

## 1. Einleitung

Ein tragfähiger Baugrund ist seit jeher die Grundvoraussetzung für die Errichtung standsicherer Gebäude und Bauwerke. Die natürlichen Eigenschaften des Bodens sowie die Witterungseinflüsse von Millionen von Jahren haben die unterschiedlichsten Bodenarten hervorgebracht.

Aufgrund seiner Bedeutung für die Standsicherheit, Tragfähigkeit sowie die Statik von Bauwerken beschäftigen sich diverse Ingenieurwissenschaften ausführlich mit der Untersuchung, Klassifizierung und Berechnung der Bodenparameter, um Erdbauwerke, Gründungen, Fundamente, Dämme und Gebäude so zu bemessen, dass sie den gestellten Anforderungen genügen. Die oberste Prämisse ist dabei stets die sichere Ableitung der auf die Bauwerke einwirkenden Lasten in den Baugrund. In der Bodenmechanik gilt es nachzuweisen, dass das entworfene Bauwerk die Anforderungen im Hinblick auf Standsicherheit, Setzungsverhalten, Kippsicherheit und Grundbruchsicherheit in geeignetem Maße erfüllt.

Um die Standsicherheit zu gewährleisten und Setzungen schon im Vorfeld zu minimieren, ist es notwendig, die Standfestigkeit des jeweiligen Baugrunds zu verbessern. Dies kann auf unterschiedlichste Art und Weise geschehen. Die Wahl der optimalen Methode hängt nicht zuletzt von der anstehenden Bodenart und ihren jeweiligen charakteristischen Eigenschaften ab.

Die Palette der zur Verfügung stehenden Verdichtungsverfahren ist groß. Das wohl einfachste sowie billigste Mittel der Baugrundverbesserung ist die Verdichtung mit herkömmlichen Verdichtungsgeräten, beispielsweise mit Rüttelplatten, Stampfern, Glattwalzen und Schafffußwalzen. Ebenfalls leicht praktikabel ist das Verfahren des Bodenaustauschs, bei dem das nicht tragfähige Erdmaterial ausgehoben, abgefahren und durch neues, besser verdichtbares Einbaumaterial ersetzt wird. Eine weitere Möglichkeit, die Standfestigkeit des Bodens zu erhöhen, ist das Bewehren. Dabei kann man Verfahren mit verdrängender Wirkung (Umgebungsverdichtung) und Verfahren ohne verdrängende Wirkung unterscheiden. Beispielsweise hat jedes Rüttelstopfverfahren eine verdrängende Wirkung. Ähnliche Verfahren sind die Sandverdichtungspfahlmethode, Kalk/Zement-Stabilisierungssäulen oder aber Verdichtungsinjektionen. Weitere Spezialverfahren sind das MIP-Verfahren, das FMI-Verfahren, die Vereisung sowie das Düsenstrahlverfahren.

All diese bautechnischen Verfahren unterscheiden sich wesentlich in ihrer Wirkung, ihrer Einsatzmöglichkeit sowie ihrem Preis. Technische Begebenheiten und wirtschaftliche Interessen sind hierbei streng miteinander verbunden. Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Proctordichte, Korngefüge und Wassergehalt.

## 2. Problemstellung der Diplomarbeit

### 2.1. Stand des Wissens

Es ist allgemein bekannt, dass die optimale Verdichtung des Bodens von den unterschiedlichsten Faktoren abhängt. Der Proctorversuch beschäftigt sich ausführlich mit dem Zusammenhang des Wassergehalts und der erreichten maximalen Verdichtung während eines standardisierten Versuchs. Anhand der Ergebnisse können Erdstoffe schon vor dem Einbau auf ihre qualitative Eignung als Verfüllmaterial hin untersucht werden. Mit der Einführung des modifizierten Proctorversuchs, der die erzielten Verdichtungen neben der Abhängigkeit vom Wassergehalt auch abhängig von der Verdichtungsarbeit macht, wurde der bauliche Anspruch an die verwendeten Erdstoffe immer größer. Neben den im Proctorversuch beschriebenen Zusammenhängen spielen viele weitere Einflussfaktoren eine Rolle. So wird beispielsweise bei dem Bau von Straßen, Aufschüttungen und Hinterfüllungen immer stärker auf das Korngefüge der verwendeten Materialien geachtet, so zum Beispiel auch bei einem aktuellen Bauvorhaben der LauBau GmbH Torgau. Im Folgenden ist ein Kurztex aus dem Leistungsverzeichnis zitiert:

„Schottertragschicht BKL III herstellen, Einbaudicke = 25 cm, Verformungsmodul EV2 min. 180 MN/m<sup>2</sup>, Ungleichförmigkeitszahl U mindestens 13 [...]“

Die qualitative Bewertung von Erdstoffen anhand ihrer Ungleichförmigkeitszahl U ist nicht neu, jedoch sind diese Zusammenhänge bei Weitem nicht so umfangreich quantitativ belegt, wie es beispielsweise die Abhängigkeiten der Proctorwerte vom Wassergehalt sind. Hier setzt diese Diplomarbeit an.

## 2.2. Zielsetzung der Diplomarbeit

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht im Allgemeinen den Zusammenhang der Bodenkennwerte mit der erreichten Verdichtung des Bodens und im Speziellen die Wechselwirkungen von Wassergehalt, Korngefüge und -staffelung, Verdichtungsarbeit und Proctordichte bei nichtbindigen Böden. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der Erstellung von grafischen Analysen der Zusammenhänge und deren Auswertung und Beurteilung anhand von Regressionsanalysen. Die Grundlage dafür bilden die Daten der Prüfzeugnisse von über 50 zertifizierten Kieswerken.

Ziel ist es, einen definierten Einfluss der Bodenkennwerte auf die Proctordichte herzuleiten und qualitativ zu belegen. Hierbei wird ebenfalls auf die auftretenden Probleme und Ungenauigkeiten bei der Auswahl sowie Auswertung der Ergebnisse eingegangen.

## 3. Gliederung und Aufgaben der Bodenmechanik

### 3.1. Einordnung der Bodenmechanik

#### 3.1.1. Allgemeine Definition

Die Bodenmechanik ist die Lehre von den Zusammenhängen der physikalischen Eigenschaften des Bodens und seiner Eignung als Baugrund.<sup>[1]</sup> In seiner Vorlesung zum Thema Bodenmechanik charakterisiert Prof. Dr.-Ing. H. FRANK sie als „Versuch zur Erklärung, welche Wechselwirkung zwischen dem ungleichmäßig zusammengesetzten Baugrund (einschließlich des in ihm vorhandenen Wassers) und dem zu errichtenden Bauwerk entsteht. Ziel der bodenmechanischen Labor- und Feldversuche ist es, Bodenkennwerte für die grundbaustatische Berechnung von Bauwerken anzugeben, um ein wirtschaftliches und sicheres Bauen zu ermöglichen.“<sup>[2]</sup>

Die Bodenmechanik wird ebenfalls sehr oft als interdisziplinäre Wissenschaft betrachtet, die ein Teilgebiet der Geotechnik darstellt. Abbildung 01 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Geotechnik und deren spezielle Aufgaben.

---

<sup>[1]</sup> Vgl. FRANK, Skript Boden.pdf, S.4

<sup>[2]</sup> FRANK, Skript Boden.pdf, S.4

<sup>[3]</sup> FRANK, Skript Boden.pdf, S.4

### 3.1.2. Bodenmechanische Normen und Regelwerke

Der Bodenmechanik liegen diverse Normen, DINs und Gesetze zu Grunde. Es seien mit den folgenden nur einige, grundlegende genannt.<sup>[4]</sup>

- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 1054 | Zulässige Belastung des Baugrunds
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 4019 | Setzungsberechnung bei lotrecht, mittiger Belastung
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18123 | Bestimmung der Korngrößenverteilung
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18124 | Bestimmung der Korndichte
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18125/1 | Bestimmung der Dichte des Bodens mit Laborversuchen
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18125/2 | Bestimmung der Dichte des Bodens mit Feldversuchen
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18126 | Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18127 | Proctorversuch
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18134 | Plattendruckversuch

Der DIN 18127 liegen noch weitere DINs zu Grunde.<sup>[5]</sup>

- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 4187-2 | Siebböden – Lochplatten für Prüfsiebe, Quadratlochung
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18121-1 | Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN 18196 | Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- <sup>35</sup><sub>17</sub> DIN ISO 3310-2 | Analysesiebe – Anforderungen und Prüfung, Analysesiebe mit Lochblechen

---

<sup>[4]</sup> <http://bauingenieurseite.de/bodenmechanik/normen.html>

<sup>[5]</sup> DIN 18127, S.2, Anhang 1

## **3.2. Grundlagen der Bodenmechanik**

### **3.2.1. Einteilung der Gesteine im Boden**

Anhand der DIN 1054 unterscheidet man im Erdbau drei Hauptbaugrundarten: Felsgestein, gewachsenen Boden und geschütteten Boden. Diese drei Typen unterscheiden sich wesentlich in ihrer Zusammensetzung sowie in ihren Eigenschaften.

#### **3.2.1.1. Fels**

Fels ist der Überbegriff für alle Gesteine, die in einem festen Verbund auftreten. Seine Tragfähigkeit und Stabilität ist im un- bis wenig verwitterten Zustand sehr gut bis gut. Im herkömmlichen Baubetrieb ist Fels selten anzutreffen.

#### **3.2.1.2. Lockergesteine**

Lockergesteine werden unterteilt in gewachsenen und geschütteten Boden, wobei gewachsener Boden auf natürliche Weise durch die erdgeschichtliche Entwicklung entstanden ist. Er ist somit bereits abgeklungen und zeichnet sich durch geringe nachträgliche Setzungen aus, weil er bereits konsolidiert ist. Daraus resultiert seine im Allgemeinen hohe Dichte.

Im Gegensatz zum gewachsenen Boden wurde geschütteter Boden in seiner Geschichte schon zum Teil auch mehrfach gelöst und zwischengelagert. Seine Dichte ist deshalb zumeist niedriger als die vergleichbarer gewachsener Böden. Deswegen ist es notwendig, geschütteten Boden hinreichend zu stabilisieren und/oder zu verdichten.

### **3.2.2. Einteilung von Böden nach Kornform**

Es sind dabei nach bautechnischen und bodenmechanischen Eignungen folgende Hauptgruppen zu unterscheiden:

#### **3.2.2.1. Nichtbindige Böden**

Nichtbindige Böden, oder auch rollige Böden, besitzen einen Korndurchmesser von mehr als 0,063 mm. Ebenfalls zu den nichtbindigen Böden zählen alle Böden mit einem Anteil der Korngrößen unter 0,063 mm von bis zu 15% der Gewichtsmasse. Typisch für diese Bodenart sind die fehlenden inneren Kräfte zwischen den Körnern, wodurch nichtbindige Böden bei Schüttungen ihren natürlichen Böschungswinkel von in der Regel 45° ausprägen. Die Körner dieser Böden haben eine runde Form. Desweiteren besitzen nichtbindige Böden keinerlei Kohäsions- oder Kapillarkräfte. Zu den nichtbindigen Böden zählen alle Arten von Sanden und Kiesen.

#### **3.2.2.2. Bindige Böden**

Zu den bindigen Böden gehören alle Bodenarten mit einem Korndurchmesser von unter 0,063 mm. Im Gegensatz zu nichtbindigen Böden bestehen bindige Böden nicht aus runden Körnern, sondern aus blättchenförmigen Gebilden. Aufgrund von Haftungskräften der Teilchen kommt es zur Kohäsion des Erdstoffes. Die Plättchen bilden ein flocken- oder auch wabenartiges Gebilde und haften so selbst im trockenen Zustand aneinander.

### **3.2.3. Auswertungsbereich dieser Diplomarbeit**

Die vorliegende Diplomarbeit basiert auf den Prüfzeugnissen von über 50 zertifizierten Kieswerken. Für die Auswertung der Prüfzeugnisse werden nur nichtbindige Böden in den Körnungsgruppen 0/4, 0/8, 0/32 und 0/45 untersucht, wobei nur für die Bereiche 0/8, 0/32 und 0/45 ausreichend statistisch verwertbare Datensätze vorliegen. Die Betrachtung des 0/4er Körnungsbereiches erfolgt rein qualitativ. Es werden dabei zunächst alle Körnungsgruppen separat betrachtet. Abschließend erfolgen eine generelle Einordnung der Werte sowie ein Vergleich der Daten und eine Untersuchung der statistischen Verwertbarkeit anhand von Regressionsanalysen.

### 3.2.4. Einteilung von Böden nach Korngröße

Die DIN 4022 unterteilt Böden anhand ihrer Korngröße in Grob- und Feinkornbereiche. Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die Einordnung und Benennung der unterschiedlichen Korngrößen.

Bereich / Benennung		Kurzzeichen	Korngrößenbereich [mm]
Grobkornbereich (Siebkorn)	Blöcke	Y	über 200
	Steine	X	über 63 bis 200
	Kies	G	über 2 bis 63
	Grobkies	gG	über 20 bis 63
	Mittelkies	mG	über 6,3 bis 20
	Feinkies	fG	über 2,0 bis 6,3
	Sand	S	über 0,06 bis 2,0
Grobsand	gS	über 0,6 bis 2,0	
Mittelsand	mS	über 0,2 bis 0,6	
Feinsand	fS	über 0,06 bis 0,2	
Feinkornbereich (Schlammkorn)	Schluff	U	über 0,002 bis 0,06
	Grobschluff	gU	über 0,02 bis 0,06
	Mittelschluff	mU	über 0,006 bis 0,02
	Feinschluff	fU	über 0,002 bis 0,006
	Ton (Feinstes)	T	unter 0,002

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung besitzen die unterschiedlichen Korngrößenbereiche auch unterschiedliche Eigenschaften im Bezug auf Hohlraumgehalt und Verdichtbarkeit. Um die Unterschiede zwischen den Bestandteilen der Erdstoffe zu analysieren, ist es hilfreich, die anstehenden Sieblinien zu untersuchen.

[6] FRANK, Skript Boden.pdf, S.10

## 4. Sieblinien und ihre Bedeutung für die Einteilung von Böden

### 4.1. Einführung und Bedeutung von Sieblinien

Anhand von Sieblinien (auch Körnungslinien genannt) können die Körnungen verschiedenster Böden, anhand von Siebdurchgängen bei unterschiedlichen Maschenweiten, miteinander verglichen werden. Dabei werden in einer Siebliniengrafik die sich logarithmisch steigenden Maschenweiten auf der horizontalen Achse angetragen und die kumulierten Siebdurchgänge auf der vertikalen.

Entscheidenden Anteil an der Erforschung der optimalen Kornzusammensetzung von Böden haben FULLER und THOMPSON mit ihrer Beschreibung der Idealsieblinie Anfang des 20. Jhd.<sup>[7]</sup>. Heutzutage spielen Sieblinien in den unterschiedlichsten Bereichen eine entscheidende Rolle. Unter anderem in:<sup>[8]</sup>

<sup>35</sup>/<sub>17</sub> der Bauwirtschaft während der Herstellung von Mörtel und Beton

<sup>35</sup>/<sub>17</sub> der Bodenkunde, zur Bestimmung der Bodenart nach ihrer Korngröße

<sup>35</sup>/<sub>17</sub> der Hydrogeologie, zur Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit eines Bodens

Im Nachfolgenden sind den unterschiedlichsten Bodenarten ihre charakteristischen Sieblinien zugeordnet:

---

<sup>[7]</sup> VGL. <http://de.wikipedia.org/wiki/Sieblinie>

<sup>[8]</sup> VGL. <http://de.wikipedia.org/wiki/Sieblinie>

<sup>[9]</sup> FRANK, Skript Boden.pdf, S.39

iger Ton  
ger Schluff  
m  
luff  
chiebelem  
d  
sand  
iger Kies  
s

## 4.2. Charakterisierung der Sieblinienparameter U und C

Für die Beurteilung der Zusammensetzung von Böden werden Sieblinien herangezogen. Sie geben Auskunft über die exakte Verteilung der Korngrößen in der anstehenden Bodenart und damit auch über die zu erwartenden Eigenschaften des Bodens im Hinblick auf Frostempfindlichkeit, Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit, Verdichtbarkeit und seine Eignung als Filtermaterial.

Um einen Bodentyp noch exakter zu katalogisieren, werden die aus der Sieblinie erhaltenen Daten zur Kornverteilung in zwei Parametergrößen überführt. Zum einen in die Ungleichförmigkeitszahl U (auch  $C_u$  genannt) und zum anderen in die Krümmungszahl C (auch  $C_c$  genannt). Beide Parameter sind direkt abhängig von den 10%, 30% und 60% Quantilen der Korngrößen des vorliegenden Bodens. Diese Quantile entsprechen den statistischen Korngrößen bei 10%, 30% und 60% Massenanteil.

Zur Berechnung von U und C werden folgende Formeln herangezogen:

### Formel 01: Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl

### Formel 02: Berechnung der Krümmungszahl

Anhand dieser Parameter kann man den Erdstoff weiter unterteilen und ihn in die folgende Tabelle einordnen:

Benennung	Kurzzeichen	U	C
enggestuft	E	< 6	beliebig
weitgestuft	W	≥ 6	1 bis 3
intermittierend	I	≥ 6	< 1 oder ≥ 3

Tabelle 0: Benennung von Böden anhand von U und  $C_{[10]}$

---

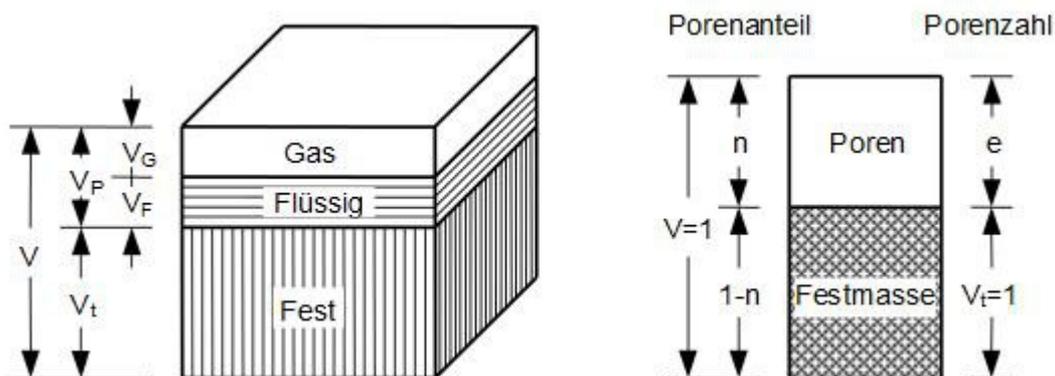
[10] DRINKGERN, Kennwerte für Kies, Sand und Splitt, S.6

## 5.. Bodenmechanische Grundwerte

### 5.1. Das Drei-Stoff-System

#### 5.1.1. Porenraum, Porenzahl und Sättigungszahl

Das Drei-Stoff-System Boden besteht aus den drei Hauptbestandteilen: Feststoff, Wasser und Luft. Der Feststoff ist je nach Art und Beschaffenheit mit unterschiedlichen vielen Poren durchsetzt, die wahlweise mit Luft oder Wasser gefüllt sind. Daraus ergibt sich die folgende schematische Darstellung des Bodens im Allgemeinen:



Der Porenanteil  $N$  beschreibt, wie viel Prozent des Bodens bezogen auf das Gesamtvolumen, aus Poren bestehen. Diese Poren können entsprechend der Wassersättigung jeweils mit Luft oder Wasser gefüllt sein. Dabei wird der Anteil der luftgefüllten Poren  $N_a$  und der Anteil der Wassergefüllten Poren als  $N_w$  bezeichnet. Daraus ergeben sich folgende Beziehungen:

#### Formel 03: Berechnung des Porenanteils

#### Formel 04: Berechnung des Gesamtporenanteils

[11] FRANK, Skript Boden.pdf, S.47

Die Porenzahl  $e$  beschreibt ebenfalls den Porenanteil in Prozent, jedoch bezogen auf das Volumen des Feststoffes. Daraus ergeben sich für die Umrechnung von  $e$  in  $N$  und umgekehrt folgende Zusammenhänge:

**Formel 05: Berechnung des Porenanteils aus der Porenzahl**

**Formel 06: Berechnung der Porenzahl aus dem Porenanteil**

Das Verhältnis der mit wassergefüllten Poren zu der Gesamtporenzahl wird als Sättigungszahl oder Sättigungsrate  $S_r$  bezeichnet. Sie gibt an wie viel Prozent der Poren mit Wasser gefüllt sind. Zur Berechnung der Sättigungszahl kann folgende Formel herangezogen werden:

**Formel 07: Berechnung der Sättigungszahl**

Die Sättigungszahl ist ein Indikator dafür, inwieweit sich ein Erdstoff noch zusammendrücken lässt. Böden, die einen geringeren Anteil an luftgefüllten Poren aufweisen, sind tragfähiger und setzungunempfindlicher als vergleichbare Böden mit einem höheren Anteil an Poren. Ziel jeder herkömmlichen Verdichtungsmethode ist es, den Luftporenanteil so weit wie möglich zu verringern. Die wassergefüllten Poren zusammenzupressen, ist ohne Spezialverfahren zur Bodenverdichtung nicht ohne Weiteres möglich.

Die folgende Tabelle ordnet einer Auswahl von Böden ihre jeweils charakteristischen Porenzahlen und Porenanteile zu:



Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass alle nichtbindigen Böden im Durchschnitt geringere Porenanteile haben als bindige Böden. Diese Tatsache liegt in der Struktur der bindigen und nicht bindigen Böden begründet. Ebenfalls ersichtlich wird, dass ein ungleichförmiger Sand weniger Poren aufweist als ein gleichförmiger. Während bei einem gleichförmigen Sand die Körner eine ähnliche Größe und Beschaffenheit aufweisen und somit durch ihre Lagerung und Form unweigerlich Hohlräume zwischen ihnen entstehen, lagern sich bei ungleichförmigen Sanden große und kleine Sandkörner nebeneinander ab. Die Hohlräume, die die großen Körner zwischen einander aufwerfen, werden sogleich von kleineren geschlossen. Dadurch kommt es zu einer Verringerung des Porenanteils und somit zu einer Erhöhung der Dichte. In den nachfolgenden Kapiteln wird diese Arbeit versuchen, diese Beobachtung anhand statistischer Daten zu belegen und qualitativ einzuschätzen.

---

[12] FRANK, Skript Boden.pdf, S.48

### 5.1.2. Dichteberechnungen bei Böden

Die allgemeine Dichte (Feuchtdichte) eines Stoffes lässt sich mit folgender Formel berechnen. Hierbei wird die feuchte Masse des Stoffes betrachtet:

#### **Formel 08: Berechnung der Dichte**

Für die Trockendichte ergibt sich folgende Berechnung:

#### **Formel 09: Berechnung der Trockendichte**

Für die Ermittlung der Trockenmassen  $m_d$  werden die Erdstoffe im Ofen bei 105° Celsius getrocknet und anschließend gewogen. Die Differenz der Feuchtmasse  $m$  zur Trockenmasse  $m_d$  ergibt den absoluten Wassergehalt  $w$ .

Für die Umrechnung von Feuchtdichten, Trockendichten und Wassergehalt ergeben sich folgende Beziehungen:

#### **Formel 10: Berechnung des Wassergehaltes**

#### **Formel 11: Ermittlung der Trockenmasse**

Daraus lässt sich nun der Zusammenhang zwischen der Trockenmasse und der Dichte ableiten:

### Formel 12: Ermittlung der Trockendichte

### Formel 13: Berechnung der Dichte aus der Trockendichte

Die exakte Bestimmung der Korndichte eines Stoffes erfolgt durch die Messung mit einem Kapillarpiknometer nach DIN 18124. Die Dichte lässt sich mit Hilfe der Sättigungszahl, dem Wassergehalt, der Porenzahl und der Korndichte bestimmen.

#### 5.1.3. Einfluss des Wassergehaltes und dessen Ermittlung

Der Wassergehalt eines Erdstoffes wird anhand der DIN 18121/1 im Labor mit Hilfe der Ofentrocknung bei 105° bestimmt. Der Erdstoff wird dabei solange getrocknet, bis sich die Masse nicht weiter reduziert. Bei nicht bindigen Böden stellt sich eine Massekonstanz bei ca. 6 Stunden ein. Bindige Böden hingegen benötigen annähernd die doppelte Zeit. Auf der Baustelle lassen sich die Wassergehalte von Bodenproben in kürzester Zeit durch das Calciumcarbidverfahren ermitteln. Jedoch sind die Prüfmethode im Feld nicht so exakt wie die Laborversuche. Anhand der folgenden Tabelle werden den Bodenarten ihre charakteristischen Wassergehaltsgrenzwerte zu gewiesen:

Bodenart	Wassergehalt [%]
Sande und Kiese	2 bis 10
Geschiebemergel	10 bis 20
Löß	20 bis 30
sandiger Schluff	20 bis 40
Ton	20 bis 60
Organische Böden	50 bis 800

---

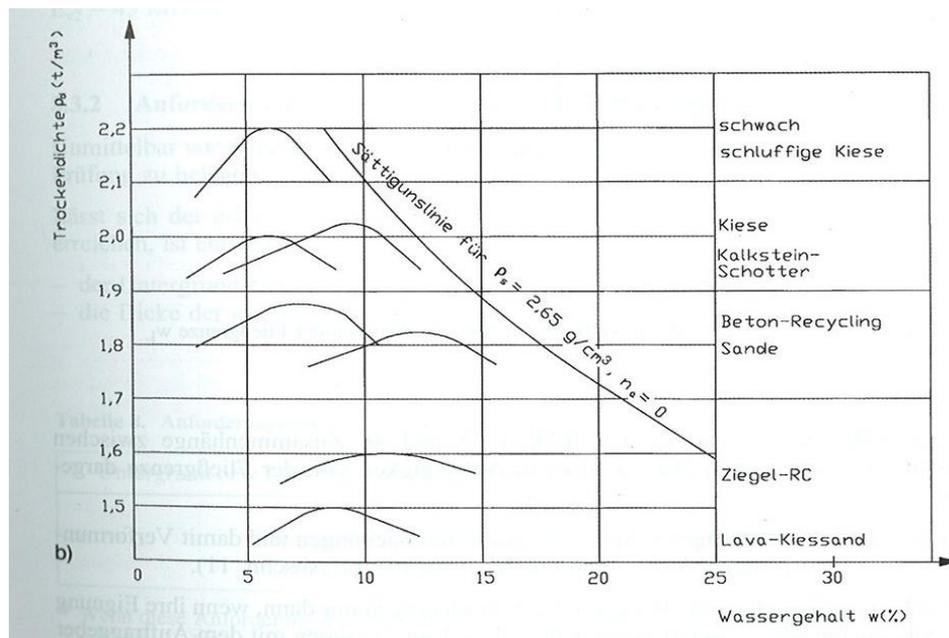
[13] FRANK, Skript Boden.pdf, S.50

Aus den Messungen der Masse vor und nach der Trocknung ist der Wassergehalt anhand folgender Formel zu ermitteln:

**Formel 14: Berechnung des Wassergehaltes**

Der Wassergehalt spielt bei der Beurteilung der Eigenschaften von Böden eine zentrale Rolle. Er eignet sich zur Einteilung des Bodens, zur Berechnung der Konsistenz, zur Abschätzung der Zusammendrückbarkeit von Erdstoffen sowie zur Beurteilung des maximal möglichen Verdichtungserfolgs von Böden anhand der charakteristischen Proctorwerte eines jeden Erdstoffes.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Verläufe der charakteristischen Proctorkurven für die unterschiedlichsten Erdstoffe angegeben:



**Abbildung 05: Wassergehalte unterschiedlicher nichtbindiger Böden<sub>[14]</sub>**

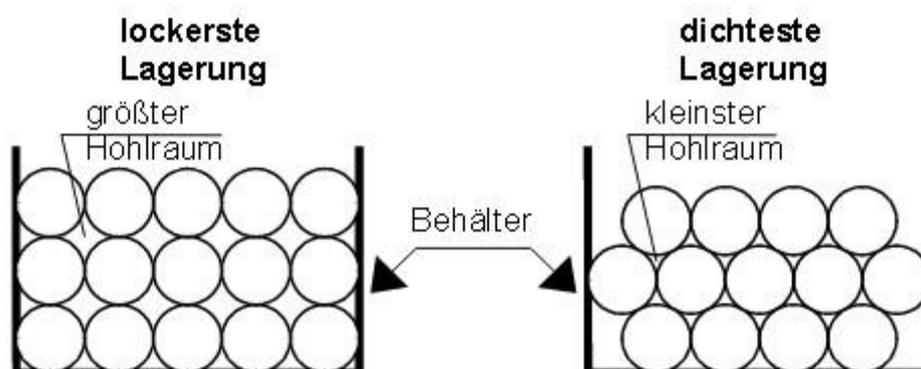


## 5.2. Dichteste und lockerste Lagerung nichtbindiger Böden

Die Lagerungsdichte von Böden gibt das Verhältnis des maximalen Porenanteils eines Bodens zum minimalen Porenanteil eines Bodens an. Die Lagerungsdichte  $D$  lässt sich dabei nach folgender Formel bestimmen:

### Formel 15: Berechnung der Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte kann durch Verdichtung des Bodens erhöht werden, da der Porenanteil bei der Verdichtung abnimmt. Jedoch besitzt ein anstehender Boden auch nach seiner Verdichtung nicht seine dichteste Lagerung. Um dennoch bestimmen zu können, welchen Einfluss die Verdichtung auf die Lagerungsdichte hatte, werden die lockerste und dichteste Lagerung im Labor als Vergleichswerte durch Versuche bestimmt. Die nachfolgende Abbildung stellt die lockerste und dichteste Lagerung als Schema dar:



Die Lagerungsdichte kann Aufschluss über die Verdichtbarkeit sowie über die Tragfähigkeit geben. So ist zum Beispiel in der DIN 1054 eine zulässige Ermittlung der Bodenpressung nur möglich, wenn eine Lagerungsdichte des Bodens von  $D \geq 0,3$  nachgewiesen wurde.<sup>[16]</sup>

[15] FRANK, Skript Boden.pdf, S.55

[16] VGL. FRANK, Skript Boden.pdf, S.55

Verwendet man für die Bestimmung der Lagerungsdichten die Porenzahl  $e$  anstelle des Porenanteils  $N$ , so erhält man die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  und die Verdichtungsfähigkeit  $I_F$ . Nachfolgend sind die Formeln zur Berechnung der bezogenen Lagerungsdichte und der Verdichtungsfähigkeit aufgeführt:

**Formel 16: Berechnung der bezogenen Lagerungsdichte**

**Formel 17: Berechnung der Verdichtungsfähigkeit**

Die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung des minimalen und maximalen Porenanteils ist in DIN 18126 ausführlich beschrieben. Die nachfolgende Tabelle gibt Aufschluss über die Bezeichnungen der unterschiedlichen Lagerungsdichten:

<b>D</b>	<b><math>I_D</math></b>	<b>Bezeichnung</b>
0 - 0,15	0,15	sehr locker
0,15 - 0,30	0,15 - 0,35	locker
0,30 - 0,50	0,35 - 0,65	mitteldicht
0,50 - 0,75	0,65 - 0,85	dicht
0,75 - 1,00	0,85 - 1,00	sehr dicht

---

[17] FRANK, Skript Boden.pdf, S.56

## 6. Der Proctorversuch

### 6.1. Allgemeine Beschreibung

Der Proctorversuch gibt Aufschlüsse darüber, welche Dichte ein Erdstoff mit vorgegebener Verdichtungsleistung und in Abhängigkeit des Wassergehalts maximal unter Laborbedingungen erreichen kann. In der Praxis wird der Proctorwert eines Erdstoffes für Kontroll- und Vergleichszwecke verwendet. Er ermöglicht es, die auf der Baustelle erreichten Dichten anhand der optimalen Vergleichswerte aus dem Labor zu bewerten. Der einfache Proctorversuch untersucht dabei die erzielten Dichten eines Erdstoffes in Abhängigkeit von den anliegenden Wassergehalten. Die maßgebliche Bezugsgröße bei all diesen Betrachtungen ist die Trockendichte des Erdstoffs.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird der Proctorwert als standardisierter Messwert für die Vergleichbarkeit der Resultate verwendet. Er ist in der DIN 18127 beschrieben und normiert. Durch die Einbeziehung des Überkorns werden seine Ergebnisse auch in den unterschiedlichen Korngruppen vergleichbar. Die sogenannte Überkornkorrektur ist im Abschnitt 6.4. näher beschrieben.

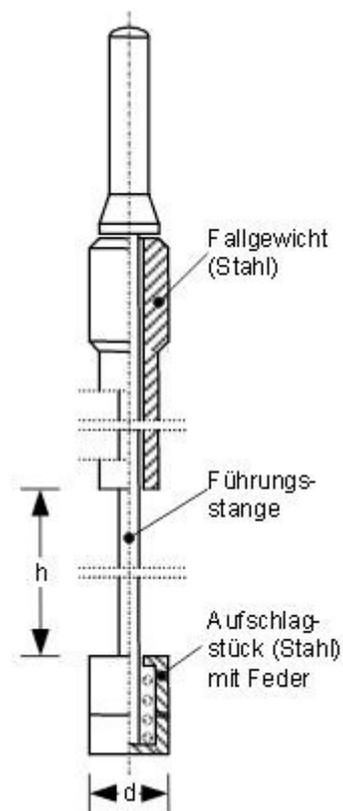
In der DIN wird der Proctorversuch wie folgt definiert: „Zweck des Proctorversuches ist es, die Trockendichte eines Bodens nach Verdichtung unter festgelegten Versuchsbedingungen als Funktion des Wassergehaltes festzustellen. Der Versuch dient der Abschätzung der auf Baustellen erreichbaren Dichte des Bodens und liefert eine Bezugsgröße für die Beurteilung der im Baugrund vorhandenen oder auf Baustellen erreichten Dichte des Bodens. Sein Ergebnis lässt auch erkennen, bei welchem Wassergehalt ein Boden sich günstig verdichten lässt, um bestimmte Trockendichten zu erreichen.“<sup>[18]</sup>

---

<sup>[18]</sup> DIN 18127, S.1, Anhang 6.1.

## 6.2. Versuchsaufbau und -ablauf

Der Proctorversuch wird in DIN 18127 ausführlich beschrieben. Zur Ermittlung der Proctorwerte eines Erdstoffes werden mehrere separate Einzelmessungen vorgenommen, bei denen der Wassergehalt variiert wird. Der Aufbau eines Proctorversuchs besteht aus einem Versuchszylinder und einem von Hand betriebenen Verdichtungsgerät. In den vergangenen Jahren sind allerdings viele Labore dazu übergegangen, motorbetriebene Verdichtungsgeräte zu benutzen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Bestandteile eines Proctorversuchs.



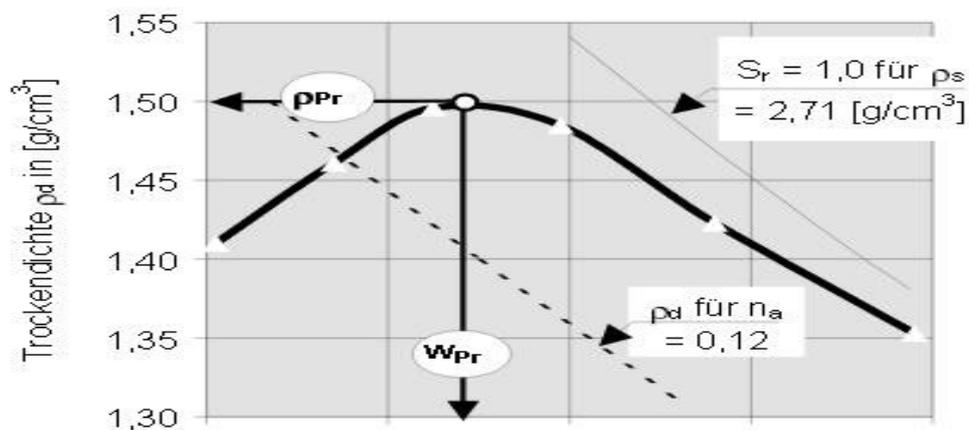
[19] FRANK, Skript Boden.pdf, S.64



Die Versuchsabläufe zur Ermittlung der Proctorwerte sind dabei immer gleich. Es werden vordefinierte Mengen des Bodens in dem Versuchszylinder lagenweise durch eine Anzahl festgelegter Schläge mit einem standardisierten Fallgewicht verdichtet. Die nachfolgende Abbildung definiert die vorgeschriebenen Versuchsparameter in Abhängigkeit der anstehenden Korngruppe:

zulässiges Größtkorn [mm]	Mindestpro- benmenge [kg]	Versuchszylinder		Fallgewicht		Anzahl der Schichten [-]	Schläge je Schicht [-]
		Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [kg]		
20,0	3	100	120	300	2,5	3	25
31,5	6	150	125	450	4,5	3	22
63,0	30	250	200	600	15,0	3	22

Nachdem der vorgeschriebene Versuchsaufbau bestimmt wurde, wird das Volumen des Erdstoffes ermittelt, sowie die Feuchtmasse bestimmt. Aus diesen Größen ergibt sich die Feuchtdichte. Um den Wassergehalt des Stoffes zu bestimmen, wird er bis zur Massekonstanz im Ofen getrocknet. Aus dem Wassergehalt ergibt sich die Trockendichte. Führt man diesen Versuch mit unterschiedlichen Wassergehalten durch, so ergibt sich die Proctorkurve. Sie hat typischerweise die Form einer umgekehrten Parabel. Abbildung 09 zeigt eine allgemeine Proctorkurve.



[21] FRANK, Skript Boden.pdf, S.63

[22] FRANK, Skript Boden.pdf, S.64

### 6.3. Auswertung und Bedeutung der Ergebnisse

Aus den vorliegenden Proctorkurven werden die Besonderheiten der Proctordichten von Erdstoffen ersichtlich. Jede Bodenart hat eine charakteristische Proctorkurve und somit auch einen spezifischen Wassergehalt  $w_{opt}$  oder  $w_{pr}$ , bei dem die erreichte Trockendichte  $\rho_d$  maximal wird. Das Maximum der Trockendichten im Proctorversuch nennt man  $\rho_{pr}$ . Auf der linken sowie rechten Seite fallen die erzielten Dichten mit ab- und zunehmendem Wassergehalt wieder ab, was zu der charakteristischen umgedrehten Parabelform der Proctorkurven führt. Die Ursache für die abfallenden Dichten liegt in der Mechanik des Bodens begründet. Bei einem zu niedrigen Wassergehalt behindern die Reibungskräfte der Körner im Boden eine weitere Zusammenpressung des Porenraums. Das Wasser fungiert in diesem Fall als Gleitmittel, welches die Reibungskräfte minimiert. Ist der Wassergehalt jedoch zu hoch, füllen sich die Porenräume mit inkompressiblem Wasser. Dies verhindert ein Zusammenpressen der Poren und eine dichtere Lagerung des Bodens.

## 6.4. Überkornkorrektur beim Proctorversuch

Desweiteren wird der Anteil des für den Proctorversuchs ungeeigneten Überkorns im Protokoll vermerkt. Bei diesem Beispiel sind es 19 %. Während eines Proctorversuches werden aus versuchstechnischen Gründen nur die Körner mit einem Durchmesser von weniger als 32 mm verwendet. Um diese bei der Ermittlung der Proctordichten nicht außer Acht zu lassen, wird der Überkornanteil nach den erfolgten Proctorversuchen wieder mit in die Berechnung der Proctordichten einbezogen. Dies erfolgt nach nachstehender Formel und wird als Überkornkorrektur bezeichnet.

$$\rho'_d = \rho_d \cdot (1 - \ddot{u}) + 0,9 \cdot \ddot{u} \cdot \rho_{s\ddot{u}}$$
$$w' = w \cdot (1 - \ddot{u}) + w_{\ddot{u}} \cdot \ddot{u}$$

mit

- $\rho_d$  = Trockendichte ohne Überkorn
- $w$  = Wassergehalt ohne Überkorn
- $\ddot{u}$  = Überkornanteil
- $\rho_{s\ddot{u}}$  = Korndichte des Überkorns
- $w_{\ddot{u}}$  = Wassergehalt des Überkorns
- $\rho'_d$  = Trockendichte mit Überkorn
- $w'$  = Wassergehalt mit Überkorn

Abbildung 10: Einrechnung des Überkorns in die Proctordichte<sup>[23]</sup>

---

<sup>[23]</sup> FRANK, Skript Boden.pdf, S.64

## 6.5. Auswertung des Prüfzeugnisses

Der Hauptbestandteil bei der Auswertung eines Proctorversuchs ist die nachfolgende Tabelle:

### Proctorversuch an 0/32 für KG 2 0/45 mit Überkornkorrektur

Versuch:	Versuch nach DIN EN 13 286-2 (2010) und TP Gestein, Teil 8.1.1 (2012), Geräte nach Tabelle 1 der TP Gestein / Zelle 2	Wassergehalt [%]		Trockendichte [Mg/m <sup>3</sup> ]	
		W	W'	$\rho_d$	$\rho_d'$
		2,8	2,5	2,14	2,20
		4,4	3,8	2,13	2,19
Anteil > 32 mm in der Probe	19 M.-%	6,2	5,2	2,19	2,24
Einbaulagen	3	7,5	6,3	2,22	2,26
Schläge je Lage	22	8,7	7,2	2,21	2,26

**Abbildung 11: Auswertungsprotokoll eines Proctorversuches**<sup>[24]</sup>

Zunächst werden der verwendete Versuchsaufbau und die ihm zu Grunde liegenden Normen benannt. In diesem Fall ist das die DIN 13 286-2 und die TP Gestein Teil 8.1.1. Desweiteren wird die Anzahl der Einbaulagen und die jeweils pro Lage vollzogenen Schläge aufgezählt. Bei diesem Beispiel wurden 3 Einbaulagen mit jeweils 22 Schlägen pro Lage verdichtet. Die Anzahl der Schläge und Lagen ergibt sich aus Tabelle 05.

<sup>[24]</sup> Proctorversuchsprotokoll, Anhang 7.1\_18, 0-32

Im Protokoll des Proctorversuchs werden anschließend die Trockendichten und Wassergehalte, einmal mit und einmal ohne Überkornkorrektur dargestellt. Desweiteren ist es üblich, dass als Vergleichswerte die 1,0 und 0,65 Sättigungslinien dargestellt werden.

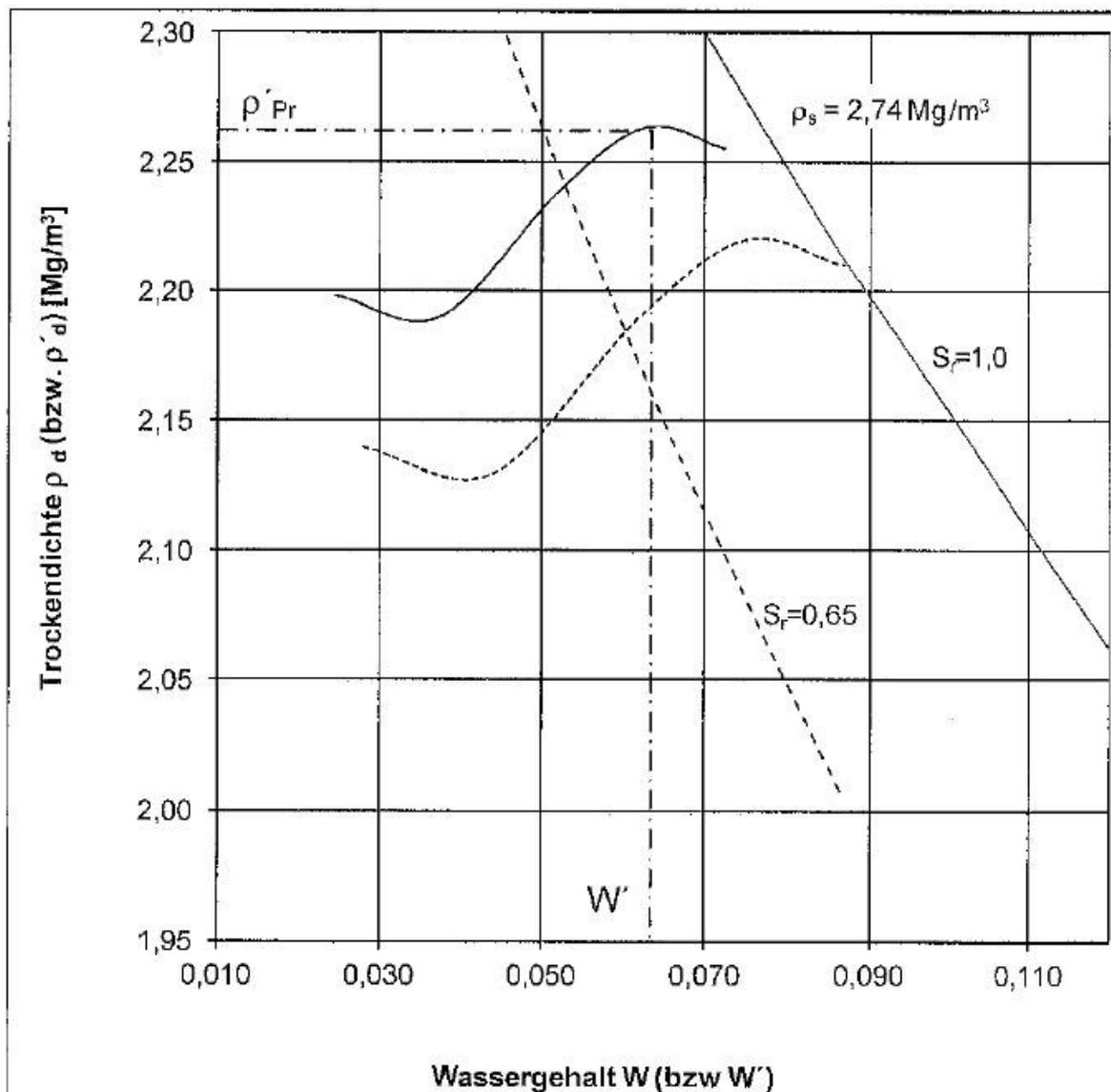
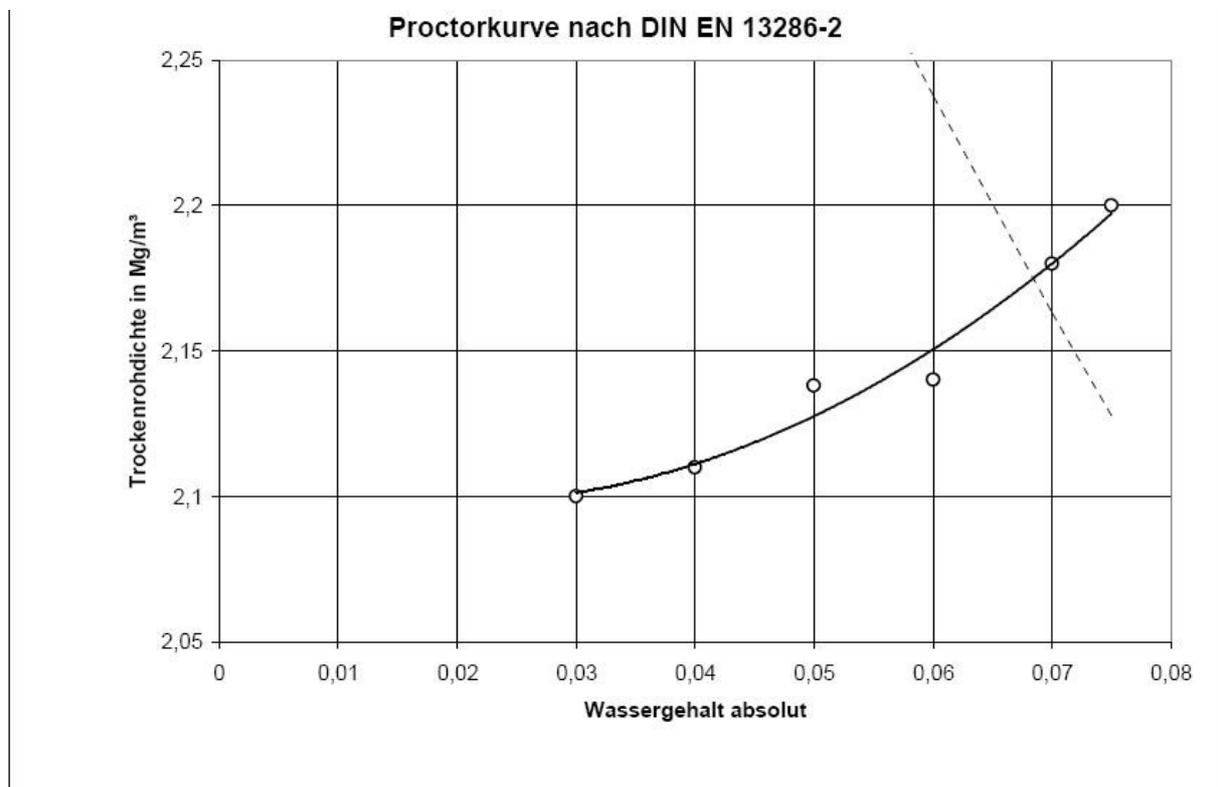


Abbildung 12: Proctorkurven vor und nach der Überkornkorrektur<sup>[25]</sup>

<sup>[25]</sup> Proctorversuchsprotokoll, Anhang 7.1\_18, 0-32

In einigen Protokollen wird der Schnittpunkt der 65% Sättigungslinie mit der Proctorkurve als Punkt des optimalen Wassergehalts für die Verdichtung dargestellt. Zum Beispiel bei folgender Abbildung aus dem Prüfzeugnis A2.



— Proctorkurve  
- - - - - 65 % Sättigungslinie

Ein für die Verdichtung günstiger Wassergehalt kann im Regelfall aus dem Schnittpunkt der 65 % Sättigungslinie abgeleitet werden.  
Das Material sollte bei 6,8 M.-% Wassergehalt eingebaut werden.

**Abbildung 13: Ermittlung des Wassergehalts nach DIN EN 13286-2<sup>[26]</sup>**

<sup>[26]</sup> Proctorversuchsprotokoll, Anhang 7.1\_18, 0-32

## 7. Betrachtung der nichtbindigen Erdstoffe 0/32

### 7.1. Vorbetrachtungen und Eingrenzung

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Prüfzeugnisse für die Erdstoffe in der Körnungsgruppe 0/32 ausgewertet und analysiert. Dieser Auswertung liegen die Prüfzeugnisse aller Kieswerke zu Grunde, die im Anhang 7.1\_01,0-32 bis Anhang 7.1\_33,0-32 aufgeführt sind. Im Anhang sind die Prüfzeugnisse anhand ihrer Nummerierung von 1 bis 30 klar den in der nachfolgenden Tabelle zugeordneten Zeilen zugeordnet. Hierbei muss beachtet werden, dass einige Prüfzeugnisse mehrere geprüfte Erdstoffe im 0/32er Körnungsbereich beinhalten. Ist dies der Fall, werden die unterschiedlichen Körnungen mit Parametern bestehend aus Buchstaben versehen. So ist beispielsweise die Nummer 19b, der zweite geprüfte Erdstoff Prüfzeugnis im Anhang 7.1\_19,0-32.

Alle dieser Untersuchung zu Grunde liegenden Prüfzeugnisse enthalten folgende, für die Auswertungen relevanten Daten:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Körnungslinie und Siebdurchgänge
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Maximale Proctordichte
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Bestimmung des optimalen Wassergehaltes

Desweiteren finden sich in ihnen eine Vielzahl andere Untersuchungen bezüglich der Kornform, des Widerstandes gegen Frost und des Widerstandes gegen Zertrümmerung und viele mehr. Für die nachfolgenden Auswertungen wurden jedoch nur die drei obengenannten Bestandteile der Prüfzeugnisse berücksichtigt. Alle weiteren Analysen oder Kennwerte innerhalb der Prüfzeugnisse bleiben vollkommen unberücksichtigt.

Die umseitig dargestellte Tabelle 06 enthält eine exakte Übernahme der Siebdurchgänge, die in den Prüfzeugnissen enthalten sind. Die Tabelle 07 auf Seite 28 verarbeitet diese Werte. Zunächst werden die 10%, 30% und 60% Quantile,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  berechnet, um mit Ihrer Hilfe die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  und die Krümmungszahl  $C$  zu errechnen. In der Tabelle 07 auf Seite 28 finden sich ebenfalls die maximal erreichbaren Proctordichten sowie die dafür optimalen Wassergehalte. Diese Werte sind wiederum exakt aus den Prüfzeugnissen entnommen. Auf den Seiten 29 – 53 werden die Sieblinien sowie die Abhängigkeiten der Proctordichten von  $U$ ,  $C$  und  $W$  dargestellt und analysiert.

## 7.2. Auswertung 0/32

0/32	0,06	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45	56	63,5
1	3,4	7	11	17	25	36	51	76	100	100	100	100
2	5	8	11	16	22	30	43	63	98	99	100	100
3	3,8	5	7	14	29	55	82	88	96	97	99	100
4	3,8	7	14	29	55	71	82	88	96	97	99	100
5	2	5	12	30	58	72	81	87	96	97	99	100
6	1,3	3	9	23	39	57	74	87	99	100	100	100
7	0,7	2	9	21	35	52	69	80	93	95	97	100
8	1	7	14	30	46	62	77	87	95	97	99	100
9	1,1	4	16	36	55	68	78	86	96	97	99	100
10	1,6	4	14	35	57	70	80	87	95	97	99	100
11	0,9	2	8	18	30	45	66	85	99	100	100	100
12	0,3	1	8	21	35	49	66	80	95	97	100	100
13	1	3	16	39	63	76	83	89	95	97	99	100
14	5	13	28	41	57	76	85	88	91	94	97	100
15	5	18	27	40	51	63	75	86	99	100	100	100
16	3	8	12	18	27	34	49	62	98	100	100	100
17	2,6	8	12	18	27	34	49	62	99	100	100	100
18	2	5	7	9	13	23	47	63	97	100	100	100
19a	3	7	10	14	21	32	48	67	98	100	100	100
19b	3	7	10	14	25	34	50	71	98	100	100	100
20	3,6	8	11	17	25	35	49	69	97	98	99	100
21	2,3	4	6	11	18	27	42	66	95	100	100	100
22a	3,7	8	11	17	25	32	44	63	95	100	100	100
22b	4,2	9	15	20	26	33	48	72	98	100	100	100
23a	5	11	18	24	31	37	50	74	99	100	100	100
23b	4,2	9	15	21	29	39	53	78	98	100	100	100
24	3,4	7	11	15	22	31	44	66	95	100	100	100
25a	4,1	9	15	19	24	31	41	58	91	100	100	100
25b	4,2	8	13	18	22	30	40	60	95	100	100	100
26	3,4	6	10	16	20	27	42	65	97	100	100	100
27	2,8	7	11	18	27	35	49	66	98	100	100	100
28a	5	10	16	21	26	33	45	68	96	100	100	100
28b	3,7	9	14	19	26	34	44	68	98	100	100	100
29a	4,8	11	17	22	26	33	42	60	98	100	100	100
29b	4,5	9	14	19	23	30	41	59	98	100	100	100
30a	4,9	9	14	20	30	42	62	73	99	100	100	100
30b	3	6	10	18	26	36	52	69	99	100	100	100
30c	2,7	6	9	17	25	34	49	68	98	100	100	100
30d	2,8	7	11	18	27	35	49	66	98	100	100	100

**Tabelle 06: Auswertung der Sieblinien bei 0/32**

Horizontal sind die Siebdurchgänge durch die Maschenweiten eingetragen.  
Vertikal werden alle Sieblinien der 30 Prüfzeugnisse aufgeführt.

<b>0/32</b>	<b>d10</b>	<b>d30</b>	<b>d60</b>	<b>U</b>	<b>C</b>	<b>Proctordichte</b>	<b>optimaler Wassergehalt</b>
1	0,438	2,909	10,880	24,8	1,78	2,17	7,5
2	0,417	4,000	14,800	35,5	2,59	2,20	7,4
3	0,714	2,077	4,741	6,6	1,27	2,05	8,0
4	0,357	1,038	2,625	7,4	1,15	2,05	8,0
5	0,429	1,000	2,286	5,3	1,02	2,05	8,0
6	0,536	1,438	4,706	8,8	0,82	1,99	6,5
7	0,542	1,643	5,882	10,9	0,85	1,98	6,0
8	0,357	1,000	3,750	10,5	0,75	1,95	7,9
9	0,375	0,850	2,769	7,4	0,70	1,96	6,2
10	0,400	0,881	2,462	6,2	0,79	1,96	4,6
11	0,600	2,000	6,857	11,4	0,97	2,05	4,4
12	0,577	1,643	6,588	11,4	0,71	1,92	8,3
13	0,385	0,804	1,875	4,9	0,90	1,86	8,2
14	0,180	0,577	2,318	12,9	0,80	2,03	8,2
15	0,135	0,615	3,500	25,9	0,80	2,26	6,7
16	0,375	2,857	14,769	39,4	1,47	1,99	6,3
17	0,407	2,857	14,769	36,3	1,36	1,99	6,3
18	1,500	5,167	14,500	9,7	1,23	1,98	6,0
19a	0,500	3,636	13,053	26,1	2,03	2,10	5,6
19b	0,500	3,111	11,810	23,6	1,64	2,10	4,6
20	0,441	3,000	12,400	28,1	1,65	2,15	7,0
21	0,900	4,800	14,000	15,6	1,83	2,05	5,2
22a	0,440	3,429	14,737	33,5	1,81	2,23	6,0
22b	0,298	3,143	12,000	40,3	2,76	2,21	7,6
23a	0,231	1,857	11,333	49,0	1,32	2,12	7,3
23b	0,298	2,200	10,240	34,4	1,59	2,21	7,2
24	0,443	3,778	13,818	31,2	2,33	2,01	4,3
25a	0,300	3,714	16,939	56,5	2,72	2,24	7,7
25b	0,351	4,000	16,000	45,6	2,85	2,25	7,4
26	0,500	4,800	14,261	28,5	3,23	2,10	7,0
27	0,447	2,750	13,176	29,5	1,28	2,22	6,1
28a	0,262	3,143	13,217	50,5	2,86	2,19	7,4
28b	0,330	3,000	13,333	40,4	2,04	2,24	7,0
29a	0,249	3,143	16,000	64,2	2,48	2,19	7,4
29b	0,316	4,000	16,397	51,9	3,09	2,24	7,0
30a	0,308	2,000	7,600	24,7	1,71	2,08	7,9
30b	0,500	2,800	11,765	23,5	1,33	2,03	7,3
30c	0,563	3,111	12,632	22,4	1,36	2,07	5,0
30d	0,447	2,750	13,176	29,5	1,28	2,22	6,2

**Tabelle 07: Berechnung von U und C anhand der Daten aus Tabelle 06**

Jedem Erdstoff werden seine Ungleichförmigkeitszahl, Krümmungszahl, Wassergehalt und Proctordichte zugeordnet.

Nachfolgend sind die 5 Sieblinien dargestellt, die jeweils zu den kleinsten oder größten Krümmungswerten (C) in der 0/32er Gruppe gehören.

**Abbildung 14: Sieblinien der kleinsten 5 Krümmungswerte**

**Abbildung 15: Sieblinien der größten 5 Krümmungswerte**

### **Abbildung 16: Vergleich der Sieblinien mit den größten und kleinsten Krümmungswerten**

Anhand der Abbildungen 14, 15 und 16 ist gut erkennbar, dass große Krümmungswerte durch eine beinahe exponentiell verlaufende Sieblinie gekennzeichnet sind, während kleine Krümmungswerte eine eher linear ansteigende Sieblinie besitzen. Gestützt wird dieses Erkenntnis durch die Berechnungsformel des Krümmungswertes.

#### **Formel 02: Berechnung der Krümmungszahl**

Die Sieblinien großer Krümmungswerte zeichnen sich durch die Charakteristika aus, zum einen ein sehr kleines Korn im Bereich  $d_{10}$  zu besitzen sowie ein verhältnismäßig großes Korn im Bereich  $d_{30}$ . Zwar ist das Korn bei  $d_{60}$  verhältnismäßig groß, dies hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Größe des Krümmungswertes.

Die Krümmungswerte der Körnungsgruppe 0/32 liegen im Bereich von 0,70 bis 3,25.

Nachfolgend sind die 5 Sieblinien dargestellt, die jeweils zu den kleinsten oder größten Ungleichförmigkeitswerten (U) in der 0/32er Gruppe gehören:

**Abbildung 17: Sieblinien der kleinsten 5 Ungleichförmigkeitswerte**

**Abbildung 18: Sieblinien der größten 5 Ungleichförmigkeitswerte**

### **Abbildung 19: Vergleich der Sieblinien mit den größten und kleinsten Ungleichförmigkeitswerten**

Anhand der Abbildungen 17, 18 und 19 ist gut erkennbar, dass große Ungleichförmigkeitswerte durch eine beinahe exponentiell verlaufende Sieblinie gekennzeichnet sind, während kleine Ungleichförmigkeitswerte eine eher logarithmisch ansteigende Sieblinie besitzen. Gestützt wird dieses Erkenntnis durch die Berechnungsformel des Ungleichförmigkeitswertes.

#### **Formel 01: Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl**

Die Sieblinien großer Ungleichförmigkeitswerte besitzen sehr große Körner im Bereich von  $d_{60}$  und sehr kleiner im Bereich  $d_{10}$ . Die Körner im Bereich  $d_{10}$  sind ca. halb so groß wie bei den Sieblinien kleiner Ungleichförmigkeitswerte. Auffällig ist, dass die Sieblinien großer Ungleichförmigkeitswerte bis ca.  $d_{40}$  linear flach ansteigen und ab dort schnell exponentiell ansteigen. Die Sieblinien kleiner Ungleichförmigkeitswerte steigen dagegen zu Beginn steiler an und flachen sich ab  $d_{60}$  deutlich ab. Die Ungleichförmigkeitswerte der Körnungsgruppe 0/32 liegen zwischen 5 und 65.

### 7.3. Untersuchung und Bewertung der erhaltenen Ergebnisse anhand von Regressionsanalysen

Um einen Zusammenhang zwischen den vorliegenden Daten zu erkennen, greift diese Diplomarbeit auf die Erstellung von unterschiedlichen Trendlinientypen zurück. Dabei wird versucht, alle auftretenden Werte in theoretischen Modellen zu erklären. Die Bewertung der Qualität dieser Modelle wird anhand von Regressionsanalysen vorgenommen. Dabei spielt vor allem das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  eine entscheidende Rolle. Es erklärt den Anteil der Daten, der sich durch die gefundene Trendliniengleichung erklären lässt. Ein Bestimmtheitsmaß von 0 bedeutet demzufolge, dass die erstellte Trendlinie die vorhandenen Daten gar nicht erklärt und ein Bestimmtheitsmaß von 1 beschreibt eine perfekte Erklärung jedes einzelnen Wertepaares durch die gefundene Trendlinie.

#### 7.3.1. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Krümmungswert

Auf den nachfolgenden Seiten und in den Abbildungen 20 bis 25 wird die Abhängigkeit der Proctordichte von den Krümmungswerten dargestellt und anhand verschiedener Regressionsarten bewertet. Dabei werden fünf verschiedene Regressionsarten verwendet, die lineare Abhängigkeit, die logarithmische Abhängigkeit, die potenzielle Abhängigkeit, die exponentielle Abhängigkeit sowie die Abhängigkeit beim Polynom 2. Grades. Mit Hilfe dieser Daten wird für jede Regressionsart ihr jeweiliges Bestimmtheitsmaß ermittelt.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> alle Datensätze der Körnungsgruppe 0/32
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den Krümmungswerten
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> jeweils eine Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß

### 7.3.1.1. Lineare Regression

**Abbildung 20: Lineare Regression bei Krümmungswerten**

### 7.3.1.2 Logarithmische Regression

**Abbildung 21: Logarithmische Regression bei Krümmungswerten**

### 7.3.1.3. Potenzielle Regression

**Abbildung 22: Potenzielle Regression bei Krümmungswerten**

### 7.3.1.4. Exponentielle Regression

**Abbildung 23: Exponentielle Regression bei Krümmungswerten**

### 7.3.1.5. Regression mittels Polynom 2. Grades

#### Abbildung 24: Regression mittels Polynom 2. Grades bei Krümmungswerten

### 7.3.1.6. Vergleich der Ergebnisse

Im Allgemeinen ist aus allen fünf Regressionsarten ersichtlich, dass mit steigenden Krümmungswerten auch die Proctordichten zunehmen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die potenzielle, die logarithmische sowie die Regression mittels Polynom die besten Beschreibungen der anstehenden Datensätze liefern. Die Bestimmtheitsmaße dieser 3 Auswertungen liegen zwischen 0,421 und 0,426. Dementgegen stehen die Regressionsbedingungen der linearen und exponentiellen Auswertung. Beide Bestimmtheitswerte liegen bei 0,386 bzw. 0,388.

Abschließend bleibt festzustellen, dass sich die vorhandenen Datensätze durch keine der Regressionsarten gut beschreiben lassen. Ein Bestimmtheitswert im Bereich von 0,425 beschreibt lediglich 42,5% der vorhandenen Daten. Auf der Seite 80 im Abschnitt 10 werden Gründe für die mangelnde Genauigkeit der Daten beschrieben, sowie möglich Schwächen bei der einseitigen Betrachtung der Krümmungswerte dargelegt.

### 7.3.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert

Auf den nachfolgenden Seiten in den Abbildungen 25 bis 29 wird die Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert dargestellt und anhand verschiedener Regressionsarten bewertet. Dabei werden fünf verschiedene Regressionsmethoden verwendet, die lineare Regression, die logarithmische Regression, die potenzielle Regression, die exponentielle Regression sowie die Regression mittels Polynom 2. Grades. Mit Hilfe dieser Daten wird für jede Regressionsart das jeweilige Bestimmtheitsmaß berechnet.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Alle Datensätze der Körnungsgruppen 0/32
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den Ungleichförmigkeitswerten
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Jeweilige Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß zur Evaluierung der Daten

#### 7.3.2.1. Lineare Regression

#### Abbildung 25: Lineare Regression bei Ungleichförmigkeitswerten

### 7.3.2.2. Logarithmische Regression

**Abbildung 26: Logarithmische Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

### 7.3.2.3. Potenzielle Regression

**Abbildung 27: Potenzielle Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

#### 7.3.2.4. Exponentielle Regression

**Abbildung 28: Exponentielle Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

#### 7.3.2.5. Regression mittels Polynom 2. Grades

**Abbildung 29: Regression mittels Polynom 2. Grades bei Ungleichförmigkeitswerten**

### 7.3.2.6. Vergleich der Ergebnisse

Bei den Ungleichförmigkeitswerten stellt sich ein ähnliches Bild wie bei den Krümmungswerten ein. Je größer die Ungleichförmigkeitswerte werden, umso höher ist im Allgemeinen die Proctordichte des Erdstoffs. Auffällig ist, dass die Bestimmtheitsmaße der Ungleichförmigkeitswerte wesentlich höher sind als bei den Krümmungswerten. Dies deutet auf eine wesentliche stichhaltigere Beschreibung der Daten durch die getroffenen Regressionen hin. Die Bestimmtheitsmaße der Ungleichförmigkeitswerte liegen bei allen fünf Regressionsarten zwischen 0,512 bei exponentieller Regression und 0,562 bei der Regression mittels Polynom 2. Grades. Ebenso wie bei den Krümmungswerten stellt die Regression mittels Polynom die genaueste Beschreibung dar und die exponentielle Regression die ungenaueste.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Regressionsbedingungen für Ungleichförmigkeitswerte wesentlich genauer sind als für Krümmungswerte. Dennoch ist ein Bestimmtheitsmaß von 0,562 bei weitem noch keine zutreffende Beschreibung der vorhandenen Datensätze. Im Abschnitt 7.4. wird versucht das Bestimmtheitsmaß durch die Kopplung der Ungleichförmigkeitswerte mit den Krümmungswerten zu erhöhen und somit genauere Modellbeschreibungen zu erhalten.

#### **7.4. Betrachtung der Doppelabhängigkeiten zwischen Krümmungswerten und Ungleichförmigkeitswerten**

Bei der Auswertung der Sieblinien bezüglich der größten und kleinsten Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte fällt auf, dass große Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte annähernd den gleichen Sieblinienverlauf besitzen. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte stark von einander abhängen.

#### **Abbildung 30: Abhängigkeit der Krümmungswerte von den Ungleichförmigkeitswerten**

Anhand von Abbildung 30 wird ersichtlich, dass sich mit zunehmenden Ungleichförmigkeitswerten auch die dazugehörigen Krümmungswerte eines Erdstoffes erhöhen. Daraus ergibt sich für die weitere Betrachtung die Möglichkeit, die Doppelabhängigkeit der Proctorwerte von den Krümmungswerten sowie den Ungleichförmigkeitswerten zu untersuchen. Es ist anzunehmen, dass sich die Genauigkeit infolge der Einbeziehung von mehreren Abhängigkeiten verbessert. Im folgenden Abschnitt wird versucht, diese Vermutung zu bestätigen.

#### **7.4.1. Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes durch die Verbindung von Krümmungswert und Ungleichförmigkeitswert**

In Abschnitt 7.4. wurde gezeigt, dass Krümmungswerte und Ungleichförmigkeitswerte stark voneinander abhängen. Um diese Abhängigkeit zur Verbesserung der Genauigkeit bezüglich der Abhängigkeit der Proctorwerte von Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten zu verwenden, bietet es sich an, einen neuen Wert, basierend auf den Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten, einzuführen. Es wird der Wert UC gewählt. Ihm liegt folgende Berechnungsformel zu Grunde:

##### **Formel 17: Berechnungsformel des theoretischen UC-Wertes**

Anspruch des UC-Wertes in dieser Arbeit ist es, den Bestimmtheitsgrad für die Abhängigkeiten der Proctordichten von den Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten zu verbessern, um so die Genauigkeit der Regressionsbeschreibungen zu verbessern. Die Berechnungsformel des UC-Wertes wurde so gewählt, dass Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte zu gleichen Teilen eingehen. Die Wurzel dient lediglich der Glättung der Werte. Auf der nachfolgenden Seite befindet sich die Berechnungsgrundlage der UC-Werte in Tabellenform.

U	C	Proctordichte	UC-Wert
24,840	1,776	2,17	6,6
35,492	2,593	2,20	9,6
6,640	1,274	2,05	2,9
7,353	1,150	2,05	2,9
5,329	1,020	2,05	2,3
8,780	0,820	1,99	2,7
10,852	0,847	1,98	3,0
10,504	0,747	1,95	2,8
7,384	0,696	1,96	2,3
6,155	0,788	1,96	2,2
11,428	0,972	2,05	3,3
11,418	0,710	1,92	2,8
4,870	0,895	1,86	2,1
12,878	0,798	2,03	3,2
25,926	0,800	2,26	4,6
39,384	1,474	1,99	7,6
36,287	1,358	1,99	7,0
9,667	1,227	1,98	3,4
26,106	2,026	2,10	7,3
23,620	1,639	2,10	6,2
28,118	1,646	2,15	6,8
15,556	1,829	2,05	5,3
33,493	1,813	2,23	7,8
40,268	2,762	2,21	10,5
49,044	1,317	2,12	8,0
34,399	1,588	2,21	7,4
31,227	2,334	2,01	8,5
56,550	2,719	2,24	12,4
45,581	2,849	2,25	11,4
28,522	3,231	2,10	9,6
29,497	1,285	2,22	6,2
50,518	2,856	2,19	12,0
40,368	2,044	2,24	9,1
64,189	2,477	2,19	12,6
51,889	3,088	2,24	12,7
24,682	1,709	2,08	6,5
23,529	1,333	2,03	5,6
22,436	1,361	2,07	5,5
29,497	1,285	2,22	6,2

**Tabelle 08: Berechnungsgrundlage für UC-Werte**

#### 7.4.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom UC-Wert

Auf den nachfolgenden Seiten und in den Abbildungen 31 bis 35 wird die Abhängigkeit der Proctordichte vom UC-Wert dargestellt und anhand verschiedener Regressionsarten bewertet. Dabei werden fünf verschiedene Regressionsarten verwendet, die lineare Abhängigkeit, die logarithmische Abhängigkeit, die potenzielle Abhängigkeit, die exponentielle Abhängigkeit sowie die Abhängigkeit beim Polynom 2. Grades. Mit Hilfe dieser Daten wird für jede Regressionsart ihr jeweiliges Bestimmtheitsmaß ermittelt.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten:

- <sup>35</sup><sub>17</sub> alle Datensätze der Körnungsgruppe 0/32
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den UC-Werten
- <sup>35</sup><sub>17</sub> jeweils eine Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß

##### 7.4.2.1. Lineare Abhängigkeiten

#### Abbildung 31: Lineare Regression bei UC-Werten 0/32

#### **7.4.2.2. Logarithmische Regression**

**Abbildung 32: Logarithmische Regression bei UC-Werten**

#### **7.4.2.3. Potenzielle Regression**

**Abbildung 33: Potenzielle Regression bei UC-Werten**

#### **7.4.2.4. Exponentielle Regression**

**Abbildung 34: Exponentielle Regression bei UC-Werten**

#### **7.4.2.5. Regression mittels Polynom 2. Grades**

**Abbildung 35: Regression mittels Polynom 2. Grades bei UC-Werten**

#### 7.4.2.6. Vergleich der Ergebnisse

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Bestimmtheitsmaße der Krümmungs-, Ungleichförmigkeits- und UC-Werte der Körnungsgruppe 0/32.

#### **Tabelle 09: Vergleich der Bestimmtheitsmaße bei C-, U- und UC-Werten**

Anhand der Tabelle 09 ist zu erkennen, dass der UC-Wert bei 4 von 5 Regressionsmethoden eine qualitative Verbesserung gegenüber den C- und U-Werten darstellt. Die Bestimmtheitsmaße der UC-Werte liegen im Bereich 0,524 und 0,565. Sie erklären damit ca. 56% der vorliegenden Daten. Somit ist es möglich, tendenziell den Einfluss der Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte abzuschätzen.

Trotz der qualitativen Verbesserung der Bestimmtheitsmaße liegen sie immer noch in einem nicht optimalen Bereich. Sie können daher nur Tendenzen aufzeigen, jedoch nicht hinreichend belegen.

## 7.5. Einbeziehung des Wassergehaltes

### 7.5.1. Herkömmliche Betrachtungsweise

Der Zusammenhang von Wassergehalt und Proctordichte wird in einer Proctorkurve, wie in Abschnitt 6.5. auf Seite 24 dargestellt. Die nachfolgende Abbildung 36 beinhaltet alle Wertepaare der optimalen Wassergehalte und ihrer dazugehörigen Proctordichten in der Körnungsgruppe 0/32. Hierbei wird versucht, eine Tendenz zu erkennen und diese in Abhängigkeit der Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte zu bringen.

#### **Abbildung 36: lineare Regression und Regression mittels Polynom 2. Grades**

Die Punkteschar lässt sich nicht mit den bisher verwendeten Regressionsarten definieren. Die Bestimmtheitsmaße der linearen, logarithmischen, potenziellen und exponentiellen Regression lassen keinerlei Zusammenhang erkennen. In Abbildung 36 sind nur die lineare Regression und die Regression mittels Polynom 2. Grades dargestellt. Die anderen Regressionsarten näherten sich grafisch an die lineare Trendlinie an und sind ebenso unbrauchbar für diese Betrachtung. Die Punkteschar erinnert bei näherer Betrachtung jedoch an eine herkömmliche Proctorkurve, also ein Polynom 3. Grades. Die Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Regression mittels Polynom 3. Grades für alle Wertepaare des optimalen Wassergehaltes und ihrer dazugehörigen Proctorwerte in der Körnungsgruppe 0/32.

### **Abbildung 37: Regression mittels Polynom 3. Grades**

Interessanterweise stellt die Regression mittels Polynom 3. Grades tatsächlich die bei Weitem genaueste Beschreibung des Zusammenhangs der Wertepaare dar. Auffällig ist, dass die Form des Polynoms stark an die Proctorkurve bei der Berechnung der Proctorwerte erinnert. Obwohl die Proctorkurven im Allgemeinen der Ermittlung der optimalen Wassergehalte dienen, scheint ebenfalls ein Zusammenhang zwischen den optimalen Wassergehalten und der maximal möglichen Proctordichte aller Proctorwerte zu bestehen.

Es muss also ein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Bodens und seiner maximal möglichen Proctordichte sowie seinem optimalen Wassergehalt bestehen. Im Abschnitt 7.5.2. auf Seite 51 wird untersucht, ob eine Abhängigkeit des Wassergehalts von den Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerten existiert.

## **7.5.2. Untersuchung der Zusammenhänge des Wassergehalts mit dem Krümmungswert und dem Ungleichförmigkeitswert**

### **7.5.2.1. Abhängigkeit vom Krümmungswert**

**Abbildung 38: Zusammenhang von Wassergehalt und Krümmungswert bei 0/32**

### **7.5.2.2. Abhängigkeit vom Ungleichförmigkeitswert**

**Abbildung 39: Zusammenhang von Wassergehalt und Ungleichförmigkeitswert**

Auf den Abbildungen 38 und 39 auf Seite 50 wird deutlich, dass die Punkteschar aus den Abhängigkeiten der optimalen Wassergehalte von den Krümmungswerten und Ungleichförmigkeitswerten keinen Trend erkennen lässt. Keine Regressionsbedingung deutet auf einen verwertbaren Zusammenhang zwischen den Körnungsparametern und den optimalen Wassergehalten hin. Die Vermutung, dass die Höhe des Wassergehalts in irgendeinem Verhältnis zum Korngefüge steht, hat sich nicht bestätigt.

Allerdings ist auffällig, dass im Bereich niedriger Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte die Streuung der optimalen Wassergehalte sehr groß ist, während höhere Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte ausschließliche hohe optimale Wassergehälter besitzen. Dies ist insofern interessant, dass sich die Körnungszusammensetzung großer Ungleichförmigkeitswerte stark von der kleiner unterscheidet und somit für kleinere Ungleichförmigkeitswerte eine gleichmäßigere Verteilung der optimalen Wassergehalte zu erwarten gewesen wäre.

## 7.6. Zusammenfassung der Ergebnisse in der Körnungsgruppe 0/32

Anhand der Daten der Körnungsgruppe 0/32 und den Auswertungen in Abschnitt 7, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Sieblinien großer Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte sind nahezu identisch
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> große Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte besitzen in der Regel ein größeres Durchschnittskorn ( $d_{50}$ ) als kleine Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> mit zunehmenden Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerten steigt tendenziell auch die Proctordichte
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> die durch das Bestimmtheitsmaß erzielte Genauigkeit der beschreibenden Trendlinie der vorliegenden Werte liegt bei den Krümmungswerten im Bereich von 0,386 bis 0,426
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> die durch das Bestimmtheitsmaß erzielte Genauigkeit der beschreibenden Trendlinie der vorliegenden Werte liegt bei den Ungleichförmigkeitswerten im Bereich von 0,512 bis 0,562
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> durch Kombination der Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte wird die Genauigkeit der Trendlinie beim UC-Wert marginal verbessert
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> hohe Krümmungs- und Ungleichförmigkeitszahlen besitzen ausschließlich vergleichsweise hohe optimale Wassergehalte, während kleine Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte eine hohe Varianz unterschiedlichster Wassergehalte aufweisen

## 8. Betrachtung der nichtbindigen Erdstoffe 0/8

### 8.1. Vorbetrachtungen und Eingrenzung

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Prüfzeugnisse für die Erdstoffe in der Körnungsgruppe 0/8 ausgewertet und analysiert. Dieser Auswertung liegen die Prüfzeugnisse aller Kieswerke zu Grunde, die im Anhang 8.1. aufgeführt sind. Im Anhang 8.1\_01,0-8 bis Anhang 8.1\_33,0-8 sind die Prüfzeugnisse anhand ihrer Nummerierung von 1 bis 33 klar den in der nachfolgenden Tabelle zugeordneten Zeilen zugeordnet. Alle dieser Untersuchung zu Grunde liegenden Prüfzeugnisse enthalten folgende für die Auswertung relevanten Daten:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Körnungslinie und Siebdurchgänge
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Maximale Proctordichte
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Bestimmung des optimalen Wassergehaltes

Desweiteren finden sich in ihnen eine Vielzahl anderer Untersuchungen bezüglich der Kornform, des Widerstandes gegen Frost und des Widerstandes gegen Zertrümmerung und viele mehr. Für die nachfolgenden Auswertungen wurden jedoch nur die drei obengenannten Bestandteile der Prüfzeugnisse berücksichtigt. Alle weiteren Analysen oder Kennwerte innerhalb der Prüfzeugnisse bleiben vollkommen unberücksichtigt.

Die umseitig dargestellte Tabelle 10 enthält eine exakte Übernahme der Siebdurchgänge, die in den Prüfzeugnissen enthalten sind. Die Tabelle 11 auf Seite 56 verarbeitet diese Werte. Zunächst werden die 10%, 30% und 60% Quantile,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  berechnet, um mit ihrer Hilfe die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  und die Krümmungszahl  $C$  zu errechnen. In der Tabelle 11 auf Seite 56 finden sich ebenfalls die maximal erreichbaren Proctordichten sowie die dafür optimalen Wassergehalte. Diese Werte sind wiederum exakt aus den Prüfzeugnissen entnommen. Auf den Seiten 57 – 74 werden die Sieblinien sowie die Abhängigkeiten der Proctordichten von  $U$ ,  $C$  und  $W$  dargestellt und analysiert.

## 8.2. Auswertung der Körnungsgruppe 0/8

0/8	0	0,06	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	61,5
1	0	10	19	28	44	69	87	99	100	100	100
2	0	4	15	36	59	75	87	95	98	100	100
3	0	0	1	7	28	65	88	96	98	100	100
4	0	3	11	25	45	67	83	94	98	100	100
5	0	3	10	29	57	77	87	93	97	100	100
6	0	3	12	33	59	77	87	93	96	100	100
7	0	1	7	24	52	73	84	91	96	100	100
8	0	1	6	30	63	78	86	92	97	100	100
9	0	1	8	28	55	76	87	93	97	100	100
10	0	1	5	18	44	68	82	91	96	100	100
11	0	1	4	27	56	77	88	94	97	100	100
12	0	2	7	25	51	73	86	93	97	100	100
13	0	2	7	25	50	72	85	92	96	100	100
14	0	1	5	15	32	58	82	93	97	100	100
15	0	1	5	13	29	56	81	94	98	100	100
16	0	1	4	13	30	56	85	95	99	100	100
17	0	1	5	14	31	59	84	96	99	100	100
18	0	1	4	12	27	51	79	92	97	100	100
19	0	1	5	14	32	60	84	96	100	100	100
20	0	3	5	21	46	69	86	94	96	100	100
21	0	3	5	15	38	69	87	95	98	100	100
22	0	3	4	12	29	57	81	92	96	100	100
23	0	3	4	12	29	57	81	92	96	100	100
24	0	3	5	12	31	60	84	95	97	100	100
25	0	1	3	12	38	64	82	90	94	100	100
26	0	3	4	10	40	65	82	92	94	100	100
27	0	4	9	19	42	65	84	94	98	100	100
28	0	0	2	14	48	73	89	97	99	100	100
29	0	3	12	33	55	69	84	95	99	100	100
30	0	1	3	29	66	82	92	97	99	100	100
31	0	2	9	30	58	77	86	95	97	100	100
32	0	2	5	21	48	74	90	97	99	100	100
33	0	0	2	12	42	66	82	93	97	100	100

**Tabelle 10: Auswertung der Sieblinien bei 0/8**

Horizontal sind die Siebdurchgänge durch die jeweiligen Maschenweiten eingetragen. Vertikal werden alle Sieblinien der 33 Prüfzeugnisse aufgeführt.

0/8	d10	d30	d60	U	C	Proctordichte	optimaler Wassergehalt
1	0,063	0,563	1,640	26,0	3,06	2,01	11,1
2	0,165	0,429	1,063	6,4	1,05	1,80	10,0
3	0,571	1,054	1,865	3,3	1,04	1,78	9,7
4	0,227	0,625	1,682	7,4	1,02	2,00	9,0
5	0,250	0,518	1,150	4,6	0,93	2,00	9,0
6	0,208	0,464	1,056	5,1	0,98	1,80	10,6
7	0,295	0,601	1,367	4,6	0,90	1,89	9,8
8	0,291	0,500	0,955	3,3	0,90	1,85	7,8
9	0,275	0,537	1,238	4,5	0,85	1,90	9,0
10	0,346	0,731	1,667	4,8	0,93	1,92	8,0
11	0,315	0,552	1,190	3,8	0,81	1,87	10,0
12	0,292	0,596	1,409	4,8	0,86	1,88	9,2
13	0,292	0,600	1,455	5,0	0,85	1,91	8,3
14	0,375	0,941	2,077	5,5	1,14	1,87	9,6
15	0,406	1,031	2,148	5,3	1,22	1,92	8,6
16	0,417	1,000	2,154	5,2	1,11	1,87	9,6
17	0,389	0,971	2,036	5,2	1,19	1,94	7,0
18	0,438	1,100	2,375	5,4	1,16	1,96	5,9
19	0,389	0,944	2,000	5,1	1,15	1,87	9,6
20	0,331	0,682	1,622	4,9	0,87	1,92	11,0
21	0,375	0,826	1,710	4,6	1,06	1,94	10,0
22	0,449	1,041	2,090	4,7	1,15	1,93	9,0
23	0,449	1,041	2,090	4,7	1,15	1,93	9,0
24	0,429	0,974	2,000	4,7	1,11	1,94	10,0
25	0,444	0,846	1,846	4,2	0,87	1,89	9,7
26	0,500	0,833	1,800	3,6	0,77	1,87	9,6
27	0,275	0,739	1,783	6,5	1,11	1,89	9,7
28	0,417	0,735	1,480	3,6	0,88	1,87	7,0
29	0,208	0,464	1,370	6,6	0,76	1,96	9,0
30	0,316	0,511	0,919	2,9	0,90	1,78	11,0
31	0,262	0,500	1,105	4,2	0,86	1,89	10,2
32	0,322	0,663	1,458	4,5	0,94	1,85	8,2
33	0,450	0,800	1,750	3,9	0,81	1,87	7,0

**Tabelle 11: Berechnung von U und C anhand der Daten aus Tabelle 10**

Jedem Erdstoff werden seine Ungleichförmigkeitszahl, seine Krümmungszahl, sein optimaler Wassergehalt und seine Proctordichte zugeordnet.

Nachfolgend sind die 5 Sieblinien dargestellt, die jeweils zu den kleinsten und größten Krümmungswerten (C) in der 0/8er Körnungsgruppe gehören.

**Abbildung 40: Sieblinien der kleinsten 5 Krümmungswerte**

**Abbildung 41: Sieblinien der größten 5 Krümmungswerte**

**Abbildung 42: Vergleich der Sieblinien mit den größten und kleinsten Krümmungswerten**

Anhand der Abbildungen 40, 41 und 42 ist erkennbar, dass große Krümmungswerte durch eine bis zum 4er Sieb beinahe exponentiell ansteigende Sieblinie gekennzeichnet sind, während kleine Krümmungswerte eine eher logarithmisch verlaufende Sieblinie besitzen. Somit verlaufen die Sieblinien großer Krümmungswerte zunehmend stärker ansteigend und die Sieblinien kleiner Krümmungswerte zunehmend abflachend.

Nachfolgend sind die 5 Sieblinien dargestellt, die jeweils zu den kleinsten und größten Ungleichförmigkeitswerten in der 0/8er Gruppe gehören.

**Abbildung 43: Sieblinien der kleinsten 5 Ungleichförmigkeitswerte**

**Abbildung 44: Sieblinien der größten 5 Ungleichförmigkeitswerte**

### **Abbildung 45: Vergleich der Sieblinien mit den größten und kleinsten Ungleichförmigkeitswerten**

Anhand der Abbildungen 43, 44 und 45 ist gut erkennbar, dass große Ungleichförmigkeitswerte durch eine beinahe linear verlaufende Sieblinie gekennzeichnet sind, während kleine Ungleichförmigkeitswerte eine zunächst exponentiell und im weiteren Verlaufe eine eher logarithmisch ansteigende Sieblinie besitzen. Gestützt wird dieses Erkenntnis durch die Berechnungsformel des Ungleichförmigkeitswertes.

#### **Formel 01: Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl**

Die Sieblinien großer Ungleichförmigkeitswerte besitzen sehr große Körner im Bereich von  $d_{60}$  und sehr kleiner im Bereich  $d_{10}$ . Die Ungleichförmigkeitswerte bei 0/8 liegen zwischen 2,5 und 7,5. Damit ist die Varianz der Ungleichförmigkeitswerte im Bereich der Körnungsgruppe 0/8 im Vergleich zur Körnungsgruppe 0/32 wesentlich geringer.

### **8.3. Untersuchung und Bewertung der erhaltenen Ergebnisse anhand von Regressionsanalysen**

Um einen Zusammenhang zwischen den vorliegenden Daten zu erkennen, greift diese Diplomarbeit auf die Erstellung von unterschiedlichen Trendlinientypen zurück. Dabei wird versucht, alle auftretenden Werte in theoretischen Modellen zu erklären. Die Bewertung der Qualität dieser Modelle wird anhand von Regressionsanalysen vorgenommen. Dabei spielt vor allem das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  eine entscheidende Rolle. Es erklärt den Anteil der Daten, der sich durch die gefundene Trendliniengleichung erklären lässt. Ein Bestimmtheitsmaß von 0 bedeutet demzufolge, dass die erstellte Trendlinie die vorhandenen Daten gar nicht erklärt und ein Bestimmtheitsmaß von 1 beschreibt eine perfekte Erklärung jedes einzelnen Wertepaares durch die gefundene Trendlinie.

#### **8.3.1. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Krümmungswert**

Auf der nachfolgenden Seite und auf Abbildung 46 wird die Abhängigkeit der Proctordichte von den Krümmungswerten dargestellt und anhand der linearen Regressionsarten bewertet.

Die nachfolgende Abbildung enthält:

- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> alle Datensätze der Körnungsgruppe 0/8
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den Krümmungswerten
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> jeweils eine Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup>/<sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß

#### **Abbildung 46: Lineare Regression bei Krümmungswerten**

Die in Abbildung 46 dargestellte Punkteschar der Wertepaare (Krümmungswerte und Proctordichten) lassen sich durch keine Regressionsmethode erklären. Die Bestimmtheitsmaße liegen für sämtliche Regressionsarten bei nahe 0. In Abbildung 46 ist nur die lineare Regression dargestellt, da alle weiteren Regressionsmethoden zu ähnlichen grafischen Funktionen und Bestimmtheitswerten führen.

Anhand dieser Feststellung kann somit festgehalten werden, dass die vorliegenden Daten der Körnungsgruppe 0/8 keinen Zusammenhang der Krümmungszahl mit den dazugehörigen Proctordichten vermuten lassen.

Auffällig ist dabei, dass alle Krümmungswerte bei 0/8 im Bereich 0,7 bis 1,3 liegen und somit einen wesentlichen kleineren Streubereich aufweisen als die Krümmungswerte der Körnungsgruppe 0/32.

Abschnitt 10 beschäftigt sich auf Seite 80 näher mit den jeweiligen Eigenschaften der verschiedenen Körnungsgruppen.

### 8.3.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert

Auf den nachfolgenden Seiten in den Abbildungen 47 bis 51 wird die Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert dargestellt und anhand verschiedener Regressionsarten bewertet. Dabei werden fünf verschiedene Regressionsmethoden verwendet, die lineare Regression, die logarithmische Regression, die potenzielle Regression, die exponentielle Regression sowie die Regression mittels Polynom 2. Grades. Mit Hilfe dieser Daten wird für jede Regressionsart das jeweilige Bestimmtheitsmaß berechnet.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten:

- <sup>35</sup><sub>17</sub> Alle Datensätze der Körnungsgruppen 0/8
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den Ungleichförmigkeitswerten
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Jeweilige Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß zur Evaluierung der Daten

#### 8.3.2.1. Lineare Regression

#### Abbildung 47: Lineare Regression bei Ungleichförmigkeitswerten

### 8.3.2.2. Logarithmische Regression

**Abbildung 48: Logarithmische Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

### 8.3.2.3. Potenzielle Regression

**Abbildung 49: Potenzielle Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

#### 8.3.2.4. Exponentielle Regression

**Abbildung 50: Exponentielle Regression bei Ungleichförmigkeitswerten**

#### 8.3.2.5. Regression mittels Polynom 2. Grades

**Abbildung 51: Regression mittels Polynom 2. Grades bei Ungleichförmigkeitswerten**

### 8.3.2.6. Vergleich der Ergebnisse

Bei den Ungleichförmigkeitswerten der Körnungsgruppe 0/8 stellt sich ein ähnliches Bild wie bei den Ungleichförmigkeitswerten der Körnungsgruppe 0/32 ein. Je größer die Ungleichförmigkeitswerte werden, um so höher ist im Allgemeinen auch die Proctordichte des Erdstoffes. Weiterhin ist auffällig, dass die Bestimmtheitsmaße der Ungleichförmigkeitswerte bei 0/32 wesentlich größer sind als in der Körnungsgruppe 0/8. Während die Daten der Körnungsgruppe 0/32 zu Bestimmtheitsmaßen im Bereich von 0,512 bis 0,562 führen, liegen die Bestimmtheitsmaße der Körnungsgruppe 0/8 lediglich im Bereich 0,200 bis 0,244.

Diese Beobachtung führt zu der Schlussfolgerung, dass die Ungleichförmigkeitswerte bei der Körnungsgruppe 0/8 keinen so starken Einfluss auf die Proctordichten haben, wie es in der Körnungsgruppe 0/32 der Fall ist.

Im Abschnitt 8.4. wird versucht, das Bestimmtheitsmaß durch die Kopplung von Ungleichförmigkeitswerten mit Krümmungswerten zu erhöhen und somit genauere Modellbeschreibungen zu erhalten.

#### **8.4. Betrachtung der Doppelabhängigkeiten zwischen Krümmungswert und Ungleichförmigkeitswert**

Bei der Auswertung der Sieblinien bezüglich der größten und kleinsten Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte fällt auf, dass große Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte annähernd den gleichen Sieblinienverlauf besitzen. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte von einander abhängen.

#### **Abbildung 52: Abhängigkeit der Krümmungswerte von den Ungleichförmigkeitswerten**

Anhand von Abbildung 52 wird ersichtlich, dass sich mit zunehmenden Ungleichförmigkeitswerten auch die dazugehörigen Krümmungswerte eines Erdstoffes 0/8 erhöhen. Daraus ergibt sich für die weitere Betrachtung die Möglichkeit, die Doppelabhängigkeit der Proctorwerte von den Krümmungswerten- sowie den Ungleichförmigkeitswerten zu untersuchen. Es ist anzunehmen, dass sich die Genauigkeit infolge der Einbeziehung von mehreren Abhängigkeiten verbessert. Im folgenden Abschnitt wird versucht, diese Vermutung zu bestätigen.

Im Unterschied zur Körnungsgruppe 0/8 ist anzunehmen, dass die Verbesserungen der Genauigkeiten jedoch marginal ausfallen werden.

#### **8.4.1. Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes durch die Verbindung von Krümmungswert und Ungleichförmigkeitswert**

In Abschnitt 8.4. wurde gezeigt, dass Krümmungswerte und Ungleichförmigkeitswerte voneinander abhängen. Um diese Abhängigkeit zur Verbesserung der Genauigkeit bezüglich der Abhängigkeit der Proctorwerte von Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten zu verwenden, bietet es sich an einen neuen Wert, basierend auf den Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten, einzuführen. Es wird der Wert UC gewählt. Ihm liegt folgende Berechnungsformel zu Grunde:

##### **Formel 17: Berechnungsformel des theoretischen UC-Wertes**

Anspruch des UC-Wertes in dieser Arbeit ist es, den Bestimmtheitsgrad für die Abhängigkeiten der Proctordichten von den Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten zu verbessern, um so die Genauigkeit der Regressionsbeschreibungen zu verbessern. Die Berechnungsformel des UC-Wertes wurde so gewählt, dass Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte zu gleichen Teilen eingehen. Die Wurzel dient lediglich der Glättung der Werte. Auf der nachfolgenden Seite befindet sich die Berechnungsgrundlage der UC-Werte in Tabellenform.

<b>U</b>	<b>C</b>	<b>Proctordichte</b>	<b>UC-Wert</b>
6,4	1,05	1,80	2,60
3,3	1,04	1,78	1,85
7,4	1,02	2,00	2,75
4,6	0,93	2,00	2,07
5,1	0,98	1,80	2,23
4,6	0,90	1,89	2,04
3,3	0,90	1,85	1,72
4,5	0,85	1,90	1,95
4,8	0,93	1,92	2,11
3,8	0,81	1,87	1,75
4,8	0,86	1,88	2,04
5,0	0,85	1,91	2,06
5,5	1,14	1,87	2,51
5,3	1,22	1,92	2,54
5,2	1,11	1,87	2,40
5,2	1,19	1,94	2,50
5,4	1,16	1,96	2,51
5,1	1,15	1,87	2,43
4,9	0,87	1,92	2,06
4,6	1,06	1,94	2,20
4,7	1,15	1,93	2,32
4,7	1,15	1,93	2,32
4,7	1,11	1,94	2,27
4,2	0,87	1,89	1,90
3,6	0,77	1,87	1,67
6,5	1,11	1,89	2,69
3,6	0,88	1,87	1,76
6,6	0,76	1,96	2,23
2,9	0,90	1,78	1,62
4,2	0,86	1,89	1,91
4,5	0,94	1,85	2,06
3,9	0,81	1,87	1,78

**Tabelle 12: Berechnungsgrundlage des UC-Wertes**

### 8.4.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom UC-Wert

Auf den nachfolgenden Seiten und in den Abbildungen 53 bis 57 wird die Abhängigkeit der Proctordichte vom UC-Wert dargestellt und anhand verschiedener Regressionsarten bewertet. Dabei werden fünf verschiedene Regressionsarten verwendet, die lineare Abhängigkeit, die logarithmische Abhängigkeit, die potenzielle Abhängigkeit, die exponentielle Abhängigkeit sowie die Abhängigkeit beim Polynom 2. Grades. Mit Hilfe dieser Daten wird für jede Regressionsart ihr jeweiliges Bestimmtheitsmaß ermittelt.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten:

- <sup>35</sup><sub>17</sub> alle Datensätze der Körnungsgruppe 0/32
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Abhängigkeiten der Proctordichten von den UC-Werten
- <sup>35</sup><sub>17</sub> jeweils eine Regressionsbedingung inklusive beschreibender Funktion
- <sup>35</sup><sub>17</sub> Bestimmtheitsmaß

#### 8.4.2.1. Lineare Regression

#### Abbildung 53: Lineare Regression bei UC-Werten

#### **8.4.2.2. Logarithmische Regression**

**Abbildung 54: Logarithmische Regression bei UC-Werten**

#### **8.4.2.3. Potenzielle Regression**

**Abbildung 55: Potenzielle Regression bei UC-Werten**

#### **8.4.2.4. Exponentielle Regression**

**Abbildung 56: Exponentielle Regression bei UC-Werten**

#### **8.4.2.5. Regression mittels Polynom 2.Grades**

**Abbildung 57: Regression mittels Polynom 2. Grades bei UC-Werten**

#### 8.4.2.6. Vergleich der Ergebnisse

Im Gegensatz zur bisherigen Annahme, dass die Kombination von Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerten mit Hilfe des UC-Wertes die Genauigkeit der vorliegenden Untersuchungen erhöht, verschlechtert die Einbindung der Krümmungswerte das Bestimmtheitsmaß der Ungleichförmigkeitswerte. Daraus ist zu schlussfolgern, dass Krümmungswerte einen geringeren Einfluss auf die Proctordichten haben als Ungleichförmigkeitswerte.

Am Beispiel der Körnungsgruppe 0/8 ist sogar davon auszugehen, dass die Krümmungswerte keinerlei Einfluss auf die Proctordichte haben. Es ist feststellbar, dass die Körnungsgruppe 0/8 wesentlich kleinere Krümmungs- und Ungleichförmigkeitszahlen besitzt als die Körnungsgruppe 0/32. Daraus resultieren die ebenfalls kleineren UC-Werte.

## 8.5. Einbeziehung des Wassergehaltes

### Abbildung 58: Lineare Regression

Abbildung 58 zeigt, dass sich die Punkteschar der Wertepaare (optimaler Wassergehalt, Proctordichte) durch keine Regressionsart erklären lässt. Die Varianz der Werte ist zu hoch und das Bestimmtheitsmaß der linearen Funktion liegt bei 0,036, welches einer Unabhängigkeit der untersuchten Größen, optimaler Wassergehalt und Proctordichte, entspricht.

Festzuhalten ist hierbei, dass sich die optimalen Wassergehalte der Körnungsgruppe 0/8 im Bereich von 5,8% bis 11,0% bewegen und somit etwas höher liegen als die optimalen Wassergehalte in der Körnungsgruppe 0/32.

Aufgrund der Ungenauigkeiten der Wertepaare wird auf eine weitere Untersuchung der Wassergehalte in dieser Körnungsgruppe verzichtet.

## 9. Einbeziehung weiterer Körnungsgruppen

### 9.1. Betrachtung der Körnungsgruppe 0/45

Grundlage sind die Prüfzeugnisse aus Anhang 9.1\_01,0-45 bis Anhang 9.1\_20,0-45.

#### 9.1.1. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Krümmungswert

##### Abbildung 59: Lineare Regression bei Krümmungswerten

Abbildung 59 zeigt die Punkteschar der Wertepaare (Krümmungswert, Proctordichte) der 0/45 Körnungsgruppe.

Die Krümmungswerte liegen alle im Bereich von 1,0 bis 5,0 und sind damit im Maximum etwas größer als die Krümmungswerte der Körnungsgruppe 0/32. Jedoch ist anhand von Regressionsbedingungen kein Muster oder Trend innerhalb der Punkteschar erkennbar. In Abbildung 59 ist die lineare Trendlinie eingezeichnet. Sie besitzt ein Bestimmtheitsmaß von beinahe 0. Daraus folgt, dass auch in der Körnungsgruppe 0/45 kein Zusammenhang zwischen Krümmungswerten und Proctordichten anhand von Trendlinien erkennbar ist.

Auffällig ist, dass sich der Großteil der Wertepaare der Körnungsgruppe 0/45 im Bereich der Krümmungswerte 1,0 bis 3,0 befindet und lediglich 5 Datensätze größere Krümmungswerte als 3,0 aufweisen.

### 9.1.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert

#### Abbildung 60: Lineare Regression bei Ungleichförmigkeitswerten

Abbildung 60 zeigt die Punkteschar der Wertepaare (Ungleichförmigkeitswert, Proctordichte) der 0/45 Körnungsgruppe.

Die Ungleichförmigkeitswerte liegen im Bereich von 17 bis 72 und sind damit im Maximum etwas größer als die Ungleichförmigkeitswerte der Körnungsgruppe 0/32.

Wie bei allen vorhergegangenen Körnungsgruppen auch, liefert die Regression der Ungleichförmigkeitswerte hinreichende Indizien dafür, dass mit zunehmenden Ungleichförmigkeitswerten auch die Proctordichten ansteigen. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei dieser Körnungsgruppe zwar lediglich bei 0,180, dennoch weist die lineare Trendlinie vor allem im Bereich hoher Ungleichförmigkeitswerte auf gute Proctordichten hin.

Es ist davon auszugehen, dass die niedrigen Proctordichten unterhalb der Trendlinie auf weitere, externe Besonderheiten des jeweiligen Erdstoffes hindeuten. Näheres zu weiteren Einfluss- und Verfälschungsfaktoren wird in Abschnitt 10 auf Seite 80 beschrieben.

### 9.1.3. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom UC-Wert bei 0/45

#### Abbildung 61: Lineare Regression bei UC-Werten

Wie bereits in Abschnitt 8.1.3. vermutet wurde, kann man auch bei der Körnungsgruppe 0/45 erkennen, dass sich durch die Verbindung der Krümmungswerte mit den Ungleichförmigkeitswerten, die Bestimmtheitsmaße der Regressionsbedingungen merklich im Vergleich zu den Genauigkeiten bei alleiniger Betrachtung der Ungleichförmigkeitswerte verschlechtern. Abbildung 61 untermauert diese Vermutung, da die vorliegende Punkteschar durch keine Regressionsbedingung erklärt werden kann.

## 9.2. Betrachtung der Körnungsgruppe 0/4

Grundlage sind die Prüfzeugnisse aus Anhang 9.2\_01,0-4 bis Anhang 9.2\_12,0-4.

### 9.2.1. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Krümmungswert

#### Abbildung 62: Lineare Regression bei Krümmungswerten

Abbildung 62 zeigt die Punkteschar der Wertepaare (Krümmungswert, Proctordichte) der 0/4 Körnungsgruppe.

Die Krümmungswerte liegen alle im Bereich von 0,7 bis 1,3 und somit sind sie die kleinsten von allen 4 untersuchten Körnungsgruppen. Die Datenmenge im Bereich der Körnungsgruppe 0/4 ist zu klein, um auskräftige Trends erkennen zu lassen. Auffällig ist jedoch, dass auch hier mit zunehmenden Krümmungswerten die Proctordichten ansteigen. Desweiteren stellt die in Abbildung 62 beschriebene Funktion eine hinreichend genaue Tendenz dar. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,169 und liegt damit in etwa halb so hoch wie bei der Körnungsgruppe 0/32.

### 9.1.2. Untersuchung der Abhängigkeit der Proctordichte vom Ungleichförmigkeitswert

#### Abbildung 63:

Abbildung 63 zeigt die Punkteschar der Wertepaare (Ungleichförmigkeitswerte, Proctordichte) der 0/4 Körnungsgruppe.

Die Ungleichförmigkeitswerte liegen alle im Bereich von 2,7 bis 5,3. Die beschriebene Trendlinie deutet auch bei dieser Körnungsgruppe auf einen Zusammenhang der Ungleichförmigkeitswerte mit den Proctordichten hin. Die vorliegende Datenmenge lässt allerdings nur tendenzielle Prognosen zu.

## 10. Interpretation der Ergebnisse und Bedeutung der Diplomarbeit

Der Anspruch an die vorliegende Diplomarbeit war es, einen qualitativen, belegbaren Zusammenhang zwischen dem Korngefüge, dem Wassergehalt, sowie der erreichten Proctordichte aufzuzeigen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden über 300 Prüfzeugnisse aus etwa 50 verschiedenen Kieswerken ausgewertet und analysiert. Dabei dienten die Prüfzeugnisse als Datengrundlage für die durchgeführten Betrachtungen. Speziell wurden in dieser Arbeit die Körnungsgruppen 0/4, 0/8, 0/32 und 0/45 untersucht. Für jede Körnungsgruppe wurde die Abhängigkeit der Proctordichten von den Krümmungswerten, Ungleichförmigkeitswerten und Wassergehalten grafisch dargestellt und ausgewertet. Die jeweiligen Datenpaare wurden in Diagrammen in Form von Punktscharen dargestellt und mit Hilfe von Regressionsbedingungen und –analysen bewertet.

In allen vier Körnungsgruppen wurde festgestellt, dass die Proctordichten mit steigenden Krümmungs- und/oder steigenden Ungleichförmigkeitswerten tendenziell anstiegen. Diese Tendenz ließ sich jedoch nur anhand der Körnungsgruppe 0/32 mittels Regressionsanalyse in ausreichendem Maß belegen. Die Bestimmtheitsmaße bei den drei weiteren Körnungsgruppen lagen im vernachlässigbaren Bereich. Dennoch wiesen die Tendenzen immer einen positiven Zusammenhang zwischen Krümmungs- und/oder Ungleichförmigkeitswerten und Proctordichten auf. Für die Darstellung der Regressionsbedingungen wurden fünf verschiedene Regressionsarten gewählt: die lineare, die logarithmische, die potentielle, die exponentielle sowie die Regression mittels Polynom 2. Grades. Je nach Körnungsgruppe und Betrachtungsweise zeigten die Bestimmtheitsmaße der Regressionsarten kein typisches und nachvollziehbares Verhalten. Es ließ sich keine eindeutige Regressionsbedingung für alle Körnungsgruppen feststellen.

Allerdings ergab sich in der Körnungsgruppe 0/32 eine Abhängigkeit von Wassergehalten und Proctorwerten, die sich mittels einer Regression durch ein Polynom 3. Grades darstellen ließ. Ähnliche Abhängigkeiten von Wassergehalten und Proctordichten fanden sich bei keiner der anderen Körnungsgruppen. Jedoch unterschieden sich die Körnungsgruppen anhand der Streuungsbereiche der Wassergehalte. Desweiteren wurde bei der Körnungsgruppe 0/32 festgestellt, dass hohe Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte tendenziell hohe Wassergehalte aufweisen. Bei niedrigen Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten lag eine große Varianz der Wassergehalte vor.

Daraus folgt, dass große Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte zwangsweise hohe Wassergehalte erfordern. Dies ist im Korngefüge der Erdstoffe begründet. Bei der Auswertung der Sieblinien zeichneten sich große Krümmungs- und Ungleichförmigkeitswerte dadurch aus, dass ihre Körner im Bereich  $d_{10}$  und  $d_{30}$  eher einen kleinen Durchmesser aufweisen, wohingegen die Körner im Bereich  $d_{60}$  einen sehr großen Durchmesser haben. Daraus folgt unmittelbar die Erkenntnis, dass Erdstoffe derselben Körnungsgruppe ein unterschiedliches Korngefüge aufweisen können und sich somit auch in ihren Verdichtungseigenschaften unterscheiden. Festzuhalten ist, dass große Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte im Durchschnitt ein größeres Korn ( $d_{50}$ ) besitzen.

Die Vermutung des Zusammenhangs von Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerten mit der Proctordichte ist in dieser Diplomarbeit aufgrund der vergleichsweise geringen Datenmenge sowie einer fehlenden Selektion der verwendeten Daten vor der Auswertung nicht ausreichend belegbar. Die vorliegenden Daten wurden ohne jegliche Beachtung weiterer Kriterien, wie zum Beispiel Gesteinsart, Herkunftsort sowie Kornform, betrachtet. Durch eine diffizilere Auswertung der Daten weiterer Bodenparameter wären die Ergebnisse der Arbeit wahrscheinlich statistisch signifikant.

Die vorliegende Diplomarbeit kann zwar keinen belastbaren, mit Werten belegbaren Zusammenhang zwischen Korngefüge, Wassergehalt und Proctordichte bestätigen. Jedoch weist sie tendenziell auf bestehende Zusammenhänge hin. Bei einer weiterführenden Analyse größerer Datensätze und einer spezifischeren Auswahl der Daten sowie unter Berücksichtigung weiterer Kriterien, wäre eine genauere Analyse der bodenmechanischen Abhängigkeiten möglich.

Das Wissen über diese Zusammenhänge würde die qualitative Bewertung von Erdstoffen schon durch die Sieblinie zulassen. Es könnten bereits anhand der Ungleichförmigkeits- und Krümmungswerte Rückschlüsse auf die zu erreichenden Proctordichten gezogen werden, ähnlich wie es heute bereits bei dem Zusammenhang der Wassergehalte mit den Proctordichten möglich ist. Dies würde dazu führen, dass teure Proctorversuche lediglich zu Qualitätssicherungszwecken angewendet werden müssten. Desweiteren würde es möglich werden, die Proctordichten nichtbindiger Erdstoffe durch das gezielte Zugeben oder Aussieben bestimmter Korngruppenanteile zu maximieren.

Die vorliegende Diplomarbeit stellt dabei nur den ersten Schritt zur umfassenden Analyse der Zusammenhänge zwischen den bodenmechanischen Kennwerten dar.

