagerungsabhängige Suffosionsstabilität

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Suffosionsversuchs für die Versuchsprobe 3 im lockersten Lagerungszustand $\rho_{d,LL}$ angeführt. Die Auswertung der Kornumlagerung (Partikeltransporte) sowie des Feinteilaustrags (Masseverlust) erfolgt zuerst in einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung (Tab. 37), welche in weiterer Folge durch eine grafische Visualisierung (Abb. 54) unterstützt wird.

Tab. 37: Auswertung der Kornumlagerung sowie des Feinteilaustrags für die lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$ (Versuchsprobe 3)

Suffosionsversuch mittels adaptierten Durchlässigkeitszylinder				
Bodenkennwerte:		Versuchskennwerte:		
Einbaumasse ($1824 \text{ g} \leq 0,063 \text{ mm}$): <u>30407 g</u>		hydraulischer Gradient: <u>$i = 1$</u>		
Einbauhöhe ($\varnothing_{\text{Zylinder}} = 25 \text{ cm}$): <u>33 cm</u>		Durchströmungsdauer: <u>240 min</u>		
Trockendichte: $\rho_d = \underline{1,88 \text{ g/cm}^3}$		Datum: <u>07.12.2016</u>		
Kornumlagerung im Zylinder (VP3: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)				
Korngröße [mm]	Ausgangskörnung [Massen-%]	unterste Schicht [Massen-%]	mittlere Schicht [Massen-%]	oberste Schicht [Massen-%]
≥ 63	5	0	0	0
63 - 2	87	83	99	99
2 - 0,5	0	0	0	0
0,5 - 0,25	0	0	0	0
0,25 - 0,125	0	0	0	0
0,125 - 0,063	2	5	0	0
$\leq 0,063$	6	12	1	1
Feinteilaustrag aus Zylinder (VP3: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)				
Ausgeschwemmte Masse:	<u>245,0 g</u>	bezogen auf die Einbaumasse: <u>0,8 %</u> bezogen auf die Feinkornmasse $\leq 0,063 \text{ mm}$: <u>13,4 %</u>		
\varnothing Größtkorn (Kornverteilung):	<u>0,063 mm</u>	(80 % Schluff, 20 % Ton)		

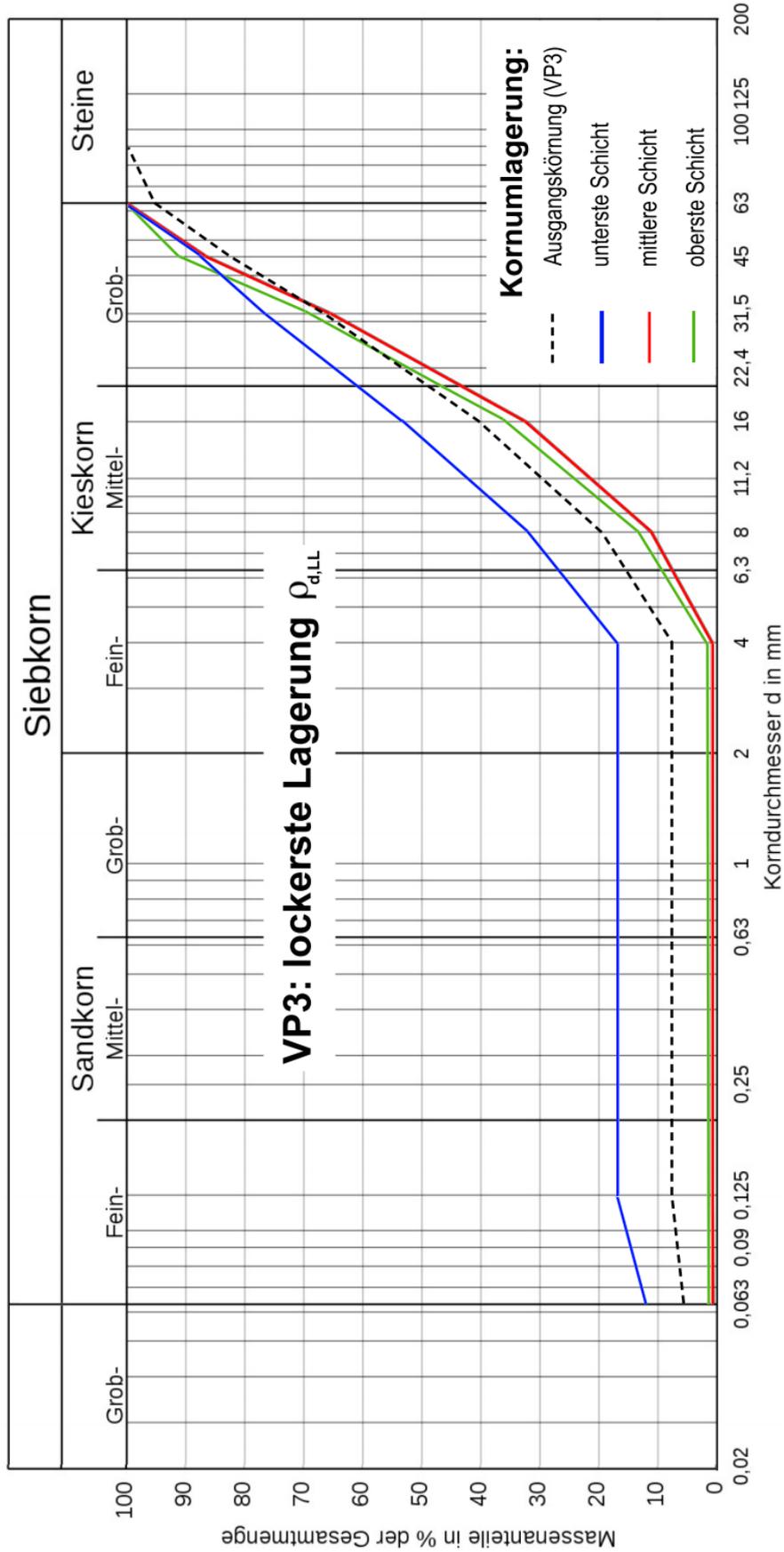


Abb. 54: Auswertung der Kornumlagerung auf Grundlage einer in drei Zylinderschichten durchgeführten Korngrößenverteilung (Versuchsprobe 3: lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$)

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Suffosionsversuchs für die Versuchsprobe 3 im dichtesten Lagerungszustand $\rho_{d,DL}$ angeführt. Die Auswertung der Kornumlagerung (Partikeltransporte) sowie des Feinteilaustrags (Masseverlust) erfolgt zuerst in einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung (Tab. 38), welche in weiterer Folge durch eine grafische Visualisierung (Abb. 55) unterstützt wird.

Tab. 38: Auswertung der Kornumlagerung sowie des Feinteilaustrags für die dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$ (Versuchsprobe 3)

Suffosionsversuch mittels adaptierten Durchlässigkeitszylinder				
Bodenkennwerte:		Versuchskennwerte:		
Einbaumasse (2060 g \leq 0,063 mm): <u>34339 g</u>		hydraulischer Gradient: <u>$i = 1$</u>		
Einbauhöhe ($\varnothing_{\text{Zylinder}} = 25 \text{ cm}$): <u>33 cm</u>		Durchströmungsdauer: <u>240 min</u>		
Trockendichte: $\rho_d = \underline{2,12 \text{ g/cm}^3}$		Datum: <u>10.12.2016</u>		
Kornumlagerung im Zylinder (VP3: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)				
Korngröße [mm]	Ausgangskörnung [Massen-%]	unterste Schicht [Massen-%]	mittlere Schicht [Massen-%]	oberste Schicht [Massen-%]
≥ 63	5	0	5	0
63 - 2	87	85	94	99
2 - 0,5	0	0	0	0
0,5 - 0,25	0	0	0	0
0,25 - 0,125	0	0	0	0
0,125 - 0,063	2	4	0	0
$\leq 0,063$	6	11	1	1
Feinteilaustrag aus Zylinder (VP3: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)				
Ausgeschwemmte Masse:	<u>189,4 g</u>	bezogen auf die Einbaumasse: <u>0,6 %</u> bezogen auf die Feinkornmasse $\leq 0,063 \text{ mm}$: <u>9,2 %</u>		
\varnothing Größtkorn (Kornverteilung):	<u>0,063 mm</u>	(80 % Schluff, 20 % Ton)		

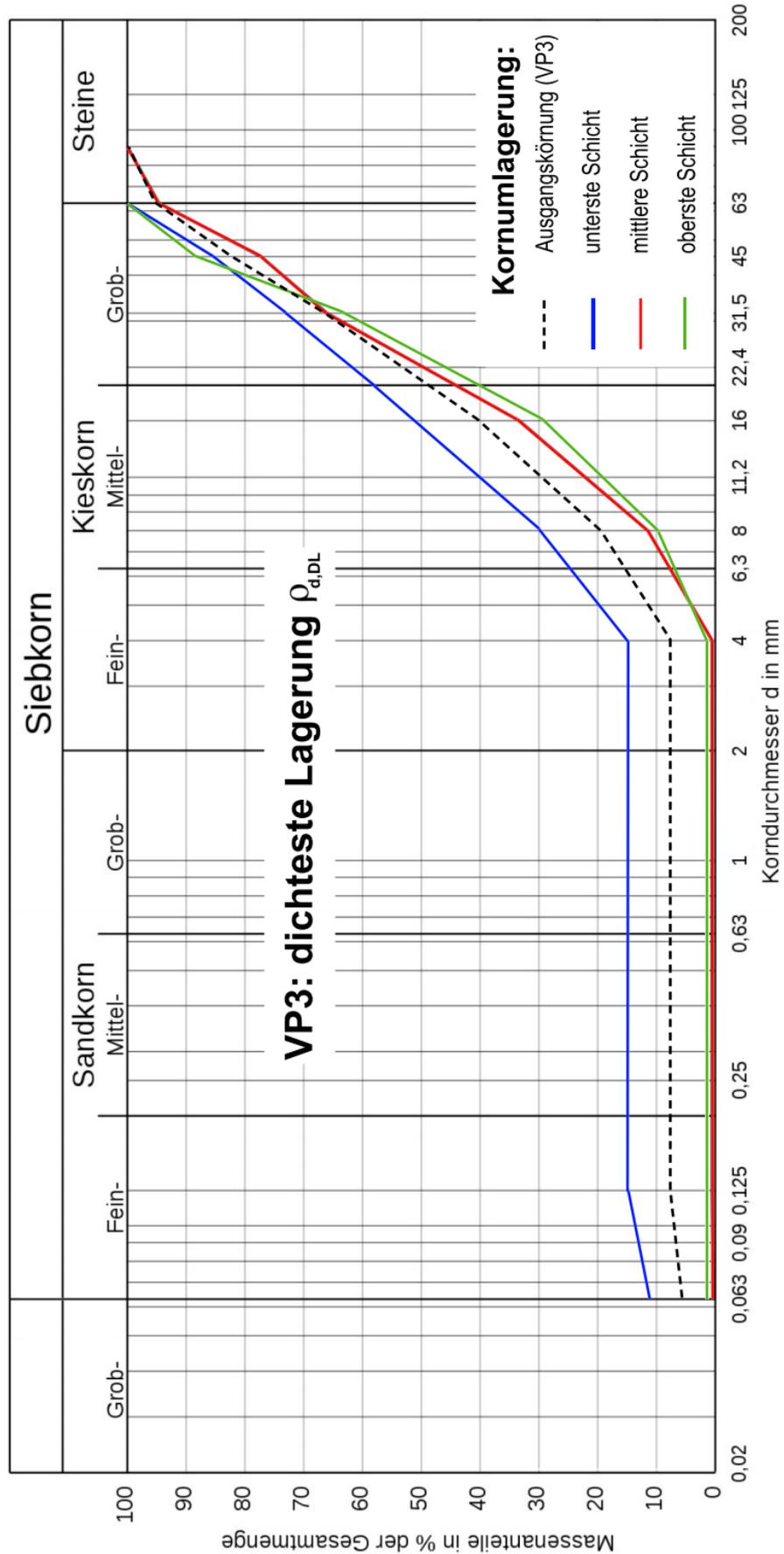


Abb. 55: Auswertung der Kornumlagerung auf Grundlage einer in drei Zylinderschichten durchgeführten Korngrößenverteilung (Versuchsprobe 3: dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$)

5.5.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Versuchsprobe 3 hat die minimale Trockendichte $\rho_{d,\min}$ von $1,88 \text{ g/cm}^3$ und die maximale Trockendichte $\rho_{d,\max}$ von $2,12 \text{ g/cm}^3$. In Abhängigkeit der Lagerung streut der Durchlässigkeitsbeiwert k im Wertebereich von $2,2 \cdot 10^{-2}$ bis $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. So lässt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k der Versuchsprobe 3 infolge der Lagerungsveränderung um den Faktor 13 beeinflussen. Verdichtet man die Versuchsprobe 3, ausgehend von der Lagerungsdichte D von 0,2 bis 0,4 auf die Lagerungsdichte D von 0,8 bis 0,9, stellt sich eine k -Wert-Reduzierung um das lediglich 2,5 bis 7,5-fache ein. Grund dafür ist die Ausfallkörnung im Körnungsbereich zwischen 0,125 und 4 mm. Demnach ist in der Versuchsprobe 3 ein nur geringer Massenprozentsatz an feinerer Körnung $\leq 2 \text{ mm}$ enthalten, welcher aber notwendig ist, um im Zuge der Verdichtung die Porenräume der größeren Tragstruktur (v. a. kiesige Körnung) zu füllen.

Die experimentelle Untersuchung der lagerungsabhängigen Suffosionsstabilität erfolgte, wie auch für die Versuchsprobe 1, auf Basis eines adaptierten Durchlässigkeitsversuchs. Die eingebauten Proben wurden dabei über eine Zeitdauer von 240 min bei einem hydraulischen Gradienten von 1 entgegen der Schwerkraft durchströmt. Für den lockersten Einbauzustand ($\rho_{d,LL} = 1,88 \text{ g/cm}^3$) beträgt die ausgespülte Masse 0,8 % der eingebauten Probenmasse. Für den dichtesten Probeneinbau ($\rho_{d,DL} = 2,12 \text{ g/cm}^3$) kann ein reduzierter Massenverlust von 0,6 % festgestellt werden. Unabhängig von der Lagerung hat die ausgespülte Masse einen Größtkorndurchmesser d_{\max} von 0,063 mm. Erfolgt die prozentuale Bewertung des Massenausstrags auf Basis der in der Versuchszelle eingebauten Feinkörnung $\leq 0,063 \text{ mm}$, werden im lockersten Einbauzustand $\rho_{d,LL}$ rund 13,4 % und im dichtesten Einbauzustand $\rho_{d,DL}$ ca. 9,2 % der Feinkornmasse ausgetragen. Dabei ist ersichtlich, dass sich der Partikelaustrag $\leq 0,063 \text{ mm}$ der verdichteten Probe um den Faktor 1,5 auf 69 % gegenüber der unverdichteten Probe reduziert. Im Vergleich mit dem Faktor von 2,9 der Versuchsprobe 1 ergibt sich für die Versuchsprobe 3 ein geringerer lagerungsabhängiger Einfluss. Durch den fast gesamten Körnungsausfall im Korngrößenbereich des Sandes hat die Versuchsprobe 3 einen zu geringen Massenprozentsatz an feinerer und gut abgestufter Bodenkörnung $\leq 2 \text{ mm}$, um im Zuge der Verdichtung die Porenräume der größeren Fraktionen zu füllen. Folglich bleibt die feinere Körnung weiterhin lose und instabil innerhalb des Grobskelettes gelagert und wird nicht stabilisierend in die tragende Struktur eingebunden. Die geometrischen Suffosionsparameter der effektiven Öffnungsweite sowie Durchgängigkeit der Porenpfade bleiben nahezu ausschließlich durch die kiesige- bzw. steinige Bodenkörnung bestimmt.

Hinsichtlich der begrenzten Verdichtungseigenschaften der groben Körnungen ≥ 4 mm ist es in Bezug auf den Partikeltransport $\leq 0,125$ mm von untergeordneter Bedeutung, ob eine Verdichtung vorliegt oder nicht. Anhand der in drei Zylinderbereichen (untere, mittlere, obere Schicht) durchgeführten Korngrößenanalyse ist erkennbar, dass vorwiegend die Bereiche der oberen bzw. der mittleren Zylinderschicht von einem suffosiven Materialtransport betroffen sind. Bodenpartikel dieser beiden Zylinderschichten mit den Korngrößen $\leq 0,125$ mm werden bedingt durch die Schleppkraft des Wassers nahezu vollständig aus der Probe ausgetragen.

Kritisch zu hinterfragen ist, dass sich für den Bereich nahe des Strömungseintritts (untere Zylinderschicht) eine Anreicherung von Feinkörnung $\leq 0,063$ mm einstellt. Verglichen mit der repräsentativen Kornverteilung der Versuchssprobe 3 (Abb. 50) kann nach beendeter Durchströmung eine Erhöhung des Feinkornanteils $\leq 0,063$ mm von ursprünglichen 6 Massen-% auf 12 Massen-% (lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$) bzw. 11 Massen-% (dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$) festgestellt werden, was jedoch auf den Probeneinbau zurückzuführen ist.

Infolge von äußeren Einwirkungen während der Versuchsvorbereitung, wie z. B. dem Einbau der Probe mittels Rütteltisch sowie dem Anheben des Zylinder auf die Versuchsplattform, hat die Versuchssprobe 3 keine ausreichende Trennstabilität (Eigenfiltration), um den in Richtung der Schwerkraft gerichteten Feinteiltransport $\leq 0,063$ mm auf kurze Distanzen (Wegstrecken) zu begrenzen. Als Folge der geringen Trennstabilität der Versuchssprobe 3 stellt sich schon vor Versuchsbeginn eine Feinkornanreicherung $\leq 0,063$ mm im Bereich der Zylindersohle ein. Der hohe Massenanteil der feinen Fraktion $\leq 0,063$ führt im Zuge der Durchströmung dazu, dass zuvor durchgangswirksame Porenpfade der unteren Zylinderschicht blockiert bzw. verstopft werden. Dadurch wird die Schleppkraft des Wassers in der unteren Zylinderschicht abgebaut bzw. reduziert, sodass der Transport bzw. das „Aufströmen“ der feinen Körnung $\leq 0,063$ mm in benachbarte Bodenschichten (mittlere bzw. obere Zylinderschicht) aufgrund der verringerten hydraulischen Einwirkung nicht mehr möglich ist.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In der Baubranche wird das Rütteldruckverfahren seit über 80 Jahren erfolgreich zur Verdichtung von grob- und gemischtkörnigen Böden angewendet. Das Grundprinzip beläuft sich darauf, den inneren Reibungswiderstand der Bodenkörnungen durch die dynamische Vibration des Tiefenrüttlers zu reduzieren bzw. aufzuheben, sodass sich der Boden infolge Eigengewicht in einen Zustand höherer Dichte versetzt.

Beginnend mit einer ausführlichen Literaturrecherche und unterstützt durch eigenständige Labordurchführungen befasst sich die gegenständliche Arbeit mit dem Einfluss der Lagerungsdichte hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit sowie der Suffosionsstabilität weitgestufter nichtbindiger Böden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der lagerungsabhängigen Durchlässigkeitsversuche für drei grob- bzw. gemischtkörnige Bodenproben lassen sich folgende Erkenntnisse sowie Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Durchströmungsversuche bestätigen den Einfluss der Lagerungsdichte hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit.
- Der Durchlässigkeitsbeiwert k ist infolge der Lagerungsveränderung um einen maximalen Faktor von 13 (VP3) bis 26 (VP1) beeinflussbar (Abb. 56).

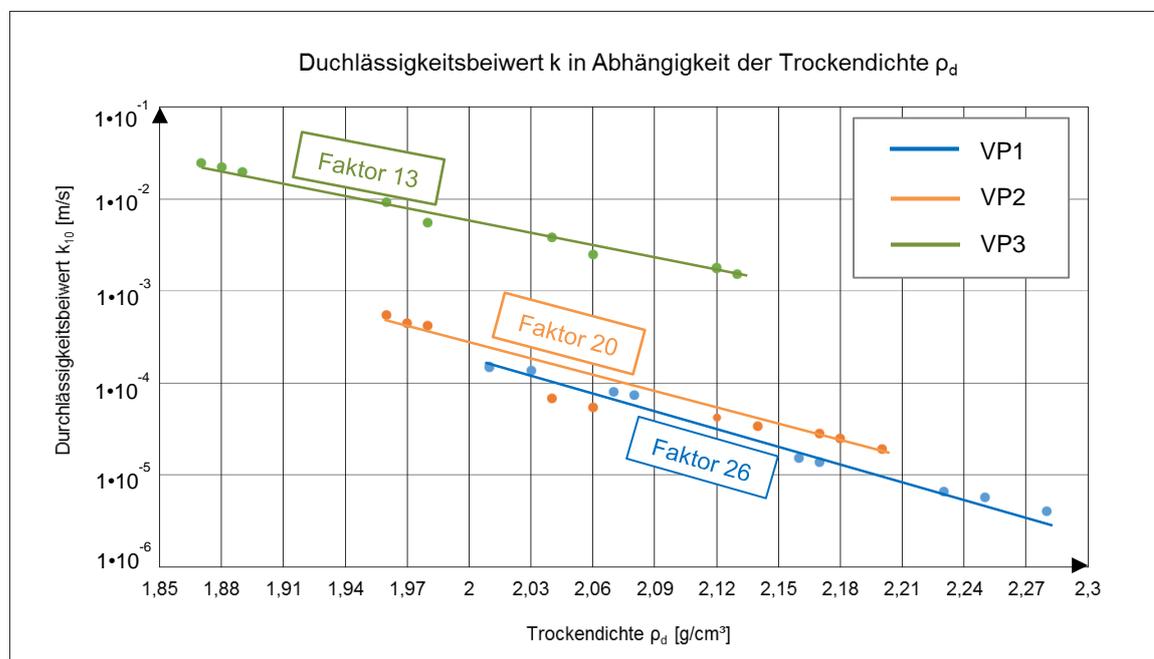


Abb. 56: Zusammenhang zwischen Trockendichte ρ_d und Durchlässigkeitsbeiwert k für drei grob- bzw. gemischtkörnige Bodenproben

- Inwieweit durch die Bodeneigenverdichtung eine Durchlässigkeitsreduzierung erreicht werden kann, ist von der Korngrößenverteilung abhängig. Böden mit weitgestufter und stetiger Kornverteilung sind dahingehend geeigneter als Böden mit intermittierender bzw. gestufter Kornverteilung.
- Der Anteil an feinerer Bodenkörnung ist hinsichtlich der lagerungsabhängigen Durchlässigkeitsreduzierung ein weiterer einflussgebender Parameter. Je höher der Anteil an feinerer Körnung ist, desto eher können im Zuge der Verdichtung die durchflusswirksamen Porenkanäle der gröberen Kornstruktur gefüllt werden.

Die Gegenüberstellung der mittels Standrohrversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte k mit den auf Grundlage empirischer Regressionsansätze berechneten k -Werten zeigt, dass einige Verfahren der indirekten Durchlässigkeitsbestimmung durchaus brauchbar sind, um größenordnungsmäßig (d. h. 1-2 Zehnerpotenzen) eine k -Wert-Abschätzung zu treffen. Hervorzuheben ist dabei das Verfahren nach Sichardt (1927) und in erweiterter Auswahl das Verfahren nach Konzeny-Köhler (1965). Auf Basis dieser Verfahren ist es für alle Versuchsproben und Lagerungsdichten möglich, gute Ergebnisse bei der Annäherung an den realen Durchlässigkeitsbeiwert k zu erzielen, weshalb beide Verfahren explizit für die Ingenieurpraxis zu empfehlen sind.

Jedoch muss auch erwähnt werden, dass die Streuungen der Verfahren untereinander, aber auch die Abweichungen in Bezug auf die in der Realität zu erwartenden k -Werte groß sein können. Auffallend ist dabei, dass der Einfluss der Lagerungsdichte hinsichtlich lockerster Lagerung und dichtester Lagerung beim Verfahren nach Beyer (1964) mit dem Faktor von 2 und beim Verfahren nach Konzeny-Köhler (1965) mit dem Faktor von ca. 4 in die Berechnung miteingeht. Dies steht aber im Widerspruch mit den Ergebnissen der Laborversuche, bei denen sich zwischen den Extremwerten der Lagerung eine k -Wert-Beeinflussung um den Faktor 13 bis 26 einstellt.

Ausgehend von den Laborergebnissen der lagerungsabhängigen Suffosionsversuche für zwei gemischtkörnige Bodenproben lassen sich folgende Erkenntnisse sowie Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Eigenfiltration (Trennstabilität) des Bodens hinsichtlich hydraulisch bedingter suffosiver Transportvorgänge ist durch die Verdichtung positiv beeinflussbar.
- Der Feinteilaustrag $\leq 0,063$ mm (Masseverlust) ist durch die Dichterhöhung um 31 % (VP3) bis 65 % (VP1) reduzierbar (Abb. 57). Unabhängig der Lagerung und Versuchsprobe beträgt der Größtkorndurchmesser d_{\max} der ausgespülten Feststoffmasse 0,063 mm.

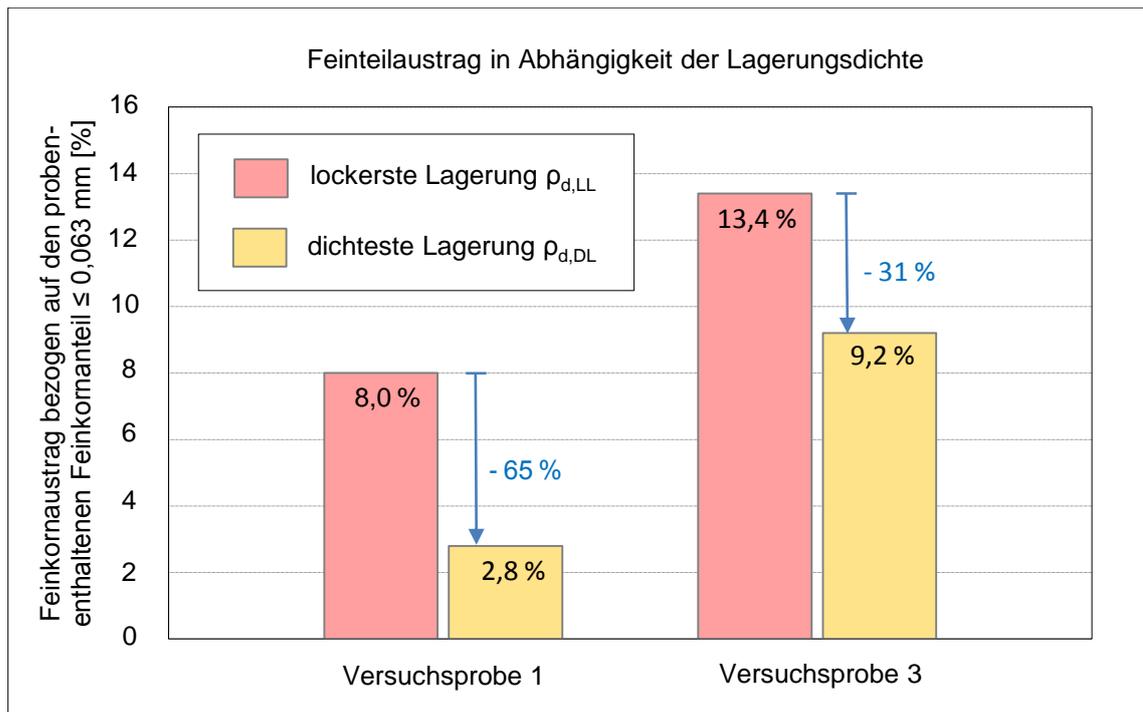


Abb. 57: Feinteilaustrag bei einem hydraulischen Gradienten $i = 1$ in Abhängigkeit der Lagerungsdichte für zwei gemischtkörnige Bodenproben

- Aufgrund der Tatsache, dass der schichtweise Probeneinbau angesichts der weitgestuften Kornspektren der Versuchsproben nicht mit derselben repräsentativen Kornverteilung durchführbar war, ist es nicht möglich, eindeutige Aussagen hinsichtlich hydraulisch bedingter Kornumlagerungen zu treffen.
- Inwieweit die Verdichtung die Suffosionsstabilität positiv beeinflusst, ist durch den Körnungsverlauf des Bodens bestimmt. Weitgestufte bimodale Böden mit intermittierender bzw. gestufter Kornverteilung reagieren in Bezug auf die Dichteerhöhung zur Suffosionsstabilisierung mit geringerer Sensibilität, als Böden mit einem stetigen bzw. gut abgestuften Kornaufbau.
- Das Proportionsverhältnis von feinerer (≤ 2 mm) zu gröberer (> 2 mm) Körnung gilt als weiterer entscheidender Einflussfaktor. Beträgt der Anteil an feinerer Körnung über 20 Massen-% (VP1), kann die zuvor lose in den Porenräumen des Grobskeletts eingelagerte und potentiell suffosionsgefährdete feinere Fraktion durch die Verdichtung aktiv in die tragende Struktur des Bodens eingebunden und stabilisiert werden. Hingegen bleiben Böden mit feinerer Körnung ≤ 20 Massen-% (VP3) trotz der Dichteerhöhung suffosiv.

7 Ausblick

Die Literaturrecherche bezüglich der RDV hat aufgezeigt, dass der Einfluss des beim Verdichtungsprozess an der GOK zugegebenen Einbaumaterials in Bezug auf das Verdichtungsergebnis weitestgehend ungeklärt bleibt. Nach Rücksprache mit Ingenieurexperten auf dem Gebiet des Spezialtiefbaus geht einstimmig die Meinung hervor, dass die RDV grundsätzlich eine Bodeneigenverdichtung ist und das während der Verdichtung zugegebene Material ausschließlich als Ausgleichskörnung zur Setzungsabgleichung eingebaut wird. Trotz der jahrzehntelangen und erfolgreichen Anwendung der RDV bleibt weiterhin Unklarheit darüber, ob sich im Zuge des Verdichtungsprozesses überhaupt ein Absinken des Zugabematerials bis hin zur Rüttlerspitze einstellt. Sofern sich ein Nachrutschen einstellt, gibt es dennoch nur unzureichende Kenntnis darüber, inwieweit die Zugabekörnung überhaupt in den anstehenden Boden eingebracht und mit diesem vermischt werden kann. Um die Interaktion zwischen dem zu verdichtenden Boden und dem Zugabematerial lückenlos erfassen zu können, wird im Zuge der Schlussbetrachtung nachdrücklich darauf hingewiesen, diese Wechselbeziehung in Form von Modellversuchen sowie insitu Prüfungen weiter zu erforschen.

Führt dieses zum Nachweis, dass durch die Zugabekörnung das Verdichtungsergebnis über einen akzeptablen Wirkungsbereich entscheidend beeinflusst werden kann, würde sich daraus ein entscheidender Vorteil ergeben. Demnach könnte im Zuge der RDV dem Ausgangsboden jenes Korngrößenspektrum zugegeben werden, welches für die Erfüllung der Verdichtungsaufgabe (i. d. R. Durchlässigkeitsreduzierung, Erosionsstabilisierung, Steifigkeits- bzw. Stabilitätserhöhung) benötigt wird.

8 Literaturverzeichnis

Baumgartner, A. & Liebscher, H. (1996)

Lehrbuch der Hydrologie (Band 1: 2. Auflage). Gebrüder Borntraeger, Berlin & Stuttgart.

BAW (2013)

Materialtransport im Boden (MMB). BAW-Merkblätter und -Richtlinien. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe.

Beyer, W. (1964)

Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. Wasserwirtschaft - Wassertechnik 14. S. 165-168.

Beyer, W. (1967)

Zur Analyse der Grundwasserfließbewegungen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. 16. Jahrgang: Heft 4, TU Dresden.

Bialas, Z. & Kleczkowski, A. (1970)

O przydatności niektórych wzorów empirycznych dla określenia współczynnika filtracji k . Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k . Archiwum Hydrotechniki 17, S. 405-417.

Brown, R. (1977)

Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division.

Burenkova, V. (1993)

Assesment of the suffosion in non-cohesive and graded soils. in: Proceedings "Filters in Geotechnical and Hydraulic Engeneering". Heibaum & Schuler (eds), Rotterdam.

Busch, K., Luckner, L. & Thiemer, K. (1993)

Geohydraulik: Lehrbuch der Hydrogeologie Band 3. Gebrüder Borntraeger, Berlin & Stuttgart.

D'Appolonia, E. (1953)

"Loose Sands- Their Compaction by Vibroflotation". in: ASTM Special Technical Publication No.156, p.138.

Fa. Bauer (2015)

Baugrundverbesserung. von Prospekt 905.734.1:

https://www.bauer.de/export/shared/pdf/bma/products/methods/info_80.pdf

Fa. Keller (2004)

Die Tiefenrüttelverfahren. Von Prospekt 10-02D:

<http://www.kellergrundbau.at/de/tiefenruettelverfahren.asp>

Fellin, W. (2000)

Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem. in: Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling. Balkema, Rotterdam & Brookfield.

Fellin, W. (2002)

On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung. Messen in der Geotechnik 2002: Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik (S. 607-612). Heft 68, Technische Universität Braunschweig.

Floss, R. (1986)

Die Bodenverdichtung im Verkehrswege-, Grund- und Dammbau (6. neubearbeitete und erweiterte Auflage). Werner-Verlag, Düsseldorf.

Fuchs, S. (2010)

Deterministische k_f -Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache. Grundwasser (Volume 15, Issue 3), S. 177-189.

Greenwood, D. & Kirsch, K. (1983)

Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamic Methods. Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations. London.

Hazen, A. (1892)

Some physical properties of sands and gravels with special reverence to their use in filtration. 24th annual report: Massachusetts State Bureau of Health. Pub. Doc. No. 34, 539-556. Boston.

Herth, W. & Arndts, E. (1995)

Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung (3. Auflage). Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaft GmbH, Berlin.

- Homann, K. & Hüning, R. (1997)
Handbuch der Gas-Rohrleitungs-Technik (2 Auflage). R. Oldenbourg Verlag,
München & Wien.
- Keller, G. (1969)
Angewandte Hydrogeologie. Verlag Wasser und Boden Axel Lindow & Co.,
Hamburg.
- Kenney, T. & Lau, D. (1985)
Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal: J 22.
- Kenney, T. & Lau, D. (1986)
Internal stability of granular filters - Reply. Canadian Geotechnical Journal: J 23.
- Kézdi, A. (1969)
Handbuch der Bodenmechanik (Band I-IV). VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Kirsch. (1993)
Baugrundverbesserung mit Tiefenrüttlern: 40 Jahre Spezialtiefbau 1953-1993
-Technische und rechtliche Entwicklungen. Werner Verlag, Düsseldorf.
- Kirsch, K. & Sondermann, W. (2001)
Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren (6. Auflage). Ernst &
Sohn, Berlin.
- Köhler, H. (1965)
Ein kombinierendes Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes
von Sand- und Kiesgemischen für Wasser aus Siebproben. Bergbautechnik 15.
S. 338-342.
- Kolymbas, D. (2007)
Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau (2. korrigierte und er-
gänzte Auflage). Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.
- Lang, D. (2008)
Durchlässigkeit von Böden: Übliche Verfahren und deren Überprüfung. Diplo-
mica Verlag GmbH, Hamburg.

Langguth, H. R. & Voigt, R. (2004)

Hydrogeologische Methoden (2. überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.

Lehners, C. (1993)

Analyse von Strömungen in wassergesättigten Kornhaufwerken. Mitteilungen. Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 121.

Massarsch, K. (2016)

Grundlagen der Rütteldruckverdichtung. Veder-Kolloquium. Graz.

Nendza, M. (2006)

Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Essen.

Rieß, R. (2001)

Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren (6. Auflage). Ernst & Sohn, Berlin.

Rogers, A. (1979)

Vibrocompaction of cohesionless soils. Cementation Research Limited: International Report.

Schenk, E. (1967)

„Die Bestimmung des Gesetzes über den Durchfluß in Sanden“ nach dem Originaltext von Darcy. Bohrtechnik Brunnenbau Rohrleitungsbau 18.

Schultze, E. & Muhs, H. (1967)

Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag, Berlin.

Seelheim, F. (1880)

Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. Zeitschrift für Analytische Chemie 19. S. 387- 418.

Seiler, K. P. (1973)

Durchlässigkeit, Porosität und Kornverteilung quartärer Kies-Sand-Ablagerungen des bayrischen Alpenvorlandes. Das Gas- und Wasserfach. Ausgabe: Wasser Abwasser, S. 353-358.

Sichardt, W. (1927)

Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenktiefen. Julius Springer Verlag, Berlin.

Simmer, K. (1994)

Grundbau 1 - Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. B.G. Teubner, Stuttgart.

Steffen. (1979)

Merkblatt für die Untergrundverbesserung durch Tiefenrüttler. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Arbeitsausschuss Bodenverdichtung, Köln.

Witt, K. J. (2014)

Suffosion nichtbindiger Böden - Phänomen und Nachweismethoden. BAW-Kolloquium "Filter und hydraulische Transportvorgänge im Boden". Hannover.

Ziems. (1967)

Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers. Wasserwirtschaft-Wassertechnik. 17.Jahrgang: Heft 2.

Ziems. (1970)

Werkstandard Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung - Suffosion nichtbindiger Erdstoffe. WAPRO: Ausgabe 4.04 Blatt 2. VEB Projektierung Wasserwirtschaft.

Zieschang, J. (1961)

Zur zulässigen Höchstbelastung eines Brunnens. Zeitschrift für Angewandte Geologie (ZAG) Band 7. Heft 11: S. 580-582.

Zöhner, A. & Winter, V. (2016)

Bodenverbesserung mit Tiefenrüttlern – moderne Technik mit langer Tradition. Veder-Kolloquium. Graz.

9 Normative Anweisungen

ÖNORM EN 14731:2005

Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren

ÖNORM EN ISO 14688-1:2002

Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, Teil 1: Benennung und Beschreibung

ÖNORM B 4422-1:1992

Erd- und Grundbau - Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit - Laborprüfungen

DIN 18126:1996

Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung

ÖNORM B 4412:1974

Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung

10 Anhang

Inhaltsverzeichnis:

- Anhang A: zu Versuch Nr. 1
- Anhang B: zu Versuch Nr. 2
- Anhang C: zu Versuch Nr. 3

Deckblatt

zum Versuch

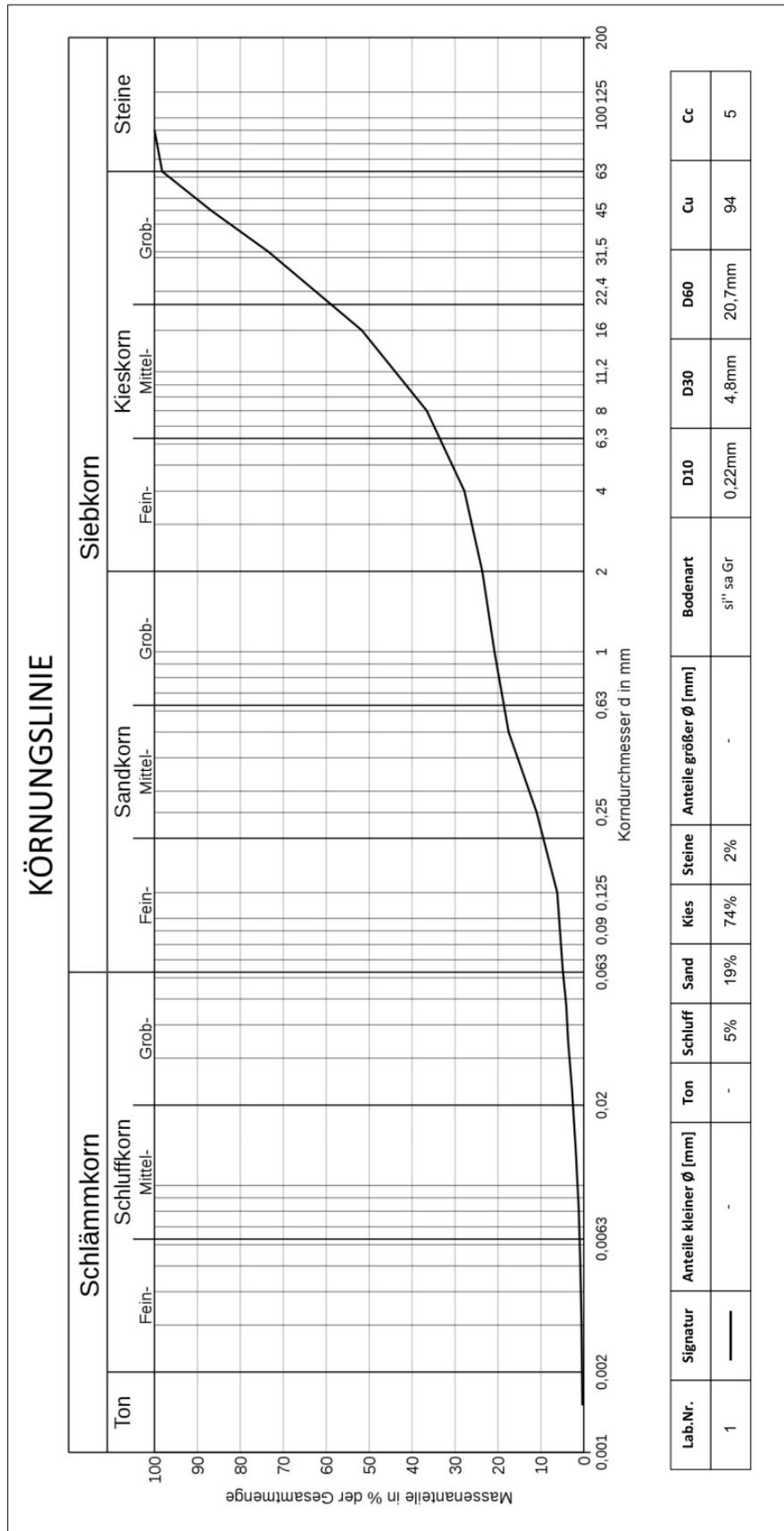
Nr. 1

<u>Bodenart:</u>	si ⁴ sa Gr
<u>Bezeichnung:</u>	Murschotter
<u>Entnahme:</u>	gestört
<u>Entnahmeort:</u>	Baustelle „Südumfahrung Graz“

**Nachstehend sind für die Versuchsprobe 1 folgende
Anlagen beigelegt:**

- Anhang A1: Kornverteilungskurve nach ÖNORM B 4412:1974
- Anhang A2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k
- Anhang A3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Anhang A1: Kornverteilungskurve nach ÖNORM B 4412:1974



Anhang 1: Körnungslinie der Versuchsprobe 1 (nach ÖNORM B 4412:1974)

Anhang A2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k Verfahren nach Hazen (Kap. 3.2.1):

$$k = 0,0166 \cdot d_{10}^2 = 0,0166 \cdot 0,22^2 = \text{ungültig}$$

$$\text{mit: } d_{10} = 0,22 \text{ mm}$$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 94 > 5$.

Verfahren nach Zieschang (Kap. 3.2.2):

$$k = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \theta) = \text{ungültig} \cdot 0,22^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \theta) = \text{ungültig}$$

$$\text{mit: } d_{10} = 0,22 \text{ mm}$$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 94 > 5$.

Verfahren nach Beyer (Kap. 3.2.3):

$$k = C \cdot d_{10}^2 = \text{ungültig} \cdot 0,22^2 = \text{ungültig}$$

$$\text{mit: } d_{10} = 0,22 \text{ mm}$$

Die Proportionalitätskonstante C kann weder tabellarisch nach Tab. 8 noch grafisch nach Abb. 20 ausgelesen werden, weil der Anwendungsbereich des Verfahrens überschritten ist, da $C_u = 94 > 20$.

Verfahren nach Seiler (Kap. 3.2.5):

$$k = \kappa \cdot d_w^2 = 66,2 \cdot 0,25^2 = 4,1 \text{ cm/s} \hat{=} 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$\text{für: } C_u = 94 > 17$$

$$\text{gilt: } d_w \hat{=} d_{25} = 0,25 \text{ cm}$$

$$\kappa = 66,2 \text{ (nach Tab. 12)}$$

Gültigkeitsbereich von $5 \leq C_u \leq 100$ eingehalten.

Verfahren nach Seelheim (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,00357 \cdot d_{50}^2 = 0,00357 \cdot 14,8^2 = \text{ungültig}$$

$$\text{mit: } d_{50} = 14,8 \text{ mm}$$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 94 > 5$.

Verfahren nach Konzeny-Köhler (Kap. 3.2.4):

$$k = C \cdot d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot d_w^2$$

$$\text{mit: } d_w = \frac{\sum \Delta G_i}{\sum \frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i} = \frac{100}{1374,74} = 0,07 \text{ mm}$$

Anhang 2: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Konzeny-Köhler (VP1)

Korndurchmesser [mm]	1/d _i [mm ⁻¹]	ΔG _i [%]	(1/d _i) • ΔG _i
90			
63	0,01	2	0,02
45	0,02	11	0,22
31,5	0,03	13	0,39
16	0,05	22	1,10
8	0,09	15	1,35
4	0,19	9	1,71
2	0,38	4	1,52
1	0,75	3	2,25
0,5	1,50	3	4,50
0,25	3,00	6	18,00
0,125	6,00	5	30,00
0,063	11,94	2	23,88
0,002	257,94	5	1289,70
		Σ = 100	Σ = 1374,64

Rauigkeitsgrad nach Tab. 10: rundlicher Flusssand → r = 1

Zähigkeit des Wassers: Vergleichstemperatur bei 10°C → τ = 1

$$k = \frac{1}{1} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot 0,07^2 = 1,98 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e}$$

Versuch 1.1 – 1.3 (lockerste Lagerung): e = 0,36 → k = 6,8 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 1.4 – 1.5 (eher lockere Lagerung): e = 0,32 → k = 4,9 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 1.6 – 1.7 (eher dichte Lagerung): e = 0,27 → k = 3,1 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 1.8 – 1.10 (dichteste Lagerung): e = 0,22 → k = 1,6 • 10⁻⁶ m/s

Verfahren nach Sichardt (3.2.6):

$$k = 0,006 \cdot d_m^2$$

$$\text{mit: } d_m = \frac{1}{100} \cdot \sum \frac{d_{m,i}}{G_i} = \frac{49,03}{100} = 0,49 \text{ mm}$$

Anhang 3: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Sichardt (VP1)

Korndurchmesser [mm]	$d_{m,i}$ [mm]	G [%]	$d_{m,i}/G$
90			
63	74,90	2	37,45
45	52,99	11	4,82
31,5	37,45	13	2,88
16	22,00	22	1,00
8	11,08	15	0,74
4	5,54	9	0,62
2	2,77	4	0,69
1	1,38	3	0,46
0,5	0,69	3	0,23
0,25	0,35	6	0,06
0,125	0,17	5	0,03
0,063	0,09	2	0,05
0,002	0,01	5	0,00
		$\Sigma = 100$	$\Sigma = 49,03$

$$k = 0,006 \cdot 0,49^2 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Verfahren nach Bialas et al. (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,0036 \cdot d_{20}^{2,3} = 0,0036 \cdot 0,8^{2,3} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\text{mit: } d_{20} = 0,8 \text{ mm}$$

Anhang A3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Einfaches Verfahren (Kap. 4.3.1):

Stetiger Körnungsverlauf → einfaches Verfahren darf angewendet werden.

Nach dem einfachen Verfahren gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 8$$

$$C_u = \frac{20,7}{0,22} = 94 \not\leq 8 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Die Versuchsprobe 1 gilt nach dem einfachen Verfahren als suffosiv

Verfahren nach Ziems (Kap. 4.3.2):

Stetiger Körnungsverlauf (keine markanten Knick, Krümmungsänderungen Fehlkornbereiche) → Verfahren nach Ziems darf angewendet werden.

Nach Ziems gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$\frac{d_{min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5$$

$$d_{min} = d_3 = 0,02 \text{ mm} \quad (\text{Annahme: 3 \% Massenausstrag tolerierbar})$$

$$F_s = 0,4 \quad (\text{Annahme: stationäre Durchströmung})$$

Für die lockerste Bodenlagerung $\rho_{d,LL}$ (Porenzahl $e = 0,36$) errechnet sich der der mittlere Porenkanaldurchmesser d_k nach Pavcic wie folgt:

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{94} \cdot 0,36 \cdot 0,45 \text{ mm} = 0,16 \text{ mm}$$

$$\frac{0,02 \text{ mm}}{0,4 \cdot 0,16 \text{ mm}} = 0,31 \not\geq 1,5 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Für die dichteste Bodenlagerung $\rho_{d,DL}$ (Porenzahl $e = 0,22$) errechnet sich der der mittlere Porenkanaldurchmesser d_k nach Pavcic wie folgt:

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{94} \cdot 0,22 \cdot 0,45 \text{ mm} = 0,10 \text{ mm}$$

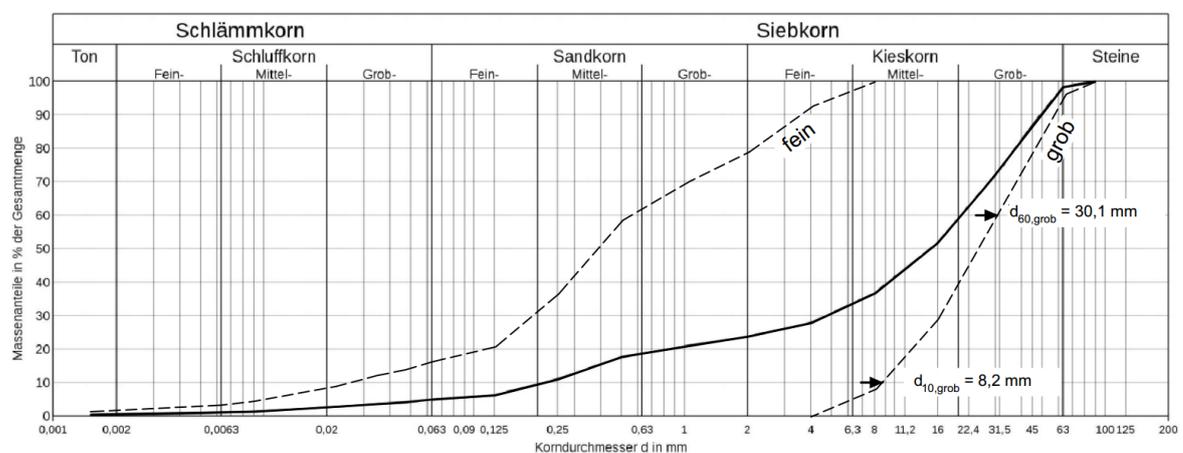
$$\frac{0,02 \text{ mm}}{0,4 \cdot 0,10 \text{ mm}} = 0,50 \not\geq 1,5 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Die Versuchsprobe 1 gilt nach dem Verfahren von Ziems sowohl für die lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$ als auch für die dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$ als suffosiv.

Verfahren nach Kenney und Lau (Kap. 4.3.3):

Das Verfahren nach Kenney und Lau bezieht sich bei der Suffosionsbeurteilung nicht auf den gesamten Körnungsverlauf sondern nur auf die feinsten 20 bzw. 30 Massen-%. Die Ermittlung des maßgebenden feineren Anteils erfolgt durch die Aufspaltung der Körnungslinie bei 30 Massen-% (Anhang 4). Anschließend wird für den groben Körnungsverlauf die Ungleichförmigkeit $C_{u,grob}$ bestimmt. Beläuft sich die Ungleichförmigkeit des groben Kornspektrums auf $C_{u,grob} \leq 3$ sind die feinsten 30 Gewichts-% maßgebend. Sofern die Ungleichförmigkeit mit $C_{u,grob} > 3$ ermittelt wird, sind die feinsten 20 Gewichts-% für die weitere Berechnung entscheidend (Anhang 6).

Relevanter Massenprozentsatz an feinerer Körnung:



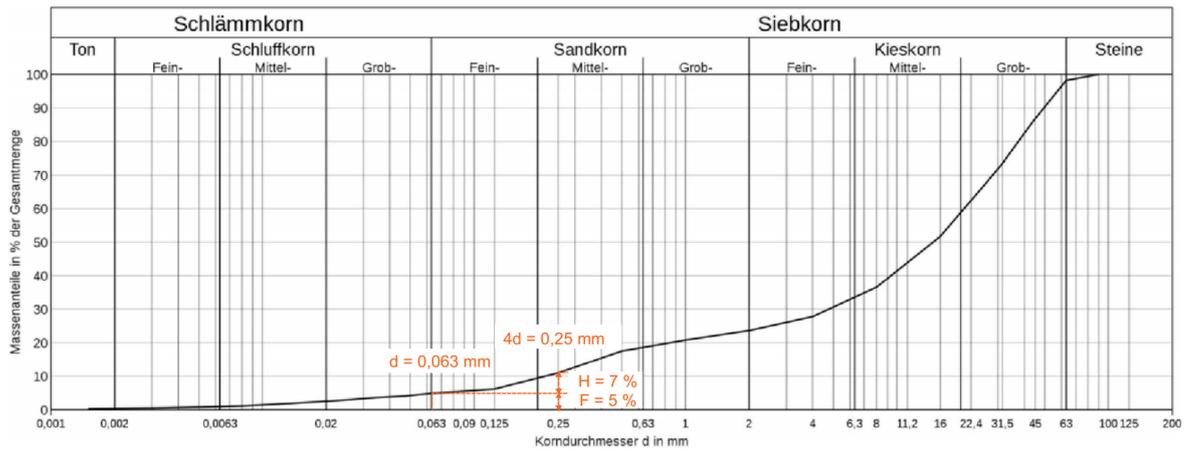
Anhang 4: Auftrennen der Körnungslinie bei 30 Massen-% (VP1)

$$C_{u,grob} = \frac{d_{60,grob}}{d_{10,grob}} = \frac{30,1}{8,2} \approx 3,7$$

$C_{u,grob} = 3,7 > 3 \rightarrow$ feinsten 20 Massen-% maßgebend

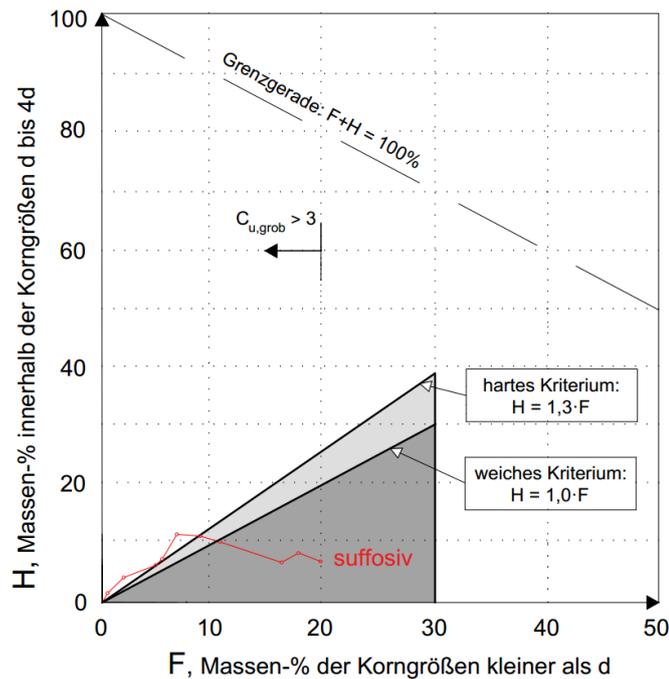
Umwandlung der Körnungslinie in eine H(F)-Formkurve:

Dabei wird für mehrere Korndurchmesser d der feineren Fraktion ($d_0 \leq d \leq d_{20}$) der Siebdurchgang F , sowie der Massendurchgang H zwischen den Korngrößen d und dem dazugehörigen 4-fachen Korndurchmesser $4d$ ermittelt. Die Herangehensweise wird nachfolgend für die Korngröße $d = 0,063$ mm beispielhaft vorgezeigt (Anhang 5).

Anhang 5: Ermittlung der Werteparameter $H + F$ für die Erstellung der Formkurve (VP1)

mit: $d = 0,063 \text{ mm} \rightarrow F = 5\%$ (Massen-% der Korngrößen $\leq d$)
 $4d = 0,25 \text{ mm} \rightarrow H = 7\%$ (Massen-% der Korngrößen d bis $4d$)

Führt man dieses Prozedere für mehrere Korndurchmesser d ($d_0 \leq d \leq d_{20}$) durch, kann die Formkurve in einem $H(F)$ -Diagramm erstellt werden (Anhang 6).

Anhang 6: $H(F)$ -Formkurve zur Überprüfung der Suffosionsstabilität nach Kenney und Lau (VP1)

Die Formkurve (rot gekennzeichnet) schneidet die Grenzgerade des weichen Kriteriums (dunkelgrau hinterlegte Rechteckfläche), weshalb die Versuchsprobe 1 nach dem Verfahren von Kenney und Lau als suffosiv zu bewerten ist.

Verfahren nach Burenkova (Kap. 4.3.4):

Nach Burenkova gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1$$

$$h' = d_{90} / d_{60} = 49,0 \text{ mm} / 20,7 \text{ mm} = 2,4 \text{ [-]}$$

$$h'' = d_{90} / d_{15} = 49,0 \text{ mm} / 0,38 \text{ mm} = 129,0 \text{ [-]}$$

Anwendungsbereich von $1 \leq h' \leq 5$ bzw. $3 \leq h'' \leq 130$ ist erfüllt → Verfahren nach Kenney und Lau darf angewendet werden.

eingesetzt ergibt:

$$0,76 \cdot \lg(129,0) + 1 < 2,4 < 1,86 \cdot \lg(129,0) + 1$$

$$2,6 \not< 2,4 < 4,9 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Die Versuchsprobe 1 gilt nach dem Verfahren von Burenkova als suffosiv.

Deckblatt

zum Versuch

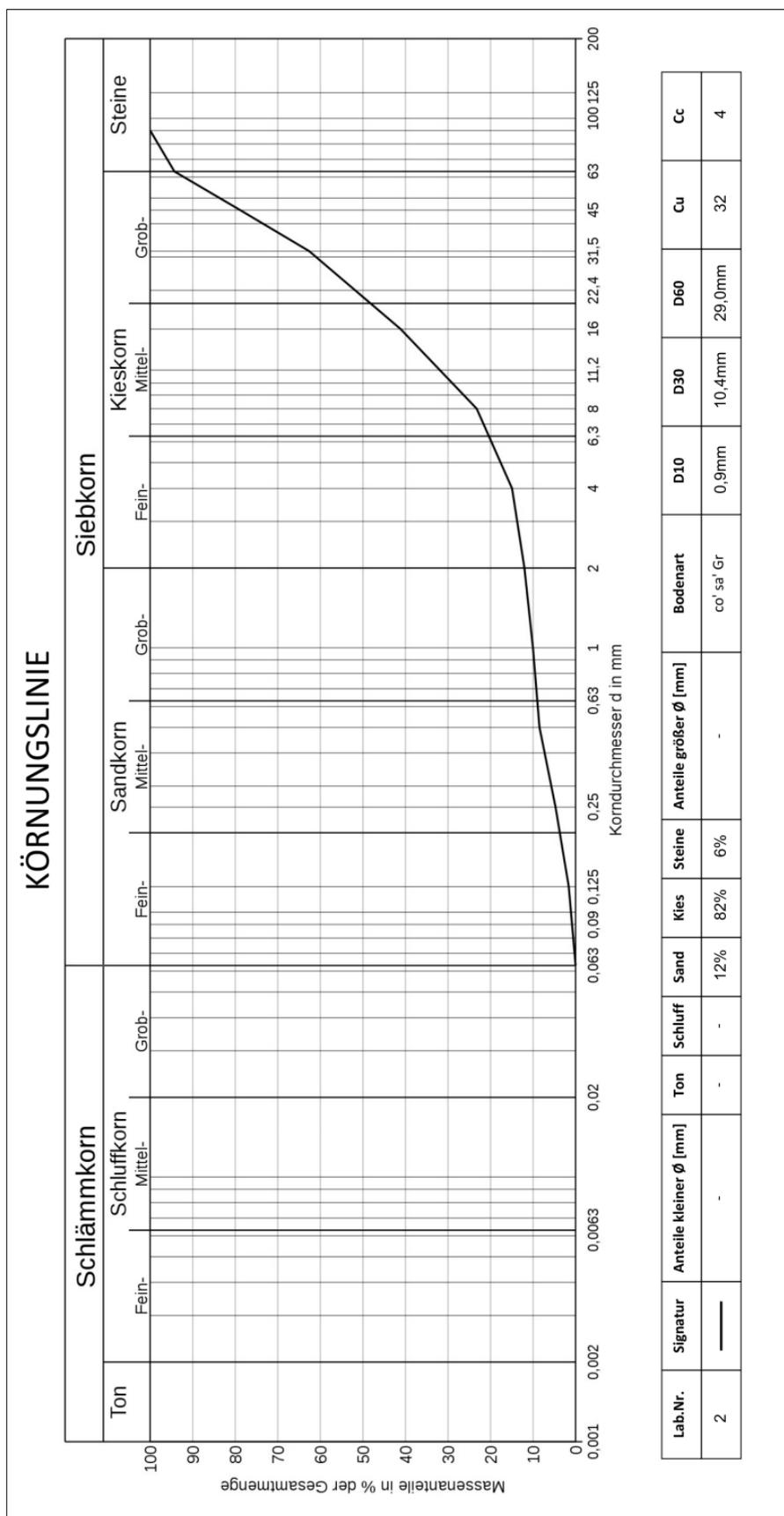
Nr. 2

<u>Bodenart:</u>	co' sa' Gr
<u>Bezeichnung:</u>	Murschotter mit reduzierter Körnung ≤ 2 mm
<u>Entnahme:</u>	gestört / künstlich erzeugt
<u>Entnahmeort:</u>	-

**Nachstehend sind für die Versuchsprobe 2 folgende
Anlagen beigelegt:**

- Anhang B1: Kornverteilungskurve nach B 4412:1974
- Anhang B2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k
- Anhang B3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Anhang B1: Kornverteilungskurve nach ÖNORM B 4412:1974



Anhang 7: Körnungslinie der Versuchsprobe 2 (nach ÖNORM B 4412:1974)

Anhang B2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitbeiwerts k Verfahren nach Hazen (Kap. 3.2.1):

$$k = 0,0166 \cdot d_{10}^2 = 0,0166 \cdot 0,9^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 0,9 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 32 > 5$.

Verfahren nach Zieschang (Kap. 3.2.2):

$$k = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \Theta) = \text{ungültig} \cdot 0,9^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \Theta) = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 0,9 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 32 > 5$.

Verfahren nach Beyer (Kap. 3.2.3):

$$k = C \cdot d_{10}^2 = \text{ungültig} \cdot 0,9^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 0,9 \text{ mm}$

Die Proportionalitätskonstante C kann weder tabellarisch nach Tab. 8 noch grafisch nach Abb. 20 ausgelesen werden, weil der Anwendungsbereich des Verfahrens überschritten ist, da $C_u = 32 > 20$.

Verfahren nach Seiler (Kap. 3.2.5):

$$k = \kappa \cdot d_w^2 = 11,6 \cdot 0,85^2 = 8,4 \text{ cm/s} \hat{=} 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

für: $C_u = 32 > 17$

gilt: $d_w \hat{=} d_{25} = 0,85 \text{ cm}$

$$\kappa = 11,6 \text{ (nach Tab. 12)}$$

Gültigkeitsbereich von $5 \leq C_u \leq 100$ eingehalten.

Verfahren nach Seelheim (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,00357 \cdot d_{50}^2 = 0,00357 \cdot 21,0^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{50} = 21,0 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 32 > 5$.

Verfahren nach Konzeny-Köhler (Kap. 3.2.4):

$$k = C \cdot d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot d_w^2$$

$$\text{mit: } d_w = \frac{\sum \Delta G_i}{\sum \frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i} = \frac{100}{63,07} = 1,6 \text{ mm}$$

Anhang 8: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Konzeny-Köhler (VP2)

Korndurchmesser [mm]	1/d _i [mm ⁻¹]	ΔG _i [%]	(1/d _i) • ΔG _i
90			
63	0,01	6	0,06
45	0,02	16	0,32
31,5	0,03	16	0,48
16	0,05	21	1,05
8	0,09	18	1,62
4	0,19	8	1,52
2	0,38	3	1,14
1	0,75	2	1,50
0,5	1,50	1	1,50
0,25	3,00	4	12,00
0,125	6,00	3	18,00
0,063	11,94	2	23,88
		Σ = 100	Σ = 63,07

Rauigkeitsgrad nach Tab. 10: rundlicher Flusssand → r = 1

Zähigkeit des Wassers: Vergleichstemperatur bei 10°C → τ = 1

$$k = \frac{1}{1} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot 1,6^2 = 1,04 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{e^3}{1+e}$$

Versuch 2.1 - 2.3 (lockerste Lagerung): e = 0,39 → k = 4,4 • 10⁻³ m/s

Versuch 2.4 - 2.5 (eher lockere Lagerung): e = 0,34 → k = 3,1 • 10⁻³ m/s

Versuch 2.6 - 2.7 (eher dichte Lagerung): e = 0,29 → k = 2,0 • 10⁻³ m/s

Versuch 2.8 - 2.10 (dichteste Lagerung): e = 0,26 → k = 1,5 • 10⁻³ m/s

Verfahren nach Sichardt (Kap. 3.2.6):

$$k = 0,006 \cdot d_m^2$$

$$\text{mit: } d_m = \frac{1}{100} \cdot \sum \frac{d_{m,i}}{G_i} = \frac{22,99}{100} = 0,23 \text{ mm}$$

Anhang 9: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Sichardt (VP2)

Korndurchmesser [mm]	$d_{m,i}$ [mm]	G [%]	$d_{m,i}/G$
90			
63	74,90	6	12,48
45	52,99	16	3,31
31,5	37,45	16	2,34
16	22,00	21	1,05
8	11,08	18	0,62
4	5,54	8	0,69
2	2,77	3	0,92
1	1,38	2	0,69
0,5	0,69	1	0,69
0,25	0,35	4	0,09
0,125	0,17	3	0,06
0,063	0,09	2	0,05
		$\Sigma = 100$	$\Sigma = 22,99$

$$k = 0,006 \cdot 0,23^2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Verfahren nach Bialas et al. (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,0036 \cdot d_{20}^{2,3} = 0,0036 \cdot 5,5^{2,3} = 1,8 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$\text{mit: } d_{20} = 5,5 \text{ mm}$$

Anhang B3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Einfaches Verfahren (Kap. 4.3.1):

Stetiger Körnungsverlauf → einfaches Verfahren darf angewendet werden.

Nach dem einfachen Verfahren gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 8$$

$$C_u = \frac{29,0}{0,9} = 32 \not\leq 8 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Die Versuchsprobe 2 gilt nach dem einfachen Verfahren als suffosiv.

Verfahren nach Ziems (Kap. 4.3.2):

Stetiger Körnungsverlauf (keine markanten Knickpunkte, Krümmungsänderungen Fehlkornbereiche) → Verfahren nach Ziems darf angewendet werden.

Nach Ziems gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$\frac{d_{min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5$$

$$d_{min} = d_3 = 0,18 \text{ mm} \quad (\text{Annahme: 3 \% Massenauswurf tolerierbar})$$

$$F_s = 0,4 \quad (\text{Annahme: stationäre Durchströmung})$$

Für die lockerste Bodenlagerung $\rho_{d,LL}$ (Porenzahl $e = 0,39$) errechnet sich der mittlere Porenkanaldurchmesser d_k nach Pavcic wie folgt:

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{32} \cdot 0,39 \cdot 4,5 \text{ mm} = 1,42 \text{ mm}$$

$$\frac{0,18 \text{ mm}}{0,4 \cdot 1,42 \text{ mm}} = 0,32 \not\geq 1,5 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Für die dichteste Bodenlagerung $\rho_{d,DL}$ (Porenzahl $e = 0,26$) errechnet sich der mittlere Porenkanaldurchmesser d_k nach Pavcic wie folgt:

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{32} \cdot 0,26 \cdot 4,5 \text{ mm} = 0,95 \text{ mm}$$

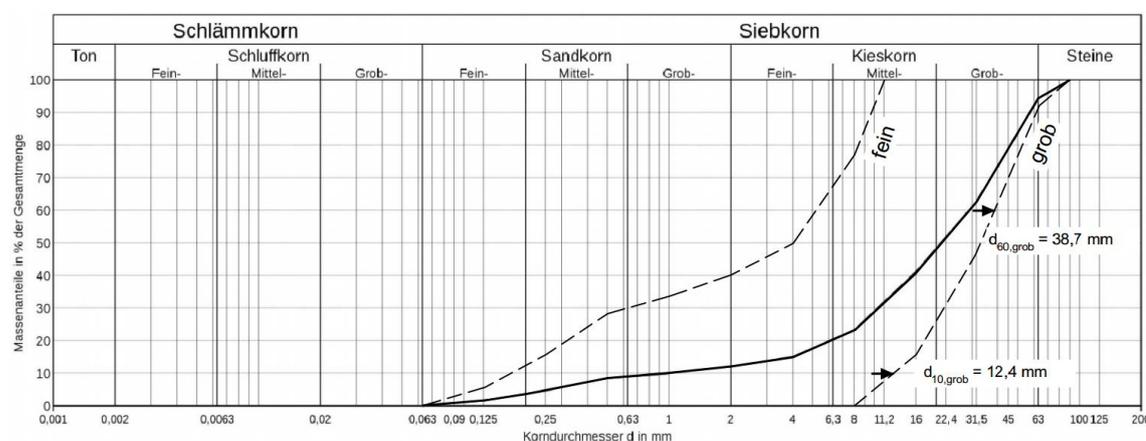
$$\frac{0,18 \text{ mm}}{0,4 \cdot 0,95 \text{ mm}} = 0,47 \not\geq 1,5 \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Der Versuchsprobe 2 gilt nach dem Verfahren von Ziems sowohl für die lockerste Lagerung $\rho_{d,LL}$ als auch für die dichteste Lagerung $\rho_{d,DL}$ als suffosiv.

Verfahren nach Kenney und Lau (Kap. 4.3.3):

Das Verfahren nach Kenney und Lau bezieht sich bei der Suffosionsbeurteilung nicht auf den gesamten Körnungsverlauf sondern nur auf die feinsten 20 bzw. 30 Massen-%. Die Ermittlung des maßgebenden feineren Anteils erfolgt durch die Aufspaltung der Körnungslinie bei 30 Massen-% (Anhang 10). Anschließend wird für den groben Körnungsverlauf die Ungleichförmigkeit $C_{u,grob}$ bestimmt. Beläuft sich die Ungleichförmigkeit des groben Kornspektrums auf $C_{u,grob} \leq 3$ sind die feinsten 30 Gewichts-% maßgebend. Sofern die Ungleichförmigkeit mit $C_{u,grob} > 3$ ermittelt wird, sind die feinsten 20 Massen-% für die weitere Berechnung entscheidend (Anhang 12).

Relevanter Massenprozentsatz an feinerer Körnung:



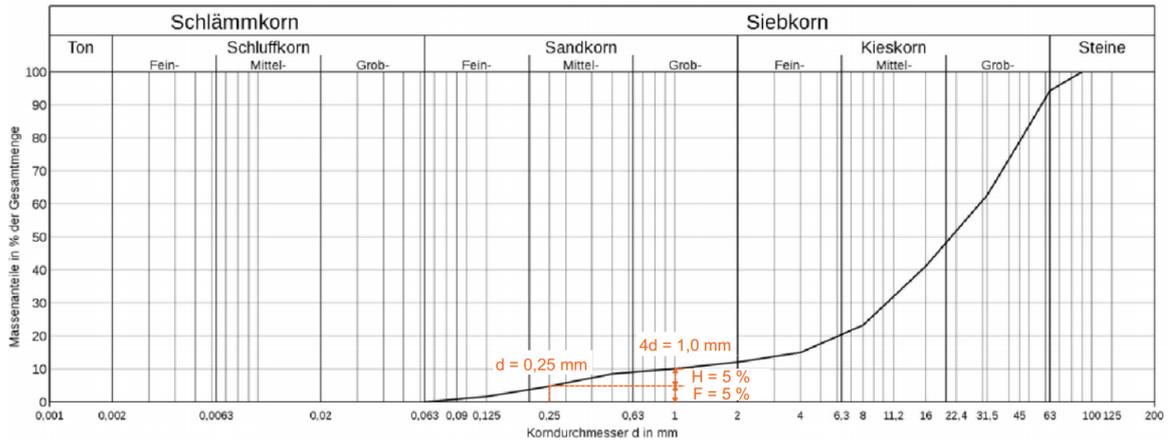
Anhang 10: Auftrennen der Körnungslinie bei 30 Massen-% (VP2)

$$C_{u,grob} = \frac{d_{60,grob}}{d_{10,grob}} = \frac{38,7}{12,4} \approx 3,1$$

$C_{u,grob} = 3,1 > 3 \rightarrow$ feinsten 20 Massen-% maßgebend

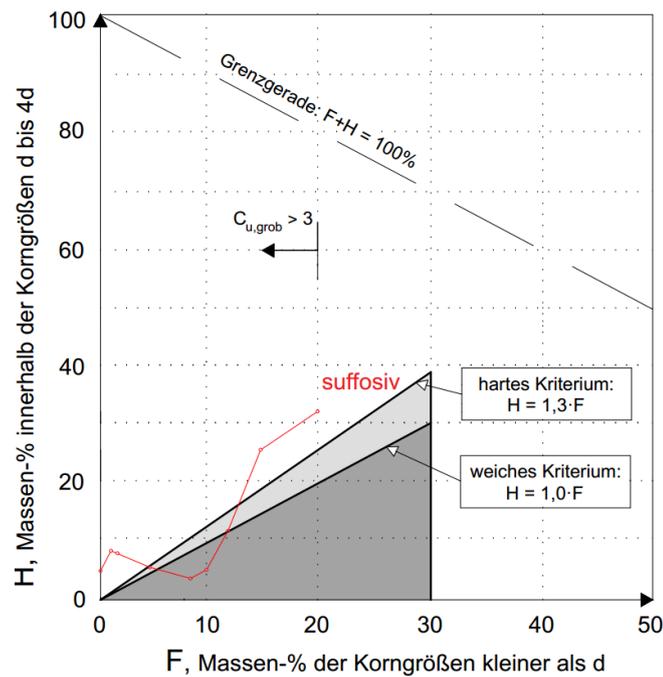
Umwandlung der Körnungslinie in eine $H(F)$ -Formkurve:

Dabei wird für mehrere Korndurchmesser d der feineren Fraktion ($d_0 \leq d \leq d_{20}$) der Siebdurchgang F , sowie der Massendurchgang H zwischen den Korngrößen d und dem dazugehörigen 4-fachen Korndurchmesser $4d$ ermittelt. Die Herangehensweise wird nachfolgend für die Korngröße $d = 0,25 \text{ mm}$ beispielhaft vorgezeigt (Anhang 11).

Anhang 11: Ermittlung der Werteparameter $H + F$ für die Erstellung der Formkurve (VP2)

mit: $d = 0,25 \text{ mm} \rightarrow F = 5 \%$ (Massen-% der Korngrößen $\leq d$)
 $4d = 1,0 \text{ mm} \rightarrow H = 5 \%$ (Massen-% der Korngrößen d bis $4d$)

Führt man dieses Prozedere für mehrere Korndurchmesser d ($d_0 \leq d \leq d_{20}$) durch, kann die Formkurve in einem $H(F)$ -Diagramm erstellt werden (Anhang 12).

Anhang 12: $H(F)$ -Formkurve zur Überprüfung der Suffusionsstabilität nach Kenney und Lau (VP2)

Die Formkurve (rot gekennzeichnet) schneidet die Grenzgerade des weichen Kriteriums (dunkelgrau hinterlegte Rechteckfläche), weshalb die Versuchsprobe 2 nach dem Verfahren von Kenney und Lau als suffosiv zu bewerten ist.

Verfahren nach Burenkova (Kap. 4.3.4):

Nach Burenkova gilt der Boden als suffusionsstabil sofern gilt:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1$$

$$h' = d_{90} / d_{60} = 58,0 \text{ mm} / 29,00 \text{ mm} = 2,0 \text{ [-]}$$

$$h'' = d_{90} / d_{15} = 58,0 \text{ mm} / 3,8 \text{ mm} = 15,3 \text{ [-]}$$

Anwendungsbereich von $1 \leq h' \leq 5$ bzw. $3 \leq h'' \leq 130$ ist erfüllt → Verfahren nach Kenney und Lau darf angewendet werden.

eingesetzt ergibt:

$$0,76 \cdot \lg(15,3) + 1 < 2,0 < 1,86 \cdot \lg(15,3) + 1$$

$$1,9 < 2,0 < 3,2 \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Der Versuchsprobe 2 gilt nach dem Verfahren von Burenkova als suffusionsstabil.

Deckblatt

zum Versuch

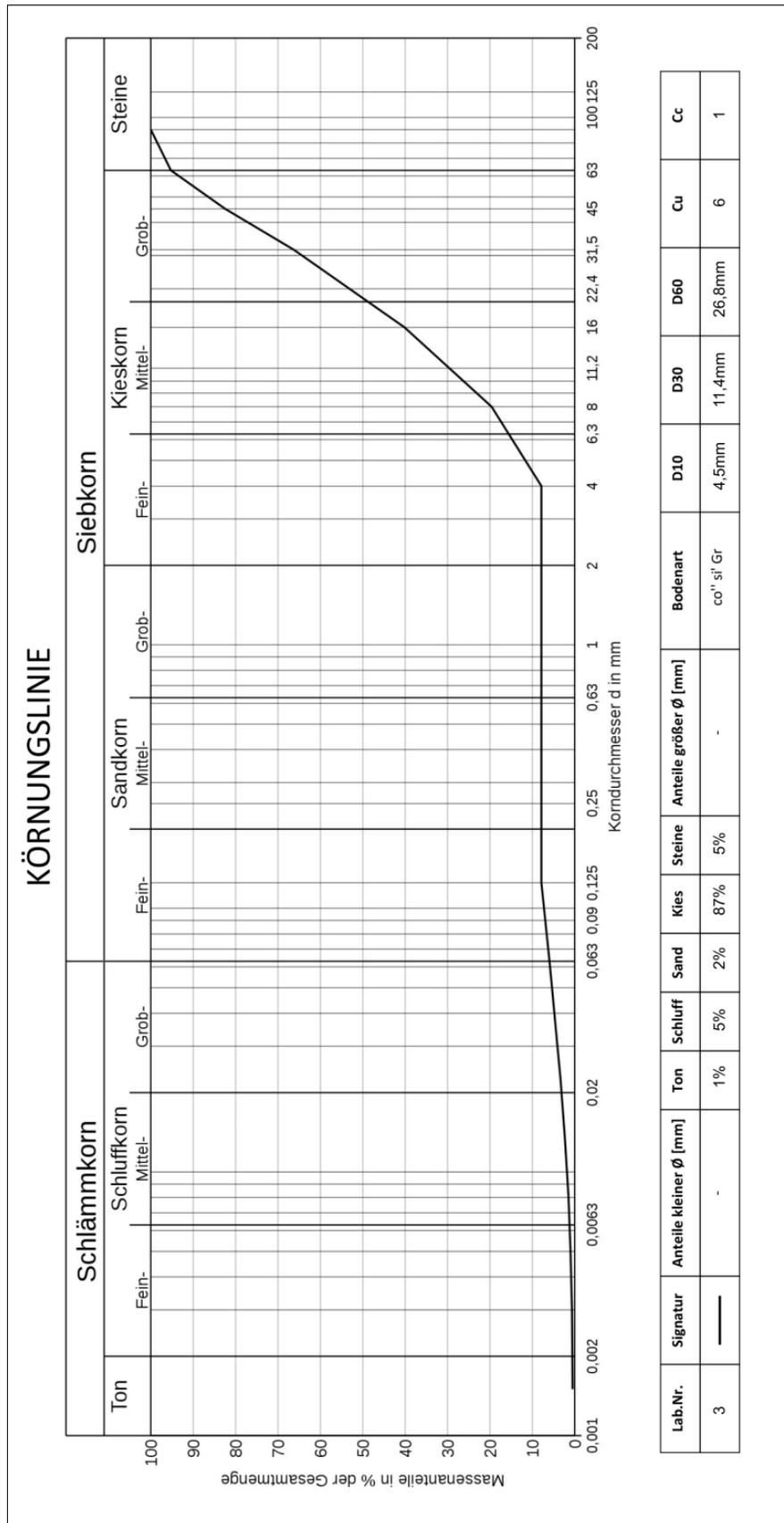
Nr. 3

<u>Bodenart:</u>	co“ si‘ Gr
<u>Beschreibung:</u>	Murschotter mit Fehlkörnung (0,125 – 4 mm)
<u>Entnahme:</u>	gestört / künstlich erzeugt
<u>Entnahmeort:</u>	-

**Nachstehend sind für die Versuchsprobe 3 folgende
Anlagen beigelegt:**

- Anhang C1: Kornverteilungskurve nach B 4412:1974
- Anhang C2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k
- Anhang C3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Anhang C1: Kornverteilungskurve nach ÖNORM B 4412:1974



Anhang 13: Körnungslinie der Versuchsprobe 3 (nach ÖNORM B 4412:1974)

Anhang C2: Indirekte Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts k Verfahren nach Hazen (Kap. 3.2.1):

$$k = 0,0166 \cdot d_{10}^2 = 0,0166 \cdot 4,5^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 4,5 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 6 > 5$.

Verfahren nach Zieschang (Kap. 3.2.2):

$$k = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \Theta) = \text{ungültig} \cdot 4,5^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot \Theta) = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 4,5 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 6 > 5$.

Verfahren nach Beyer (Kap. 3.2.3):

$$k = C \cdot d_{10}^2 = \text{ungültig} \cdot 4,5^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{10} = 4,5 \text{ mm}$

Die Proportionalitätskonstante C kann weder tabellarisch nach Tab. 8 noch grafisch nach Abb. 20 ausgelesen werden, weil $d_{10} = 4,5 \text{ mm}$ nicht im geforderten Kornspektrum von $0,06 \leq d_{10} \leq 0,6 \text{ mm}$ liegt.

Verfahren nach Seiler (Kap. 3.2.5):

$$k = \kappa \cdot d_w^2 = 192 \cdot 0,45^2 = 39 \text{ cm/s} \cong 3,9 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$$

für: $C_u = 6 \leq 17$

gilt: $d_w \cong d_{10} = 0,45 \text{ cm}$

$$\kappa = 190 \text{ (nach Tab. 13)}$$

Gültigkeitsbereich von $5 \leq C_u \leq 100$ eingehalten.

Verfahren nach Seelheim (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,00357 \cdot d_{50}^2 = 0,00357 \cdot 20,5^2 = \text{ungültig}$$

mit: $d_{50} = 20,5 \text{ mm}$

Anwendungsbereich nicht eingehalten, da $C_u = 6 > 5$.

Verfahren nach Konzeny-Köhler (Kap. 3.2.4):

$$k = C \cdot d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot d_w^2$$

$$\text{mit: } d_w = \frac{\sum \Delta G_i}{\sum \frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i} = \frac{100}{2069,75} = 0,05 \text{ mm}$$

Anhang 14: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Konzeny-Köhler (VP3)

Korndurchmesser [mm]	1/d _i [mm ⁻¹]	ΔG _i [%]	(1/d _i) • ΔG _i
90			
63	0,01	5	0,05
45	0,02	13	0,26
31,5	0,03	16	0,48
16	0,05	26	1,30
8	0,09	20	1,80
4	0,19	12	2,28
0,125	4,13	0	0,00
0,063	11,94	2	23,88
0,002	257,94	5	1289,70
0,001	750,00	1	750,00
		Σ = 100	Σ = 2069,75

Rauigkeitsgrad nach Tab. 10: rundlicher Flusssand → r = 1

Zähigkeit des Wassers: Vergleichstemperatur bei 10°C → τ = 1

$$k = \frac{1}{1} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot 0,05^2 = 1,01 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^3}{1+e}$$

Versuch 3.1 – 3.3 (lockerste Lagerung): e = 0,46 → k = 6,7 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 3.4 – 3.5 (eher lockere Lagerung): e = 0,39 → k = 4,3 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 3.6 – 3.7 (eher dichte Lagerung): e = 0,34 → k = 3,0 • 10⁻⁶ m/s

Versuch 3.8 – 3.10 (dichteste Lagerung): e = 0,29 → k = 1,9 • 10⁻⁶ m/s

Verfahren nach Sichardt (Kap. 3.2.6):

$$k = 0,006 \cdot d_m^2$$

$$\text{mit: } d_m = \frac{1}{100} \cdot \sum \frac{d_{m,i}}{G_i} = \frac{23,13}{100} = 0,23 \text{ mm}$$

Anhang 15: Tabellarische Auflistung der Rechenschritte nach Sichardt (VP3)

Korndurchmesser [mm]	$d_{m,i}$ [mm]	G [%]	$d_{m,i}/G$
90			
63	74,90	5	14,98
45	52,99	13	4,08
31,5	37,45	16	2,34
16	22,00	26	0,85
8	11,08	20	0,55
4	5,54	12	0,46
0,125	0,34	0	0,00
0,063	0,09	2	0,05
0,002	0,01	5	0,00
0,001	0,00	1	0,00
		$\Sigma = 100$	$\Sigma = 23,31$

$$k = 0,006 \cdot 0,23^2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Verfahren nach Bialas et al. (Kap. 3.2.7):

$$k = 0,0036 \cdot d_{20}^{2,3} = 0,0036 \cdot 8,1^{2,3} = 4,4 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$\text{mit: } d_{20} = 8,1 \text{ mm}$$

Anhang C3: Indirekte Ermittlung der Suffosionsstabilität

Einfaches Verfahren (Kap. 4.3.1):

Unstetiger Körnungsverlauf (Fehlkörnung im Spektrum 0,125 – 4 mm)

→ einfaches Verfahren darf nicht angewendet werden.

Verfahren nach Ziems (Kap. 4.3.2):

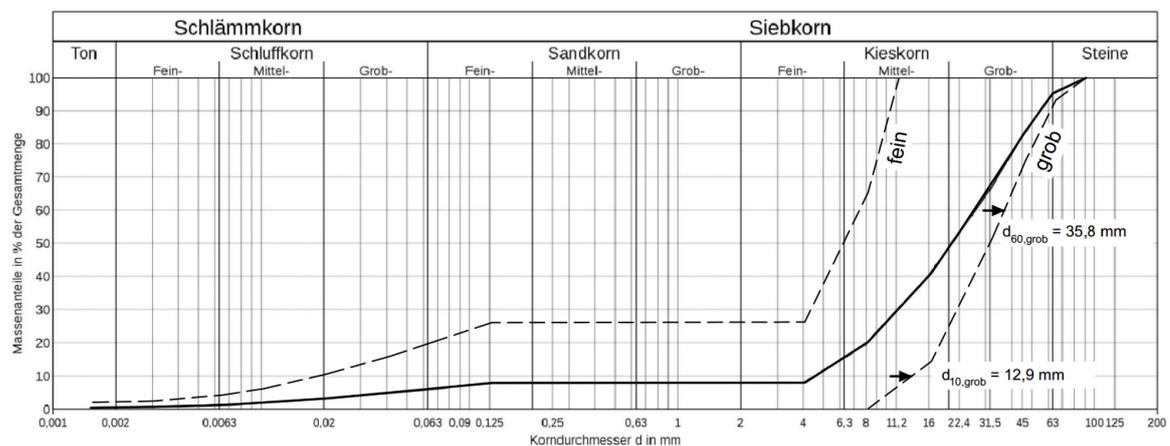
Unstetiger Körnungsverlauf (Fehlkörnung im Spektrum 0,125 – 4 mm)

→ Verfahren nach Ziems darf nicht angewendet werden.

Verfahren nach Kenney und Lau (Kap. 4.3.3):

Das Verfahren nach Kenney und Lau bezieht sich bei der Suffosionsbeurteilung nicht auf den gesamten Körnungsverlauf sondern nur auf die feinsten 20 bzw. 30 Massen-%. Die Ermittlung des maßgebenden feineren Anteils erfolgt durch die Aufspaltung der Körnungslinie bei 30 Massen-% (Anhang 16). Anschließend wird für den groben Körnungsverlauf die Ungleichförmigkeit $C_{u,grob}$ bestimmt. Beläuft sich die Ungleichförmigkeit des groben Kornspektrums auf $C_{u,grob} \leq 3$ sind die feinsten 30 Gewichts-% maßgebend (Anhang 18). Sofern die Ungleichförmigkeit mit $C_{u,grob} > 3$ ermittelt wird, sind die feinsten 20 Massen-% für die weitere Berechnung entscheidend.

Relevanter Massenprozentsatz an feinerer Körnung:



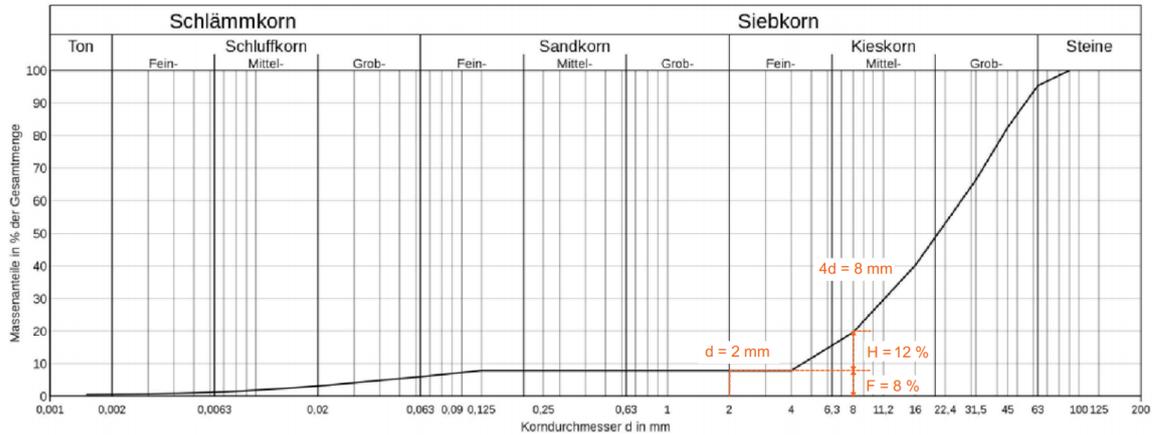
Anhang 16: Auftrennen der Körnungslinie bei 30 Massen-% (VP3)

$$C_{u,grob} = \frac{d_{60,grob}}{d_{10,grob}} = \frac{35,8}{12,9} = 2,8$$

$C_{u,grob} = 2,8 \leq 3 \rightarrow$ feinsten 30 Massen-% maßgebend

Umwandlung der Körnungslinie in eine H(F)-Formkurve:

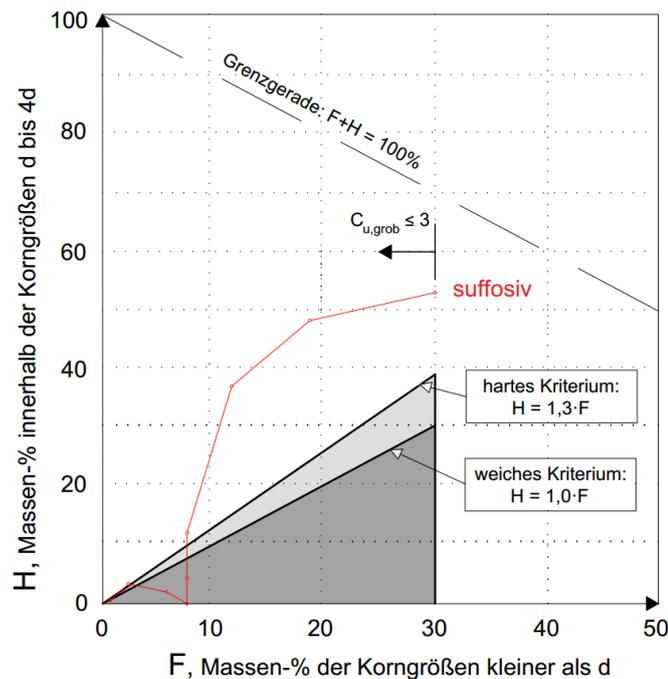
Dabei wird für mehrere Korndurchmesser d der feineren Fraktion ($d_0 \leq d \leq d_{30}$) der Siebdurchgang F , sowie der Massendurchgang H zwischen den Korngrößen d und dem dazugehörigen 4-fachen Korndurchmesser $4d$ ermittelt. Die Herangehensweise wird nachfolgend für die Korngröße $d = 2 \text{ mm}$ beispielhaft vorgezeigt (Anhang 17).



Anhang 17: Ermittlung der Werteparameter $H + F$ für die Erstellung der Formkurve (VP3)

- mit: $d = 2 \text{ mm} \rightarrow F = 8 \%$ (Massen-% der Korngrößen $\leq d$)
- $4d = 8 \text{ mm} \rightarrow H = 12 \%$ (Massen-% der Korngrößen d bis $4d$)

Führt man dieses Prozedere für mehrere Korndurchmesser d ($d_0 \leq d \leq d_{30}$) durch, kann die Formkurve in einem H(F)-Diagramm erstellt werden (Anhang 18).



Anhang 18: H(F)-Formkurve zur Überprüfung der Suffosionsstabilität nach Kenney und Lau (VP3)

Die Formkurve (rot gekennzeichnet) schneidet die Grenzgerade des weichen Kriteriums (dunkelgrau hinterlegte Rechteckfläche), weshalb die Versuchsprobe 3 nach dem Verfahren von Kenney und Lau als suffosiv zu bewerten ist.

Verfahren nach Burenkova (Kap. 4.3.4):

Nach Burenkova gilt der Boden als suffosionsstabil sofern gilt:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1$$

$$h' = d_{90} / d_{60} = 55,0 \text{ mm} / 26,8 \text{ mm} = 2,1 \text{ [-]}$$

$$h'' = d_{90} / d_{15} = 55,0 \text{ mm} / 6,0 \text{ mm} = 9,2 \text{ [-]}$$

Anwendungsbereich von $1 \leq h' \leq 5$ bzw. $3 \leq h'' \leq 130$ ist erfüllt → Verfahren nach Kenney und Lau darf angewendet werden.

eingesetzt ergibt:

$$0,76 \cdot \lg(9,2) + 1 < 2,1 < 1,86 \cdot \lg(9,2) + 1$$

$$1,73 < 2,1 < 2,8 \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Die Versuchsprobe 3 gilt nach dem Verfahren von Burenkova als suffosionsstabil.