

**Prognose, Separation, Erfassung und Abrechnung des  
Bodenaushubs beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

der

**Fakultät für Bau- und**

**Umweltingenieurwissenschaften**

der

**Ruhr-Universität Bochum**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thorsten Weiner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, Ruhr-Universität Bochum  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz, Universität der Bundeswehr,  
München

Eingereicht am: 27.11.2017

Tag der mündlichen Prüfung am: 06.04.2018

---

## Vorwort und Dank

Die Idee zu der vorliegenden Arbeit entstand 2010 auf einer U-Bahn-Baustelle in Hamburg, bei der ich die Leitung des technischen Innendienstes verantworten durfte. In dieser Funktion oblag es mir, die wöchentlich an den AG zu übergebende Massenbilanz final zu prüfen. In dieser Bilanz wurden die Aushubmassen der eingesetzten flüssigkeitsgestützten Schildmaschine letztendlich dem Feststoffaustrag der Separieranlage gegenübergestellt. Trotz intensiver Bemühungen vieler ausgezeichnete Ingenieure verschiedener Disziplinen gelang es dabei nicht zufriedenstellend, nachvollziehbare, ausschließlich aus den gemessenen Werten abgeleitete Schlussfolgerungen zu generieren. Mit dem Idealismus, dieses Praxis-Problem nicht einfach hinnehmen zu wollen, begann ein langer, mitunter beschwerlicher Weg. Die vollumfängliche Lösung des Problems ist auch mit dieser Ausarbeitung noch nicht erreicht, allerdings wurde meiner Meinung nach erstmalig überhaupt eine Grundlage geschaffen sowie ein im Laufe der Bearbeitung identifizierter, zentraler Aspekt – die Dispergierung – ins Licht und damit Interesse der Tunnelbau-Fachwelt gerückt.

Auf dem Weg der Erstellung dieses Werkes parallel zu meiner zunehmend anspruchsvollen Tätigkeit als Tunnelbauer wurde ich glücklicherweise in vielfältiger Art und Weise unterstützt. Hierfür bin ich sehr dankbar.

Ganz besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes für die intensive wissenschaftliche Begleitung, die jederzeit gewährte Förderung und das offene, sehr vertrauensvolle Miteinander.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz danke ich sehr herzlich für das wissenschaftliche Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher danke ich für seine freundliche Bereitschaft zur Übernahme der Aufgaben des Vorsitzenden der Prüfungskommission und des fachfremden Prüfers.

Für die finanzielle wie ideelle Unterstützung durch die Firmen HOCHTIEF und PORR bedanke ich mich ausdrücklich. Insbesondere danke ich sehr herzlich Herrn Dipl.-Ing. Rainer Rengshausen und Herrn Dipl.-Ing. Claus Wirtz, die durch ihr Engagement diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht haben. Herrn Dr.-Ing. Bernd Schockemöhle gebührt ebenfalls ein besonderer Dank für die verlässliche Begleitung und Unterstützung sowie die stets hilfreichen, manchmal mahnenden Hinweise und Apelle.

Bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb möchte ich mich für die immer freundliche Aufnahme in ihrer Mitte sowie die durch ihr wissenschaftliches Interesse an meiner Arbeit ermöglichten konstruktiven Diskussionen bedanken. Besonders hervorzuheben ist hier Herr Dr.-Ing. Götz Vollmann – vielen herzlichen Dank fürs Sparring.

---

Bei „meinen“ Mitarbeitern – hervorzuheben sind hier vor allem Herr Manuel Fischdick und Herr Jörg Wieland – bedanke ich mich für ihre wissenschaftlichen Beiträge und die jederzeitige Bereitschaft zur Unterstützung – sei es die Übernahme von Kontroll- und Korrekturarbeiten oder die Hilfestellung bei Diagrammen, Abbildungen und Tabellen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie – meine Frau Katharina sowie meine Kinder Helena, Noah und Jakob mussten das ein oder andere Mal auf mich verzichten. Dennoch gab es nie Kritik, sondern jederzeit liebevollen Rückhalt und bedingungslose Unterstützung. Hieraus konnte ich wiederholt die Kraft schöpfen, den Weg letztendlich zu Ende zu gehen.

Essen, im Mai 2018

Thorsten Weiner

---

## Kurzfassung

In der Tunnelbaupraxis kommt dem Bodenmassenmanagement vor dem Hintergrund zunehmender ökologischer Anforderungen und abnehmender ökonomischer Gestaltungsspielräume eine wachsende Bedeutung zu. Dies trifft in besonderem Maße beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in feinkörnigem Baugrund zu, da durch die vielfältigen mechanischen und hydraulischen Einwirkungen auf den Bodenaushub der Umgang mit der Materie verhältnismäßig komplex ist.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit erstmalig der Prozess des Bodenmassenmanagements in einem ganzheitlichen Ansatz beschrieben, systematisiert und kategorisiert. Hierzu werden die einzelnen Prozessschritte in chronologischer Reihenfolge erläutert, beginnend mit der Prognose des Bodenaushubs, gefolgt von den Mechanismen zur Separation und Erfassung des Bodenaushubs und abschließend mit der in der Tunnelbaupraxis meist problematischen Abrechnung.

In allen Teilbereichen dieser Prozessschritte werden die maßgeblichen Schwachpunkte im System und die Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen dem theoretischen Ausbruch der Schildmaschine und dem tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage herausgearbeitet. Es wird deutlich, dass die Dispergierung eine besondere Rolle beim Bodenmassenmanagement spielt. Daher wird die Dispergierung in den Fokus dieser Arbeit gestellt. Es wird die Entwicklung und Durchführung eines neuen Versuches zur Feststellung der Dispergierungsneigung verschiedener Böden und Gesteine erläutert. Mit diesem Versuch kann erstmalig eine qualitative Beurteilung und damit Prognose der in der Tunnelbaupraxis zu erwartenden Dispergierung basierend auf nachvollziehbar und reproduzierbar ermittelten Versuchsergebnissen erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Einschätzung der Dispergierungsneigung auf Basis der in der Regel ohnehin im Vorfeld eines Tunnelbauprojektes zu ermittelnden charakteristischen Kennwerte für die Plastizität und die Konsistenz möglich.

Da es sich bei der in dieser Ausarbeitung behandelten Problematik um einen Themenkomplex aus der Praxis handelt, wird die Arbeit mit konkret formulierten Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis abgeschlossen in der Hoffnung, damit eventuell einen kleinen Beitrag zur Verbesserung der Kultur des Bauens zu leisten.

**Abstract**

In tunneling practice the meaning of soil management is becoming increasingly important against the background of rising ecological demands accompanied by declining economic possibilities. This is in particular true with regard to slurry shield tunneling in fine-grained soil because in this context dealing with the excavated soil is rather complex due to the fact that multiple mechanical and hydraulic impacts impinge on the soil.

Hence, for the first time the present work details, systemizes and classifies the process of soil management as a comprehensive approach. Therefore, each step of the process is described in chronological order, starting with the prognosis of the mass of excavated soil, followed by mechanisms for separation and recording of the actually excavated soil, concluded with invoicing which is usually problematic in tunneling practice.

With regard to each step and intermediate stages thereof significant shortcomings in the system and influencing factors of the discrepancy between the predicted mass of excavated soil in theory and the actually excavated mass of solid material are presented in detail. It becomes obvious that dispersion plays a significant role in the context of soil management which is why it has been made the focus of this work. The development and execution of a new testing method for the prediction of the dispersion of different soils is detailed. For the first time in tunneling practice this test allows for a qualitative assessment and therefore a prognosis of the expected dispersion based on quantitative values determined in a traceable and reproducible testing method. In addition the test allows for an estimation of the dispersion tendency based on figures which are usually collected anyway in the preliminary stages of a tunneling project for the plasticity and consistency.

Since the work deals with a topic resulting from practical experience it concludes with specific recommendations for tunneling practice hoping to provide a small contribution to improve the culture of constructing.

---

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank.....	I
Kurzfassung.....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen .....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Vorgehensweise .....	4
2 Prognose des Bodenaushubs .....	6
2.1 Geotechnische Voruntersuchungen .....	6
2.2 Ermittlung des theoretischen Bodenaushubs .....	9
2.3 Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage .....	10
3 Separation des Bodenaushubs .....	13
3.1 Auslegung und Betrieb der Schildmaschine .....	13
3.2 Auslegung und Betrieb der Separieranlage .....	15
3.2.1 Auslegung der Separieranlage in der Praxis.....	16
3.2.2 Einflüsse auf die Dimensionierung der Trenngeräte .....	18
3.2.3 Betrieb und wirtschaftliche Faktoren .....	21
4 Erfassung des Bodenaushubs.....	23
4.1 Automatisierte Volumenkontrolle .....	23
4.2 Messung des Feststoffaustrags der Separieranlage .....	26
4.3 Bilanzierung des Bodenaushubs .....	28

---

5	Abrechnung des Bodenaushubs .....	36
5.1	Grundlagen aus Gesetzen, Normen, Richtlinien und Empfehlungen.....	36
5.2	Übliche vertragliche Regelungen.....	40
6	Dispergierung .....	41
6.1	Grundlagen und Definition.....	44
6.1.1	Dispergierung in der mechanischen Verfahrenstechnik.....	44
6.1.2	Dispergierung in der Bodenkunde.....	45
6.1.3	Dispergierung im Tunnelbau .....	49
6.2	Laboruntersuchungen zur Feststellung der Dispergierungsneigung.....	50
6.2.1	Versuchsanordnung.....	56
6.2.2	Stellgrößen.....	63
6.2.3	Versuchsdurchführung.....	77
6.2.4	Ergebnisse .....	102
6.3	Fazit.....	151
7	Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis .....	156
7.1	Empfehlungen zu geotechnischen Voruntersuchungen .....	156
7.2	Empfehlungen zur spezifischen Verfahrenstechnik.....	158
7.2.1	Redundanz der messtechnischen Erfassung.....	158
7.2.2	Vorgehensweise zur Datenerfassung .....	159
7.2.3	Mögliche Auswertungssystematik.....	159
7.3	Empfehlungen zu vertraglichen Regelungen.....	161
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
9	Literaturverzeichnis .....	166

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel Suspensionskreislauf [34] .....	1
Abbildung 2: Prinzipskizze Abrechnungsproblematik .....	2
Abbildung 3: Handelsübliche Zentrifuge .....	22
Abbildung 4: Durchflussmesser [67] .....	24
Abbildung 5: Dichtemesser [67].....	25
Abbildung 6: Förderbandwaage [67].....	26
Abbildung 7: Relationswerte Homogenbereich 2.1 [67].....	31
Abbildung 8: Relationswerte Homogenbereich 2.3 [67].....	32
Abbildung 9: Systematisierung der Einflussfaktoren.....	41
Abbildung 10: Versuchsaufbau Pinhole Test nach ASTM D4647 [3].....	48
Abbildung 11: Hydraulischer Zerfallsindexversuch (li) und Radreifenversuch (re) [5]51	
Abbildung 12: Ergebnisse des hydraulischen Zerfallsindexversuchs [5] .....	51
Abbildung 13: Versuchskonzept nach Hollmann [40] .....	52
Abbildung 14: Diagramm mit Einschätzung zur Feinkornfreisetzung [40].....	53
Abbildung 15: Versuchsanordnung von Leshchinsky et al [43] .....	54
Abbildung 16: Versuchsergebnisse (Beispiel) von Leshchinsky et al [43] .....	54
Abbildung 17: Ratingsystem von Bell et al. [8] zur Identifikation dispersiver Böden .	55
Abbildung 18: Siebtrommelapparatur [1] .....	57
Abbildung 19: Probekörper Dispergierungsversuch .....	59
Abbildung 20: Veränderung Versuchsflüssigkeit .....	59
Abbildung 21: Probekörper nach Versuchsdurchführung .....	60
Abbildung 22: Bestimmung Dichte $\rho_{\text{sus},1}$ .....	61
Abbildung 23: Probekörper Würfel (links) und Quader (rechts) .....	66
Abbildung 24: Gegenüberstellung Würfel - Quader .....	67
Abbildung 25: Teilfüllung (links) und Vollfüllung (rechts) .....	70
Abbildung 26: Gegenüberstellung Bentonitsuspension - Leitungswasser .....	71
Abbildung 27: Gegenüberstellung Vollfüllung – Teilfüllung London Clay.....	73
Abbildung 28: Gegenüberstellung Vollfüllung – Teilfüllung Emschermergel.....	75
Abbildung 29: Korngrößenverteilung Emschermergel 1 [41] bzw. [42] .....	79
Abbildung 30: Erscheinungsbild Emschermergel 1 .....	80
Abbildung 31: Korngrößenverteilung Emschermergel 2 [41] bzw. [42] .....	80

---

Abbildung 32: Erscheinungsbild Emschermergel 2 .....	81
Abbildung 33: Korngrößenverteilung Berliner Mergel [41] bzw. [42].....	82
Abbildung 34: Erscheinungsbild Berliner Mergel .....	83
Abbildung 35: Korngrößenverteilung Glimmerton [9].....	84
Abbildung 36: Erscheinungsbild Glimmerton .....	85
Abbildung 37: Korngrößenverteilung London Clay [54] .....	86
Abbildung 38: Erscheinungsbild London Clay .....	87
Abbildung 39: Korngrößenverteilung London Chalk .....	88
Abbildung 40: Erscheinungsbild London Chalk .....	89
Abbildung 41: Herstellung Probekörper .....	90
Abbildung 42: Fotografische Dokumentation der Veränderung der Versuchsflüssigkeit (obere Reihe: vor Rotationsbeginn, mittlere Reihe: nach der Hälfte der Laufzeit, untere Reihe: nach Beendigung der Rotation).....	92
Abbildung 43: Turm genormter Analysesiebe.....	93
Abbildung 44: Siebrückstände .....	94
Abbildung 45: Versuchsprotokoll Seite 1 .....	96
Abbildung 46: Versuchsprotokoll Seite 2 .....	97
Abbildung 47: Beispiel Auswertungsdatei, 1. Abschnitt „Probendaten“ .....	98
Abbildung 48: Beispiel Auswertungsdatei, 2. Abschnitt „Kennwerte der Versuchsflüssigkeit vor Versuchsdurchführung“ .....	99
Abbildung 49: Beispiel Auswertungsdatei, 3. Abschnitt „Versuchsdurchführung“ .....	99
Abbildung 50: Beispiel Auswertungsdatei, 4. Abschnitt „Kennwerte der Versuchsflüssigkeit nach Versuchsdurchführung“ .....	100
Abbildung 51: Beispiel Auswertungsdatei, 5. Abschnitt „Versuchsergebnisse“ .....	100
Abbildung 52: Flowchart Ablauf Dispergierungsversuch .....	101
Abbildung 53: Stahlwürfel.....	104
Abbildung 54: Erscheinungsbild Kunstboden .....	105
Abbildung 55: Versuchsergebnisse Phase 1 Emschermergel 1 .....	106
Abbildung 56: Versuchsergebnisse Phase 1 Emschermergel 2 .....	107
Abbildung 57: Versuchsergebnisse Phase 1 Berliner Mergel .....	108
Abbildung 58: Versuchsergebnisse Phase 1 Glimmerton.....	109
Abbildung 59: Versuchsergebnisse Phase 1 London Clay .....	110
Abbildung 60: Versuchsergebnisse Phase 1 London Chalk .....	111
Abbildung 61: Einzelwerte Dispergierungsgrade .....	112

---

Abbildung 62: Mittelwerte Dispergierungsgrade .....	113
Abbildung 63: Versuchsergebnisse Phase 2 Emschermergel 1 – 20 Minuten.....	114
Abbildung 64: Ergebnisse Phase 2 Langzeitversuche (Einzelwerte) .....	115
Abbildung 65: Ergebnisse Phase 2 Langzeitversuche (Mittelwerte) .....	117
Abbildung 66: Versuchsergebnisse Phase 2 - destilliertes Wasser (Einzelwerte) ..	118
Abbildung 67: Versuchsergebnisse Phase 2 - destilliertes Wasser (Mittelwerte) ...	119
Abbildung 68: Versuchsergebnisse Phase 2 - Stahlwürfel (Einzelwerte) .....	120
Abbildung 69: Versuchsergebnisse Phase 2 - Stahlwürfel (Mittelwerte).....	122
Abbildung 70: Versuchsergebnisse Phase 2 - Kunstboden .....	123
Abbildung 71: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Emschermergel 1 .....	125
Abbildung 72: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Emschermergel 2 .....	126
Abbildung 73: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Berliner Mergel.....	127
Abbildung 74: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse London Clay .....	128
Abbildung 75: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse London Chalk .....	129
Abbildung 76: Scatterplots mit Regressionsgraden [41] .....	132
Abbildung 77: 1. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionsgraden [41] .....	133
Abbildung 78: 2. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionsgraden [41] .....	134
Abbildung 79: Scatterplots mit Regressionspolynom [41].....	135
Abbildung 80: 1. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionspolynom [41].....	136
Abbildung 81: 2. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionspolynom [41].....	137
Abbildung 82: Verklebungsdigramm nach Hollmann und Thewes [40].....	138
Abbildung 83: $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ (10min-Versuche) .....	139
Abbildung 84: $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ (20min-Versuche) .....	140
Abbildung 85: $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ (30min-Versuche) .....	140
Abbildung 86: Korngrößenverteilung Ton A.....	142
Abbildung 87: Korngrößenverteilung Ton B.....	142
Abbildung 88: Korngrößenverteilung Ton C.....	143
Abbildung 89: $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ (Industrieböden, 20min) .....	145
Abbildung 90: $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ (gesamt, 20min).....	145
Abbildung 91: Herleitung der Beurteilung von $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ ..	149
Abbildung 92: Beurteilung von $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ .....	150
Abbildung 93: Qualitative Beurteilung von $\alpha_{disp}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ .....	151
Abbildung 94: Einflüsse auf die Dispergierung in der Tunnelbaupraxis [66] .....	153
Abbildung 95: Vergleich Labor- und Praxis-Dispergierungsgrad .....	155

---

Abbildung 96: Ablaufschema des Dispergierungsversuches .....	156
Abbildung 97: Qualitative Beurteilung von $\alpha_{\text{disp}}$ in Abhängigkeit von $I_P$ und $I_C$ .....	157

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel Datenauswertung Förderbandwaage [60] .....	27
Tabelle 2: Ergebnisse Datenauswertung 1. Untersuchungsphase [67] .....	30
Tabelle 3: Ergebnisse Datenauswertung 2. Untersuchungsphase [61] .....	34
Tabelle 4: Übersicht über die identifizierten relevanten Einflussfaktoren.....	42
Tabelle 5: Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik nach Stieß [58]	44
Tabelle 6: Matrix erste Versuchsreihe in Anlehnung an [34].....	64
Tabelle 7: Matrix zweite Versuchsreihe [34] .....	65
Tabelle 8: Matrix dritte Versuchsreihe [34] .....	65
Tabelle 9: Charakteristische Bodenkennwerte Emschermergel 1 [41] bzw. [42] .....	79
Tabelle 10: Charakteristische Bodenkennwerte Emschermergel 2 [41] bzw. [42] ....	81
Tabelle 11: Charakteristische Bodenkennwerte Berliner Mergel [41] bzw. [42] .....	83
Tabelle 12: Charakteristische Bodenkennwerte Glimmerton [9] .....	85
Tabelle 13: Charakteristische Bodenkennwerte London Clay [54] .....	87
Tabelle 14: Charakteristische Bodenkennwerte London Chalk .....	89
Tabelle 15: Übersicht durchgeführte Versuche Phase 1 .....	103
Tabelle 16: Übersicht durchgeführte Versuche Phase 2 .....	105
Tabelle 17: Versuchsergebnisse Phase 2 – Langzeitversuche .....	116
Tabelle 17: Versuchsergebnisse Phase 2 – Stahlwürfel.....	121
Tabelle 18: Korrelationskoeffizienten [41].....	131
Tabelle 19: Praxisböden Ausgangsdaten multivariate Analyse .....	139
Tabelle 20: Versuchsprogramm Industrieböden .....	144
Tabelle 21: Industrieböden Ausgangsdaten multivariate Analyse .....	144
Tabelle 22: Qualitative Bewertung der Dispergierungsneigung .....	147
Tabelle 23: Qualitative Prognose der Dispergierungsneigung.....	148
Tabelle 24: Qualitative Prognose der Dispergierungsneigung.....	157
Tabelle 25: Ergebnisse Datenauswertung 1. Untersuchungsphase [67] .....	160

## Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

$\alpha_{\text{disp}}$	Dispergierungsgrad [%]
$\Delta\rho_{\text{Sus}}$	Dichteunterschied vor und nach Versuchsdurchführung [g/cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)
$\varphi$	Aufladung der Suspension mit Feststoffen [%]
$\rho$	Feuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{d}}$	Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Dichte von Wasser [g/cm <sup>3</sup> ] (Protokoll Dispergierungsversuch)
$\rho_{\text{Sus}, 0}$	Dichte der Suspension vor Versuchsdurchführung [g/cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)
$\rho_{\text{Sus}, 1}$	Dichte der Suspension nach Versuchsdurchführung [g/cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)
#	Nummer
°C	Grad Celsius
ASTM	American Society for Testing and Materials
BM	Berliner Mergel
BVergG	Bundesvergabegesetz
d	Korndurchmesser [mm]
D	Dauer [min]
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FBW	Förderbandwaage
g	Gramm
GWB	Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen
$I_{\text{di}}$	Index der Zerfallsbeständigkeit (Siebtrommelversuch)
$I_{\text{c}}$	Konsistenzzahl [-]
$I_{\text{p}}$	Plastizitätszahl [%]
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
m	Meter
$m_0$	Ausgangsmasse der feuchten Probe (Dispergierungsversuch)
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
$m_{\text{d}0}$	Trockenmasse der Gesteinsprobe vor Versuchsbeginn (Siebtrommelversuch)
$m_{\text{di}}$	Trockenmasse der Gesteinsprobe nach Zyklus i (Siebtrommelversuch)
$m_{\text{disp}}$	Masse des dispergierten Bodens [g] (Dispergierungsversuch)
min	Minute
m/sec	Meter pro Sekunde
$m_{\text{Sr}}$	Masse des Siebrückstandes >0,071mm [g] (Dispergierungsversuch)
$M_{\text{Sus}, 0}$	Masse der Suspension vor Versuchsdurchführung [g] (Dispergierungsversuch)
$M_{\text{Sus}, 1}$	Masse der Suspension nach Versuchsdurchführung [g]

---

	(Dispergierungsversuch)	
$M_{\text{Sus},1,\text{gem}}$	Gemessener Wert der Masse der Suspension nach Versuchsdurchführung [g] (Dispergierungsversuch)	
$m_{\text{T}}$	Masse der Siebtrommel	
$m_{\text{TR}}$	Masse des Trommelrückstandes [g] (Dispergierungsversuch)	
mm	Millimeter	
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule	
S	Sand	
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein	
T	Temperatur [°C] (Protokoll Dispergierungsversuch)	
T	Ton	
to	Tonne	
TVM	Tunnelvortriebsmaschine	
U	Schluff	
$V_{\text{A}}$	Zeitabhängiges Ausbruchvolumen [m <sup>3</sup> /h]	
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen	
$V_{\text{Dichteglas}}$	Volumen des Pyknometers [cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)	
$V_{\text{S}}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	
$V_{\text{Sus},0}$	Volumen der Suspension vor Versuchsdurchführung [cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)	
$V_{\text{Sus},1}$	Volumen der Suspension nach Versuchsdurchführung [cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)	
$V_{\text{Sus},1,\text{gel}}$	Abgelesener Wert des Volumens der Suspension nach Versuchsdurchführung [cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)	
$V_{\text{Sus},1,\text{gem}}$	Gemessener Wert des Volumens der Suspension nach Versuchsdurchführung [cm <sup>3</sup> ] (Dispergierungsversuch)	
w	Wassergehalt [%]	
$w_{\text{L}}$	Fließgrenze [%]	
$w_{\text{n}}$	Natürlicher Wassergehalt [%]	
$w_{\text{P}}$	Ausrollgrenze [%]	
ZTV ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten	

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung und Problemstellung

Der Bodenaushub beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb wird auf dem Weg vom Schneidrad bis zum Austrag aus der Separieranlage (siehe Abbildung 1) verschiedenen Einflüssen ausgesetzt. Die Eigenschaften des Bodens werden mehrfach verändert. Zunächst erfolgt in der Abbaukammer die Vermischung mit der Stützflüssigkeit, anschließend wird diese Mischung durch in der Regel kilometerlange Rohrstränge gepumpt, bis dann abschließend die verschiedenen Stufen der Trennung in der Separieranlage folgen. Hierbei entstehen mechanisch verursachte Veränderungen des Bodens ebenso wie sich bei bindigen Böden beispielweise Einflüsse aus Verklebungserscheinungen und unterschiedlichem Dispergierungsverhalten einstellen.



Abbildung 1: Beispiel Suspensionskreislauf [34]

Die Auslegung der Separieranlage erfolgt auf Basis der im Vorfeld durch mehr oder weniger umfangreiche Erkundungsprogramme ermittelten Bodenkennwerte sowie auf Basis wissenschaftlich nicht fundierter Erfahrungswerte. Auch die im Rahmen der Angebotsbearbeitung durchzuführende Ermittlung der voraussichtlich abzutransportierenden und in der Regel zu entsorgenden Bodenmassen baut auf diesen Kenn- und Erfahrungswerten auf. Auf der gleichen Basis erfolgt die Einstellung der in die Maschinenteknik der Tunnelvortriebsmaschine (TVM) implementierten Messtechnik zur Echtzeitanzeige der abgebauten Bodenmassen. Dementsprechend sind alle in diesem Zusammenhang ermittelten Arbeitsergebnisse mit Ungenauigkeiten behaftet. Auf diese ungenauen Daten stützt sich dann während der Projektabwicklung das jeweilige Bodenmassenmanagementsystem, das wiederum die Grundlage für die Abrechnung der Bodenentsorgungsleistungen darstellt sowie mitunter auch für die Beurteilung von Ursachen für Setzungs- oder Verbrucherscheinungen herangezogen wird. In Bezug auf die Abrechnung ergibt sich noch das zusätzliche Problem, dass ein Spannungsfeld in der Form existiert, dass in der Regel der Bodenabbau nach Volumen und die Abfuhr nach Masse vergütet wird (siehe Prinzipskizze in Abbildung 2).

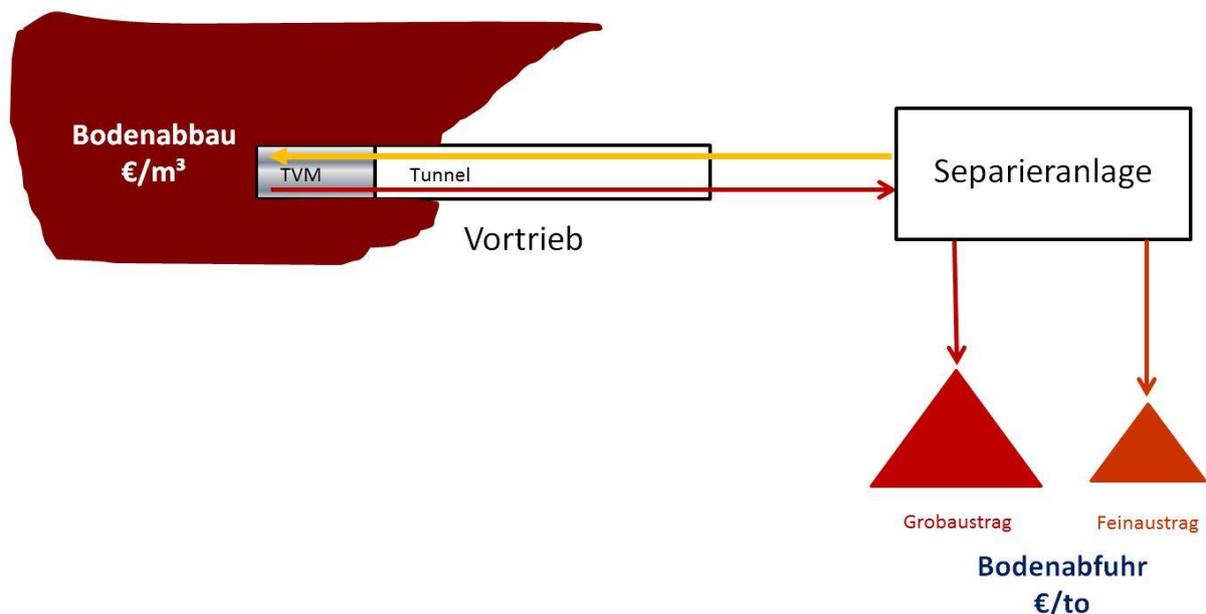


Abbildung 2: Prinzipskizze Abrechnungsproblematik

Im klassischen Einsatzbereich der flüssigkeitsgestützten Schildvortriebe – also in rolligen Böden – ist die Problematik bei weitem nicht so ausgeprägt wie bei einem

---

Einsatz in bindigen Böden oder Gestein mit hohem Feinkornanteil. Da sich allerdings die Einsatzbereiche der flüssigkeitsgestützten Schildvortriebe mit denen der erddruckgestützten zunehmend überlagern, wird in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit ein Fokus auf eben diese nicht klassischen Einsatzbereiche gelegt.

## **1.2 Zielsetzung**

Grundsätzlich ist das Ziel dieser Untersuchungen, eine erste wissenschaftlich fundierte Basis für den Prozess des Bodenmassenmanagements in Bezug auf den flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in feinkörnigen Böden zu schaffen. Hierzu soll dieser Prozess erstmalig ganzheitlich beschrieben, systematisiert und kategorisiert werden. Außerdem sollen die jeweiligen Schwachstellen bzgl. des Zusammenhangs zwischen dem Ausbruch der Schildmaschine und dem Feststoffaustrag der Separieranlage identifiziert werden. Anstatt in den verschiedenen Stufen des Bodenmassenmanagements weiterhin mit Schätz- und Erfahrungswerten zu operieren, soll für zukünftige Projekte auf objektive, nachvollziehbare und reproduzierbare Kennwerte zurückgegriffen werden können. Eine wichtige Rolle kommt hierbei der Dispergierung zu, für die als Schwerpunkt dieser Arbeit ein Simulationsversuch entwickelt und validiert werden soll, der eine qualitative Beurteilung und damit Prognose der Dispergierungsneigung des zu durchörternden Baugrunds ermöglicht. Idealerweise sollen auch Zusammenhänge der Dispergierung zu üblichen charakteristischen Bodenkennwerten aufgedeckt werden. Außerdem sollen Wege aufgezeigt werden, um Konflikte in der Projektabwicklung zu reduzieren bzw. idealerweise zu vermeiden. Schlussendlich sollen aus den untersuchten Aspekten konkrete Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis abgeleitet werden. Der Sinn dieser Ziele liegt langfristig darin, die Auslegung von Separieranlagen ökologischer und wirtschaftlicher gestalten zu können, die Prognose des Feststoffaustrags von Separieranlagen im Tunnelbau zu präzisieren, idealerweise auch die Echtzeitanzeige des Bodenaushubs auf der TVM zu verbessern, die Systematik für das Bodenmassenmanagement zu vereinheitlichen und realistischer gestalten zu können sowie die vertraglichen Regelungen zur Abrechnung der Bodenaushubsleistungen konfliktärmer gestalten zu können.

---

### 1.3 Vorgehensweise

Voraussetzung für die Zielerreichung ist zunächst, die einzelnen den Oberbegriff „Bodenmassenmanagement“ ausmachenden Prozessschritte zu identifizieren und zu kategorisieren.

Der erste dieser Schritte ist die in Kapitel 2 behandelte Vorgehensweise zur Prognose des Bodenaushubs. Diese lässt sich wiederum unterteilen in die Kategorien „Geotechnische Voruntersuchungen, Ermittlung des theoretischen Bodenaushubs und Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage“.

In Kapitel 3 wird die Separation des Bodenaushubs als nächster Prozessschritt des Bodenmassenmanagements erläutert. Hier spielen sowohl die Auslegung als auch der Betrieb von der Schildmaschine und von der Separieranlage die entscheidenden Rollen.

Um die Erfassung des Bodenaushubs geht es in Kapitel 4. Hier wird die aktuelle Tunnelbaupraxis beschrieben, wobei zwischen der automatisierten Volumenkontrolle unter Einsatz von Dichte- und Durchflussmessern, der Messung des Feststoffaustrags der Separieranlage mit Förderbandwaagen und der letztendlichen Bilanzierung des Bodenaushubs unterschieden wird. Die Qualität der derzeit erreichbaren Volumen- und Massenbilanz wird anschaulich anhand der Ergebnisse von durchgeführten projektspezifischen Datenauswertungen erläutert.

Kapitel 5 ist der Abrechnung des Bodenaushubs gewidmet, wobei zunächst die im deutschsprachigen Raum Anwendung findenden Grundlagen aus Gesetzen, Normen, Richtlinien und Empfehlungen aufgeführt werden. Anschließend werden übliche vertragliche Regelungen zur Abrechnung zusammengestellt.

In all diesen Prozessschritten werden die maßgeblichen Schwachpunkte und Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen dem theoretischen Ausbruch der Schildmaschine und dem tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage herausgearbeitet. Es wird deutlich, dass bei diesem Zusammenhang der Dispergierung eine besonders gewichtige Rolle zuteilwird.

Daher wird die Dispergierung im zentralen Kapitel 6 dieser Ausarbeitung vollumfänglich beleuchtet. Nach der Darstellung der für den Tunnelbau relevanten Grundlagen und einer Definition wird die Entwicklung und Durchführung eines neuen

Versuches zur Feststellung der Dispergierungsneigung verschiedener Böden und Gesteine erläutert. Die Ergebnisse von über 270 Versuchen werden vorgestellt und analysiert. Das Kapitel wird mit einer Tabelle und einem Diagramm zur qualitativen Prognose der in der Tunnelbaupraxis zu erwartenden Dispergierung sowie mit einem Modell zur quantitativen Übersetzung des Dispergierungsgrades aus dem Labor in die Praxis abgeschlossen.

In Kapitel 7 werden basierend auf den Ergebnissen dieser Ausarbeitung Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis formuliert.

Mit der kurzen Zusammenfassung und dem Ausblick in Kapitel 8 wird diese Arbeit abgeschlossen.

## 2 Prognose des Bodenaushubs

Zur Prognose des Bodenaushubs beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb werden in der Regel drei aufeinander aufbauende Prozessschritte durchgeführt. Hierbei handelt es sich zunächst um die geotechnischen Voruntersuchungen, dann folgt die rechnerische Ermittlung des theoretischen Bodenaushubs. Zum Abschluss wird der zu erwartende Feststoffaustrag der Separieranlage vorhergesagt. Die Prozessschritte werden im Folgenden detailliert erläutert, wobei ein Schwerpunkt beim Aufzeigen der jeweiligen Schwachstellen sowie der damit verbundenen Herausarbeitung besonders relevanter Einflussfaktoren auf die untersuchte Problematik gesetzt wird.

### 2.1 Geotechnische Voruntersuchungen

Im Zuge der Projektierung eines Tunnelbauvorhabens ist die Erstellung des Baugrundgutachtens von zentraler Bedeutung. Die europäische Normung umsetzend besteht das Baugrundgutachten aus dem Boden- oder Felsgutachten, dem Grundbaugutachten und dem Tunnelbaugutachten [52]. Hierbei existieren wechselseitige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Gutachten, wobei die Grundlagen aller weitergehenden Interpretationen und Festlegungen im Boden- oder Felsgutachten zu finden sind. Bei Projekten, bei denen der flüssigkeitsgestützte Schildvortrieb zum Einsatz kommt, wird ein Bodengutachten erstellt, in dem zunächst die allgemeine geologische und hydrogeologische Situation erläutert wird. Weiterhin wird der Baugrund hinsichtlich seiner Beschaffenheit und des anstehenden Grundwassers sowie unter Berücksichtigung etwaiger vorhandener geogener Belastungen beschrieben. Außerdem werden Umfang und Ergebnisse der geotechnischen Voruntersuchungen bestehend aus Feld- und Laborversuchen aufgeführt.

Die Basis sowohl für die Beschreibung der Bodenverhältnisse als auch für die Bestimmung von Kennwerten mit Feld- und Laborversuchen stellt das Untersuchungsprogramm dar. Der DAUB [14] empfiehlt hier ein möglichst ausreichendes Netz von Aufschlussbohrungen mit Kerngewinnung. Nach DIN EN 22475 [30] sind Ramm-Kernbohrungen und bei den hier im Mittelpunkt stehenden bindigen Böden auch Rotations-Kernbohrungen geeignet, um die nach

---

DIN EN 1997 [29] z. B. für die Dichtebestimmung im Labor erforderliche Güteklasse 2 der Bodenproben zu gewährleisten.

In Bezug auf die mit diesem Beitrag untersuchte Problemstellung lassen sich bei den geotechnischen Voruntersuchungen zwei Schwachstellen diagnostizieren:

### 1. Art und Umfang des Untersuchungsprogramms

Die wenig konkrete DAUB-Empfehlung, „ein möglichst ausreichendes Netz von Aufschlussbohrungen mit Kerngewinnung“ zu schaffen, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es nicht immer möglich ist, die richtigen Aufschlussverfahren an den richtigen Stellen zum Einsatz zu bringen. Dies wiederum kann mit technischen Unzulänglichkeiten der Kerngewinnungsmethoden ebenso begründet werden wie mit Hindernissen an der Oberfläche oder wirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Abschätzungen. Resultierende Tatsache ist allerdings, dass die Grundlage für alle weitergehenden Berechnungen, Untersuchungen und Vergleiche mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet ist. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn mit Hilfe der im Baugrundgutachten angegebenen Parameter „Soll-Werte“ ermittelt werden, deren Erreichung letztlich als Maßstab für eine erfolgreiche Projektabwicklung angesehen wird.

### 2. Schwierigkeit der Identifikation aussagekräftiger Kennwerte

Für bindige Böden werden in der Regel die folgenden charakteristischen Kennwerte ermittelt:

- Korngrößenverteilung
- Konsistenzgrenzen
- Kalkgehalt
- Tonmineralogie
- Wassergehalt
- Dichte / Wichte
- Druckfestigkeit
- Scherfestigkeit
- Durchlässigkeit

Außerdem werden aus diesen ermittelten Werten meist noch die folgenden Kennwerte abgeleitet:

- Plastizitätszahl
- Konsistenzzahl
- Porenanteil

Trotz der Vielzahl der Kennwerte stellt es sich als äußerst schwierig heraus, die für die untersuchte Fragestellung aussagekräftigen Kenngrößen zu identifizieren. Bisher konnte noch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Kennwerten und den am Ende des Vortriebs- und Separationsprozesses anfallenden Bodenmassen sowie deren Verteilung und Beschaffenheit hergestellt werden.

Allerdings lassen sich die Korngrößenverteilung und die Dichte / Wichte hervorheben, da sie in mehreren Prozessschritten im Umgang mit dem Bodenaushub bzw. allgemeiner formuliert beim Bodenmassenmanagement verwendet werden.

#### *Korngrößenverteilung*

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung ist in der DIN-Norm 18123 [22] geregelt. Gemäß dieser Norm „beschreibt die Korngrößenverteilung den Boden aufgrund der geometrischen Ausdehnung seiner Bestandteile und deren Massenanteile. Sie dient als Grundlage für Beurteilungs- und Anwendungskriterien von Böden. Sie lässt Rückschlüsse auf bestimmte bodenmechanische Eigenschaften zu“.

Die Korngrößenverteilung kann durch Siebung, durch Sedimentation oder durch eine Kombination von Siebung und Sedimentation bestimmt werden.

#### *Dichte / Wichte*

In den beiden Teilen der DIN-Norm 18125 wird die Bestimmung der Dichte – zum einen in Teil 1 [23] mittels Laborversuchen, zum anderen in Teil 2 [24] mittels Feldversuchen – geregelt. In beiden Teilen der Norm wird darauf verwiesen, dass die Wichte aus der mit Hilfe der vorgestellten Vorgehensweisen ermittelten Dichte des Bodens errechnet wird. Die Dichte des Bodens wird als „Masse der feuchten Probe, bezogen auf das Volumen der Probe einschließlich der mit Wasser und Luft gefüllten Poren“ definiert.

## 2.2 Ermittlung des theoretischen Bodenaushubs

Zur Ermittlung der theoretisch abzubauenen Bodenmassen wird zunächst das Volumen des Ausbruchskörpers bestimmt. Hierzu wird die Vortriebsstrecke basierend auf dem geologischen Längsschnitt in Abschnitte mit gleichbleibenden Eigenschaften unterteilt. Bei diesen Abschnitten handelt es sich zum einen um echte Homogenbereiche, in denen die Bodeneigenschaften über den ganzen Querschnitt einheitlich prognostiziert werden (Fullface), zum anderen um Bereiche, in denen mehrere Bodenarten in unterschiedlicher Verteilung über den Querschnitt erwartet werden (Mixedface).

In Fullface-Abschnitten wird zur Volumenermittlung die Querschnittsfläche mit Hilfe der Kreisformel ermittelt, in Mixedface-Abschnitten werden für die einzelnen Bodenarten die anteiligen Querschnittsflächen z.B. mit Hilfe einer Kreissegmentformel berechnet.

Die Multiplikation der Kreis- oder Kreisabschnittsflächen mit den jeweiligen Tunnelabschnittslängen ergibt dann die theoretischen Ausbruchvolumina. Diese werden abschließend mit den im Bodengutachten enthaltenen Dichten multipliziert, um die abzubauenen Bodenmassen zu erhalten.

Mit Blick auf die untersuchte Thematik stellt die Unschärfe der so ermittelten Volumen- und Massenwerte ein Problem dar. Zum einen gibt es geometrische Ungenauigkeiten, die auf der unzureichenden Kenntnis der Tunnelabschnittslängen und der Verteilung der einzelnen Schichten im Querschnitt sowie auf der Tatsache, dass sich der Tunneldurchmesser in der Realität schon allein infolge des zu erwartenden Werkzeugverschleißes variabel gestaltet, beruhen. Zum anderen werden für die Dichten im Baugrundgutachten in der Regel keine exakten singulären Werte, sondern Bereiche angegeben. Allein durch diese Bereichsangaben sind signifikante Abweichungen vom Mittelwert die Folge. Bei dem Projekt U4 in Hamburg wurde beispielsweise eine Bandbreite der Abweichungen in Höhe von  $\pm 4,5\%$  ermittelt [60].

Zum Thema Verschleiß existieren zwar umfangreiche Abhandlungen sowohl aus der Praxis als auch aus Wissenschaft und Forschung, der Übertrag auf das hier untersuchte Thema ist bisher allerdings noch nicht erfolgt.

Die sich aufdrängende Frage, inwieweit sich eine technische oder ingenieurmäßige Verbesserung bzgl. der identifizierten Problematik erreichen ließe, würde zu weit führen und zwangsläufig den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Hierzu müssten die grundsätzlichen Fragestellungen zu den Ausmaßen und erreichbaren Genauigkeiten der geotechnischen Voruntersuchungen ebenso diskutiert werden wie die nach wie vor nicht endgültig geklärten Phänomene rund um das Thema Verschleiß. Allerdings ist es wichtig, sich der Problematik vor allem bei der im Kapitel 4.3 behandelten Bilanzierung des Bodenaushubs bewusst zu sein. Außerdem kann für die Praxis durchaus eine Verbesserung bzgl. des Umgangs mit den Unschärfen aufgezeigt werden, und zwar im Rahmen der vertraglichen Regelungen (siehe Kapitel 7.3).

### **2.3 Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage**

Zur Vorhersage des Feststoffaustrags im Rahmen der Angebotsbearbeitung werden in der Regel zunächst die Trennschnitte der Separieranlage basierend auf den im Bodengutachten angegebenen Korngrößenverteilungen, der zur Verfügung stehenden Separationstechnik und Erfahrungswerten festgelegt. Von zentraler Bedeutung ist hierbei der Trennschnitt zur Separation der Feinanteile, da es in der Regel schwieriger und damit kostspieliger ist, diese Feinanteile von der Suspension zu trennen und einer Deponierung oder Weiterverwendung zuzuführen.

Anschließend wird abgeschätzt, wie hoch der Anteil der Feinanteile sein wird, der aufgrund von Anheftungen und Zusammenballungen (Agglomerate und Konglomerate) bereits von den Bestandteilen der Separieranlage abgeschieden wird, die eigentlich für gröbere Fraktionen vorgesehen sind. Zusätzlich oder alternativ – abhängig von den jeweiligen Erfahrungswerten bzgl. der zu beurteilenden Geologie – wird die Größenordnung der Dispergierung abgeschätzt.

Im nächsten Schritt werden die Trennschnitte auf die im Bodengutachten enthaltenen Kornverteilungskurven bzw. –bänder der einzelnen Bodenarten in der Form angewendet, dass sich für jede Bodenart und jeden Trennschnitt ein relativer Anteil ergibt. Bei dem Prozentwert der Abtrennung der Feinanteile wird der Agglomerats- / Konglomerats-Anteil abgezogen und der Summe der Prozentwerte der übrigen Trennschnitte zugeschlagen.

Die Prozentwerte werden dann auf die ermittelten theoretischen Ausbruchvolumina angewendet, so dass sich für jede Bodenart ein Volumen für die Feinanteile und ein Volumen für die Summe der gröberen Fraktionen ergibt.

Diese Volumina werden außerdem mit Schätz- bzw. Erfahrungswerten bzgl. einer möglichen Wassergehaltsveränderung oder mit einem Auflockerungsfaktor beaufschlagt sowie mit geschätzten Dichten multipliziert, um schlussendlich die Massen des Feststoffaustrags der Separieranlage zu ermitteln.

Auch wenn es sich bei der Verwendung der aufgeführten Schätz- und Erfahrungswerte um eine nachvollziehbare, ingenieurtechnische Annäherung an die Realität handelt, so ist das Vorgehen in dem hier untersuchten Zusammenhang aufgrund der zwangsläufig vorhandenen Unschärfe und dem möglichen Interpretationsspielraum problematisch.

Als relevante Einflussfaktoren auf diesen Zusammenhang lassen sich in diesem Prozessschritt die Agglomerats- / Konglomeratsbildung, die Dispergierung, die Auflockerung und die Wassergehaltsänderung hervorheben.

#### *Agglomerats- und Konglomeratsbildung*

Agglomerate und Konglomerate stehen im Zusammenhang mit der Separierung bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben in enger Verbindung mit der Dispergierung. Unter Agglomeraten werden in der Tunnelbaupraxis Anheftungen feiner Bodenpartikel an gröbere Fraktionen verstanden, unter Konglomeraten Zusammenballungen etwa gleichgroßer Partikel. Durch diese Anheftungen oder Zusammenballungen dispergiert ein gewisser Anteil der feinen Bodenpartikel nicht, sondern wird auf Grund der sich in der Regel einstellenden Größe bereits über die Grobsiebe der Separieranlage abgeschieden. Hierdurch wird sowohl die Auslegung der Separieranlage als auch die Verteilung des Feststoffaustrages beeinflusst.

Verschiedene Ansätze zur Quantifizierung des Anteils der Agglomerate und Konglomerate haben bisher nicht zum Erfolg geführt. So wurde beispielsweise im Rahmen eines unter Anleitung des Autors auf einer Tunnelbaustelle durchgeführten Experimentes untersucht, ob es unter Einsatz von Videosensorik gelingt, den Anteil der Agglomerate und Konglomerate auf dem Grobsieb zu identifizieren und zu quantifizieren. Problematisch war hierbei insbesondere die Kontrolle bzw. „Eichung“

der mittels Video und Zählung erfassten „Knollen“. Außerdem war auch das Identifizieren und Zählen selbst durch einen Mitarbeiter mit Unsicherheiten behaftet. Inwieweit hier bereits z.B. im Bergbau bzw. in der Rohstoffgewinnung erprobte Videosensorik-Software bessere Ergebnisse liefern würde, konnte aufgrund des Fortschritts der Tunnelbauarbeiten nicht mehr überprüft werden. Weitergehende Überlegungen und Untersuchungen in diese Richtung sollten daher in zukünftigen Forschungsvorhaben angestellt werden.

### *Dispergierung*

Unter „Dispergierung“ wird bisher in dem Kontext der Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage in der Tunnelbau-Praxis umgangssprachlich formuliert das „Auflösen“ oder das „in Lösung gehen“ des Bodens in der Stützflüssigkeit verstanden. Die Abschätzung der Dispergierung unter Berufung auf Erfahrungswerte hat maßgeblichen Einfluss auf die Dimensionierung insbesondere der Feinkornabtrennung der Separieranlage sowie auf den zugehörigen Feinkorn-Feststoffaustrag. Auf die Dispergierung wird daher in der vorliegenden Ausarbeitung wiederholt eingegangen, besonders intensiv in Kapitel 6.

### *Auflockerung*

Mit der Auflockerung ist im Zusammenhang mit der Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage die Volumenvergrößerung des tatsächlich abzufahrenden Bodens im Verhältnis zu dem theoretisch zu ermittelnden Aushub gemeint. In der Tunnelbaupraxis wird hierbei in der Regel mit Erfahrungswerten operiert. Die Auflockerung steht im engen Zusammenhang mit der Wassergehaltsänderung, d.h. es ist durchaus üblich, dass eine eventuelle Wassergehaltsänderung in dem Auflockerungsfaktor enthalten ist.

### *Wassergehaltsänderung*

Unter dem Begriff „Wassergehaltsänderung“ ist an dieser Stelle zu verstehen, dass der Feststoffaustrag prozessbedingt eine größere Menge Wasser enthält als es aus den im Rahmen der geotechnischen Voruntersuchungen ermittelten natürlichen Wassergehalten der verschiedenen Bodenarten ableitbar ist.

### **3 Separation des Bodenaushubs**

Zur Separation des Bodenaushubs zählen nicht nur die offensichtlichen Prozessschritte der Auslegung und des Betriebes der Separieranlage, sondern zuvor die ebenso einflussreichen Prozessschritte der Auslegung und des Betriebes der Schildmaschine. Daher werden im Folgenden wieder unter Hervorhebung der Schwachstellen und maßgebenden Einflussfaktoren die genannten Prozessschritte erläutert.

#### **3.1 Auslegung und Betrieb der Schildmaschine**

Die Auslegung der Schildmaschine beginnt im Prinzip bereits mit dem Prozess der Auswahl der am besten geeigneten TVM. Dieser Prozess ist ausführlich in der entsprechenden Empfehlung des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB) [15] erläutert und soll an dieser Stelle nicht wiederholt werden. Nach der Auswahl erfolgt in der Regel ein auf vergleichbaren Projekten basierender erster Entwurf des TVM-Herstellers unter Berücksichtigung der projektspezifischen geotechnischen Randbedingungen. Im Dialog mit der ausführenden Unternehmung werden dann die einzelnen Bestandteile der Maschine detailliert konstruiert und optimiert.

Der sachgemäße Betrieb der Schildmaschine ist zunächst einmal in der Betriebsanleitung des Herstellers beschrieben. Üblicherweise findet zumindest in den ersten Einsatzwochen, meistens aber auch über die gesamte Projektdauer eine intensive Begleitung des Vortriebes durch Mitarbeiter des Herstellers statt. Hierbei wird wiederum in Zusammenarbeit zwischen ausführender Unternehmung und Hersteller versucht, die optimalen Betriebseinstellungen zu finden. Oft hängt das Gelingen dieser Optimierungsversuche von der Erfahrung des eingesetzten Personals im Zusammenhang mit den projektspezifischen Herausforderungen ab.

Der Schwerpunkt sowohl bei der Auslegung als auch bei den alltäglichen betrieblichen Einstellungen der Schildmaschine liegt eindeutig auf der Optimierung insbesondere der Geschwindigkeit des Abbauprozesses; die Thematik des Zusammenhangs zwischen den abzubauenen Bodenmassen und dem Feststoffaustrag der Separieranlage spielt wenn überhaupt lediglich eine untergeordnete Rolle. Dass allerdings sowohl die Auslegung als auch die Bedienung der Schildmaschine die Eigenschaften des abgebauten Bodens beeinflussen, liegt

---

auf der Hand: Durch das Schneidraddesign und die Werkzeugwahl wird die Größe der abgebauten Bodenstücke ebenso maßgebend bestimmt wie durch das Verhalten des Schildfahrers bei dem Einstellen der Faktoren Vortriebspressenkraft, Drehzahl und Spülkreislauf. Der Einsatz von Rückräumern sowie das Design der Abbaukammer beeinflussen den Weg des abgebauten Bodens ebenso wie der Einsatz eines geschlossenen Sohlsegments oder die Ausgestaltung und Steuerung des Brechermechanismus. Auch beeinflussen der Zustand der Abbauwerkzeuge und die damit im Zusammenhang stehenden Wechselintervalle den abgebauten Boden. Darüber hinaus spielen alle den Spülkreislauf betreffenden Komponenten von der Anzahl und Ausgestaltung der Förder- und Speisepumpen bis zur Zentrums- oder Brecherspülung eine Rolle bei dem Förderprozess des Bodens. Eine Sonderstellung nimmt in diesem Zusammenhang das Thema Verklebung ein. Sie wird einerseits beeinflusst durch die genannten Mechanismen der Auslegung und des Betriebes der Schildmaschine, andererseits beeinflussen Verklebungerscheinungen maßgeblich den Zusammenhang zwischen theoretischem Aushub und tatsächlichem Feststoffaustrag der Separieranlage.

Auch aufgrund dieser Sonderstellung, insbesondere aber wegen des großen Einflusses auf die Vortriebsleistungen und das damit einhergehende vertragliche Konfliktpotential ist das Thema Verklebung bereits seit Längerem im Fokus sowohl der Praxis als auch der Wissenschaft und Forschung. Als maßgebend ist in diesem Zusammenhang die Arbeit von Thewes [59] zu nennen, in jüngerer Vergangenheit haben sich insbesondere Hollmann [40] und Feinendegen [33] intensiv mit der Problematik beschäftigt. Trotz der mittlerweile langjährigen Auseinandersetzung mit der Gesamthematik und dem Schwerpunkt Verklebung besteht nach wie vor ein erheblicher Forschungsbedarf, der den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde.

Dies gilt auch für das Zusammenspiel der genannten und ggf. weiteren maschinen- und verfahrenstechnischen Einflussfaktoren. Zum aktuellen Zeitpunkt drängt sich hier die Frage auf, ob die eingesetzte Datenerfassung es zulässt, durch entsprechende Auswertungen belastbare Aussagen generieren zu können. Da hierbei immer auch ein Bezug zu den eher geotechnischen Einflussfaktoren besteht, die vor dem Hintergrund der hier behandelten Thematik bisher unzureichend untersucht worden sind, kann eine seriöse und damit sinnvolle Auseinandersetzung mit der Maschinen- und der Verfahrenstechnik allerdings ohnehin erst in einem späteren Schritt erfolgen.

### 3.2 Auslegung und Betrieb der Separieranlage

Die Auslegung der Separieranlage erfolgt auf Basis der Ergebnisse der geotechnischen Voruntersuchungen durch den Hersteller in enger Abstimmung mit der ausführenden Unternehmung. Die theoretischen Grundlagen hierzu werden von Girmscheid in seinem „Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse“ [36] zusammengestellt.

Für jedes Separationsintervall  $i$  werden die maximal anfallende Separationsmenge  $Q_{fest,i}$  [t/h] und die maximal anfallende Beladung  $\mu_{fest,i}$  [t/m<sup>3</sup>] als entscheidende Faktoren identifiziert. Diese sind wie folgt zu ermitteln:

$$Q_{fest,i} = \Delta s_i * \rho_b * Q_0^{max}$$

$$\mu_{fest,i} = \Delta s_i * \left( \frac{Q_0^{max} * \rho_b}{Q_f} \right)$$

mit

$Q_{fest,i}$  = anfallende Separationsmenge für das Separationsintervall  $i$  [t/h]

$\Delta s_i$  = max. anfallende Gewichtsprozent der separierbaren Böden im Separationsintervall  $i$  [Gew.-%]

$\rho_b$  = Dichte des abzubauenen Bodens (ungestört) [t/m<sup>3</sup>]

$Q_0^{max}$  = maximaler Materialanfall (Abbauleistung z.B. der TVM) [m<sup>3</sup>/h]

$\mu_{fest,i}$  = max. Beladung der Suspension mit Feststoffen des Separationsintervalls  $i$  [t/m<sup>3</sup>]

$Q_f$  = Trägermediummenge vor Aufgabe des Abbaumaterials (Fördermenge der unbeladenen Förderflüssigkeit) [m<sup>3</sup>/h]

$i$  = Separationsintervall [-]

Daraus ergibt sich die erforderliche Separationsleistung der jeweiligen Separationsstufe (Grob-/Mittel-/Feintrennung) und folglich die Dimensionierung der einzelnen Anlagenelemente. Das Separationsintervall beschreibt den Korngrößenbereich, den eine Separationsstufe aus der Suspension austragen kann [36].

Außerdem wird definiert, dass „die erforderliche Separationsleistung abhängig ist von:

- der Sieblinie des abzubauenen Bodens,
- der Förderleistung der Pumpeinrichtung zur Abförderung des Abbaumaterials (Aufgabemenge),
- dem Beladungsverhältnis der Suspension und
- der Dichte des Bodens.“

Maidl, Herrenknecht et al. [45] geben zu bedenken, dass „starke Schwankungen der ankommenden Mengen bis hin zum völligen Ausfall der Förderung [...] bei der Auslegung der Separationsanlage zu berücksichtigen sind“. Weiterhin wird herausgestellt, dass zwar „technisch alle Böden aus der Trägerflüssigkeit Wasser getrennt werden können“, dies jedoch aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht geschieht. „Anschaffungs- und Betriebskosten [...] verlangen den Kompromiss zwischen der Behandlung der mit Feinststoffen aufgeladenen Suspension und der Abfuhr und Deponierung“.

### **3.2.1 Auslegung der Separieranlage in der Praxis**

Ein guter Überblick sowie viele Definitionen und Details zur praktischen Vorgehensweise bei der „Dimensionierung von Separieranlagen im Tunnelbau“ sind in der gleichnamigen Arbeit von Lipka [44] zu finden.

Als Grundlage der Dimensionierung dient das jeweilige Baugrundgutachten, anhand dessen eine Unterteilung der Vortriebsstrecke in geologische Abschnitte erfolgt. Für jeden dieser Abschnitte wird unter Berücksichtigung der Flächenanteile der an der Ortsbrust anstehenden Bodenarten eine theoretische Sieblinie ermittelt, wobei jeweils der für die Separation ungünstigste Fall betrachtet werden sollte.

Anhand der Korngrößenverteilung der verschiedenen Geologieabschnitte wird die Wahl der Trennschnitte der einzelnen Separationsstufen getroffen. Die Grob- und Mitteltrennung erfolgt in der Regel durch ein Vorsieb und mindestens eine Zyklonstufe mit nachgeschaltetem Entwässerungssieb. Für die Feintrennung werden entweder Zentrifugen, Kammerfilterpressen oder Bandfilterpressen gewählt.

Eine weniger messbare Größe, die erheblichen Einfluss auf die Dimensionierung der Separieranlage hat, stellt die Dispergierung dar. Die Berücksichtigung des

Dispergierungseffektes führt zu einer veränderten Verteilung der Massenanteile auf die einzelnen Separationsstufen. In der Baupraxis wird ein prozentualer Dispergierungsgrad basierend auf Erfahrungswerten festgelegt und daraus schließend die nicht dispergierenden Bodenanteile zu der vorhergehenden Separationsstufe (z.B. Grobsieb) prozentual hinzugerechnet. Eine ungenaue Abschätzung des Dispergierungsgrades kann gerade bei Böden mit hohem Feinkornanteil und einhergehender Agglomerat- bzw. Konglomeratbildung (vgl. Abschnitt 2.3) zu einer ungenügenden Auslegung der Separieranlage führen. Weiteren Einfluss auf die Dispergierung nehmen u.a. die vielfältigen mechanischen Einwirkungen während des Abbauprozesses (Abbauwerkzeuge, Rückräumer, Steinbrecher, etc.) bzw. in der Förderleitung (Pumpen, Krümmungen, Reibung, etc.).

Als entscheidende Parameter stellt Lipka den erwarteten Suspensionsvolumenstrom und die Anforderungen an die Eigenschaften des Feststoffaustrags der Separieranlage heraus.

Der Suspensionsvolumenstrom, auch Durchsatz, Gemischaufgabe, Trübemenge oder einfach nur Volumenstrom genannt, ist das Volumen der mit dem abgebauten Bodenmaterial durchmischten Suspension, das pro Stunde von der Abbaukammer bis zur Separieranlage gelangt und in dieser verarbeitet werden muss. Dementsprechend werden auf Basis des Volumenstroms die Größe der Siebflächen und die Anzahl der Hydrozyklone ebenso festgelegt wie die Anzahl der Zentrifugen oder Filterpressen.

Der Volumenstrom lässt sich wie folgt ermitteln:

$$V_S = V_A * \frac{100}{\varphi}$$

mit

$$V_S = \text{Volumenstrom [m}^3/\text{h]}$$

$$V_A = \text{Zeitabhängiges Ausbruchvolumen [m}^3/\text{h]}$$

$$\varphi = \text{Aufladung der Suspension mit Feststoffen [\%]}$$

Bei dieser Ermittlung handelt es sich eher um eine Abschätzung als um eine Berechnung, da sich einerseits das mit den oben beschriebenen Ungenauigkeiten behaftete Ausbruchvolumen in der Formel wiederfindet und es sich andererseits bei

der Aufladung in der Regel um einen Schätz- oder Erfahrungswert handelt, der nach Lipka [44] zwischen 5 und 20% liegen kann. Diese Unschärfe ist bei der hier untersuchten Thematik ebenso problematisch wie die Tatsache, dass der ermittelte Suspensionsvolumenstrom zusätzlich noch auf Basis von meist subjektiven Erfahrungen erhöht wird, wenn z.B. mit einem hohen Maß an Verklebung gerechnet wird. Ähnlich wie bei der Auslegung der Schildmaschine ist dies dem Umstand geschuldet, eine größtmögliche Vortriebsgeschwindigkeit zu erreichen. Ein unzureichender Volumenstrom und eine damit dann unterdimensionierte Separieranlage soll auf jeden Fall vermieden werden.

Bei den durch den Separationsprozess beeinflussbaren Eigenschaften des Feststoffaustrags der Separieranlage geht es hauptsächlich um den Wassergehalt bzw. die Restfeuchte der Endprodukte und damit um die Frage der Transportfähigkeit und Deponierfähigkeit oder Weiterverwendbarkeit.

### **3.2.2 Einflüsse auf die Dimensionierung der Trenngeräte**

#### Siebe

Die Dimensionierung der einzelnen Anlagenkomponenten erfolgt meist basierend auf Erfahrungswerten aus Versuchsreihen und anderen Projekten. In der Regel wird nur ein Vorsieb angeordnet, lediglich bei größerem Volumenstrom ist ein zweites erforderlich. Sollten verfahrensbedingt mehrere Zyklonstufen für die Trennung im Mittelkornbereich notwendig sein (Grob- und Feinzyklon), bietet es sich an je Stufe ein eigenes Entwässerungssieb zu installieren, sodass diese Module unabhängig voneinander zu- oder abgeschaltet werden können (z.B. bei Wartungs- und Reinigungsarbeiten oder Änderung der Vortriebsgeschwindigkeit bzw. Geologie). Abhängig von der Bodenbeschaffenheit sind entweder Edelstahlsiebe (bspw. für feinkörnige Böden mit hohem Tonanteil zur Reduzierung der Verklebung) oder Kunststoffsiebe (bspw. für Sande oder Kiese mit höherem Verschleiß) bzw. eine Kombination zu wählen. Weiterhin spielt die Form der Körner bzw. Agglomerate eine wichtige Rolle zur Bestimmung der Sieböffnungen (schlitzförmig oder eckig). Für die Wahl der Siebgröße und der Maschenweite ist der Suspensionsvolumenstrom entscheidend, da sich mit zunehmender Sieblänge die Trennschärfe erhöht. Unter Umständen bietet sich auch die Anordnung eines zweistufigen Siebes mit Ober- und Unterdeck an. Für das Vorsieb ist in diesem Fall die Wahl einer größeren Maschenweite des Oberdecks zur Vorklassierung des gröbereren Materials sinnvoll.

Bei einem zweistufigen Entwässerungssieb sollte dagegen das Unterdeck bei gleicher Maschenweite etwas länger gewählt werden, sodass von beiden Decks jeweils die Hälfte des Volumenstroms aufgenommen werden kann. Die Kornverteilung und der zu erwartende Dispergierungsgrad des Aufgabegutes haben entscheidenden Einfluss auf die Dimensionierung des Vorsiebes und die Mindestverweildauer auf der Siebfläche. Beim Entwässerungssieb ist darauf zu achten, dass die Siebfläche weder zu klein (Filterkuchen zu hoch, Flüssigkeit kann den Siebboden nicht erreichen) noch zu groß (Filterkuchen zu klein, zu geringe Filterwirkung) ist.

Außerdem ist die Siebleistung von den Maschinenparametern Schwingungsfrequenz und Amplitude abhängig. Diese Werte müssen zur Optimierung des Trennprozesses und unter wirtschaftlichen Aspekten (Stromverbrauch, Verschleiß) in Zusammenarbeit mit dem Hersteller gefunden und ggf. im weiteren Verlauf optimiert werden. Durch eine Anpassung der Siebbeläge, des Siebneigungswinkels oder der Erregermotoreneinstellung (Drehzahl, Unwucht, etc.) bzw. durch die Hydrozykloneinstellungen beim Entwässerungssieb kann auf geologische Veränderungen reagiert werden.

### Hydrozyklone

Anhand der Korngrößenverteilung und der gewählten Separationsintervalle wird die Anzahl der Zyklonstufen gewählt. In der Regel werden zwei Stufen angeordnet, ein Grobzyklon und ein Feinzyklon. Um einen feinen Trennschnitt und eine höhere Trennschärfe der Zyklone zu gewährleisten, sollte die Feststoffkonzentration in der Aufgabesuspension möglichst gleichmäßig sein. Dies wird ebenfalls durch einen mehrstufigen Zyklonbetrieb begünstigt. Die Bemessung der einzelnen Zyklonstufen kann rechnerisch in Abhängigkeit des gewünschten Trennschnitts, der Zyklonabmessungen und der Suspensionseigenschaften erfolgen. In der Praxis werden üblicherweise Tabellen der Hersteller zur Dimensionierung herangezogen, wobei der Trennschnitt in Abhängigkeit des Zyklondurchmessers abgelesen wird. Die erforderliche Anzahl der Zyklone einer Stufe ergibt sich aus dem zu verarbeitenden Suspensionsvolumenstrom. Bei der Ermittlung der Anzahl der Zyklone einer Stufe sollte ein möglicher Ausfall (Wartung oder Reinigung) berücksichtigt werden. Daher empfiehlt es sich, bei der Kalkulation nicht den maximal aufnehmbaren Volumenstrom pro Zyklon anzusetzen. Die Anordnung einer zweiten

oder dritten Zyklonstufe ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzuwägen. Dem feineren Trennschnitt ist ein intensiverer Wartungs- und Reinigungsaufwand gegenüberzustellen, da kleinere Zykclone eher verstopfen und verschleißempfindlicher sind. Die Trennschärfe und der Anteil an Fehlkorn im Überlauf hängt von der Konstruktion des Einlaufbereichs ab. Dieser sollte so ausgebildet sein, dass möglichst wenig Turbulenzen erzeugt werden. Die Ausbildung des Unterlaufs ist abhängig vom Durchmesser der Unterlaufdüse und bestimmt die Form des Auslaufstroms. Bei der Separation im Tunnelbau sind üblicherweise eine Eindickung des Unterlaufs (Strangaustrag) und die Klärung des Oberlaufs (Schirmaustrag) gewünscht, was zu einer Kompromisslösung zwischen Strang- und Schirmaustrag führt. Eine effektive Lösung ist der mehrstufige Zyklonbetrieb mit nachgeschaltetem Entwässerungssieb. Die Hydrozyklone sind so einzurichten, dass eine definierte Mindestfeststoffkonzentration im Unterlauf eingehalten wird und der gewünschte Restfeuchteanteil des zu deponierenden Materials mithilfe des Entwässerungssiebes erreicht werden kann. Eine weitere Einflussgröße auf die Trennleistung eines Hydrozyklons ist der Aufgabedruck, der die für den Trennprozess nötige Wirbelströmung im Einlauf erzeugt. Da für Zykclone kleineren Durchmessers ein höherer Aufgabedruck erforderlich ist, müssen die höheren Energiekosten den Vorteilen kleinerer Trennschnitte gegenübergestellt werden.

### Zentrifugen und Filterpressen

Für die letzte Stufe der Separation, die Feinsttrennung, werden entweder Zentrifugen, Bandfilterpressen oder Kammerfilterpressen eingesetzt. Weitere Faktoren für die Wahl der Trenngeräte sind unter anderem der Restfeuchteanteil im Abwurf, die Deponierung des Materials sowie die Leistung und die Anschaffungs- bzw. Energiekosten. Das Hauptziel der letzten Separationsstufe ist ein möglichst niedriger Restfeuchteanteil um das Material kostengünstig deponieren zu können.

Gemäß Lipka [44] kann z.B. mit einer Zentrifuge ein Restfeuchtegehalt von 30 bis 50% erzielt werden, wohingegen bei Einsatz einer Kammerfilterpresse durchaus ein Wert von unter 20% erreicht werden kann. Diese Werte entbehren jedoch einer belastbaren Grundlage und spiegeln somit die Schwachstelle an diesem Punkt des Bodenmassenmanagements wider. Bisher sind keine Untersuchungen bekannt, in denen der tatsächliche Restfeuchtegehalt des Feststoffaustrags von Separieranlagen im Tunnelbau behandelt wurde.

---

Ein erhebliches Einsparpotential besteht, wenn der Schlamm in flüssiger Form entsorgt werden kann. Durch Einsatz einer dritten Zyklonstufe könnte auf die kostenintensivere Fest-Flüssig-Trennung verzichtet werden. Ein weiteres Kriterium zur Wahl des Verfahrens zur Feintrennung ist die ausgetragene Menge an Trockensubstanz pro Stunde, die sogenannte Feststoffleistung. Als entscheidende Faktoren bei der Wahl des Trennverfahrens sind sicherlich die Anschaffungs- und Betriebskosten der jeweiligen Geräte zu sehen. Dazu sind Wartungs- und Reinigungsaufwand, Verschleiß und Personalaufwand der jeweiligen Feststoffleistung gegenüberzustellen. Weiterhin ist zu hinterfragen, welches Trennverfahren im Hinblick auf die zu erwartenden Vortriebsleistungen am wirtschaftlichsten ist. Damit einhergehend ist eine Abschätzung der Menge an zu verarbeitender, also ausgeschleuster Suspension erforderlich, um die Trenngeräte zu dimensionieren. Diese Annahme kann aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren (Anfangsdichte, Bentonitverluste, Sperrwasserzutritte, Aufladung der Suspension, etc.) nur basierend auf Erfahrungswerten oder Versuchsreihen getroffen werden und ist damit sehr unpräzise.

### **3.2.3 Betrieb und wirtschaftliche Faktoren**

Der Betrieb der Separieranlage wird ähnlich wie bei der TVM zunächst in der Bedienungsanleitung des Herstellers beschrieben. Auch hier wird im Zusammenspiel zwischen Mitarbeitern des Herstellers und der ausführenden Unternehmung versucht, die optimalen Einstellungen und Bedienungsprozesse zu finden. Hierzu gehören beispielsweise Reinigungs- und Wartungsroutinen oder die Einstellungen der Hydrozyklonstufen. Sowohl die Einstellungen als auch die Bedienung hängen von der Erfahrung der handelnden Personen ab und sind damit oft nicht objektiv nachvollziehbar, was eine Schwachstelle in Bezug auf die hier untersuchte Problematik darstellt.

Welche zentrale Bedeutung sowohl der Auslegung als auch dem Betrieb der Separieranlage zukommt, lässt sich anhand einer beispielhaften ökonomischen Betrachtung demonstrieren:

Die projektspezifische Abschreibung für eine handelsübliche Zentrifuge (Abbildung 3) kann sich bei Zugrundelegung einer Einsatzzeit von 3 Jahren und eines Restwertes von 25% des Anschaffungswertes auf einen Betrag von 500.000€ belaufen.



*Abbildung 3: Handelsübliche Zentrifuge*

Die Betriebskosten für eine solche Zentrifuge können bei Annahme eines aufgrund der geologischen Randbedingungen erforderlichen nahezu kontinuierlichen Betriebes auf 300.000€ pro Jahr betragen. Bei einer Vortriebsdauer von rund 3 Jahren fallen also für eine Zentrifuge Kosten in Höhe von 1,5 Mio. € an. Diese Größenordnung kann bei einer Überdimensionierung der Separieranlage dazu führen, dass das Projekt in der Angebotsphase nicht akquiriert werden kann. Eine Unterdimensionierung würde je nach Ausprägung der Folgen allerdings zu noch höheren Kosten führen, da zusätzlich zu den nachträglichen und damit nicht kalkulierten Anschaffungs- und Betriebskosten noch die aus der Leistungsreduzierung bzw. dem Leistungsausfall der Vortriebsanlage resultierenden ungedeckten Kosten zu addieren wären. Auf dem kritischen Weg liegend können sich die laufenden Kosten eines Schildvortriebes durchaus auf 50.000€ pro Tag aufsummieren.

## 4 Erfassung des Bodenaushubs

Die maßgebenden Prozessschritte zur Erfassung des Bodenaushubs – die automatisierte Volumenkontrolle, die Messung des Feststoffaustrags der Separieranlage und die Bilanzierung des Bodenaushubs – werden im Folgenden vorgestellt, die Schwachstellen aufgezeigt und die Einflussfaktoren hervorgehoben.

### 4.1 Automatisierte Volumenkontrolle

Zur Erfassung der abgebauten Bodenmassen bzw. zur Volumenkontrolle oder Aushubkontrolle werden derzeit in der Regel magnetisch-induktive Durchflussmesser (MID) und radiometrische Dichtemesser eingesetzt.

Bei den Durchflussmessern (Abbildung 4) wird die ausführliche Beschreibung von Wehrmeyer [62] aufgreifend ein Magnetfeld der Stärke  $\bar{B}$  erzeugt, in dem sich ein elektrischer Leiter der Länge  $L$ , in diesem Fall die Suspension, mit einer Geschwindigkeit  $\bar{v}$  bewegt. Bei Bewegung der Flüssigkeit werden enthaltene Ladungsträger durch das Magnetfeld abgelenkt, was zur Detektion einer Induktionsspannung  $U_e$  an den Messelektroden führt. Diese Elektroden sind mittig am Messrohr in etwa im Abstand des Rohrdurchmessers  $D$  angeordnet, was der Länge des elektrischen Leiters entspricht ( $L = D$ ). Die induzierte Spannung verhält sich gemäß Wehrmeyer [55] bei einer „diametralen Elektrodenanordnung und einem rotationssymmetrischen Geschwindigkeitsprofil proportional zur mittleren Gemischgeschwindigkeit  $v_m$  [...]“, mit welcher sich unter Einbeziehung des Rohrquerschnitts das Durchflussvolumen  $Q$  ermitteln lässt.

$$Q = A * v_m = \frac{\pi D^2}{4} * v_m \quad \text{und} \quad U_e = B * L * v_m$$

mit  $L = D$  folgt:

$$Q = \frac{\pi D}{4B} * U_e$$

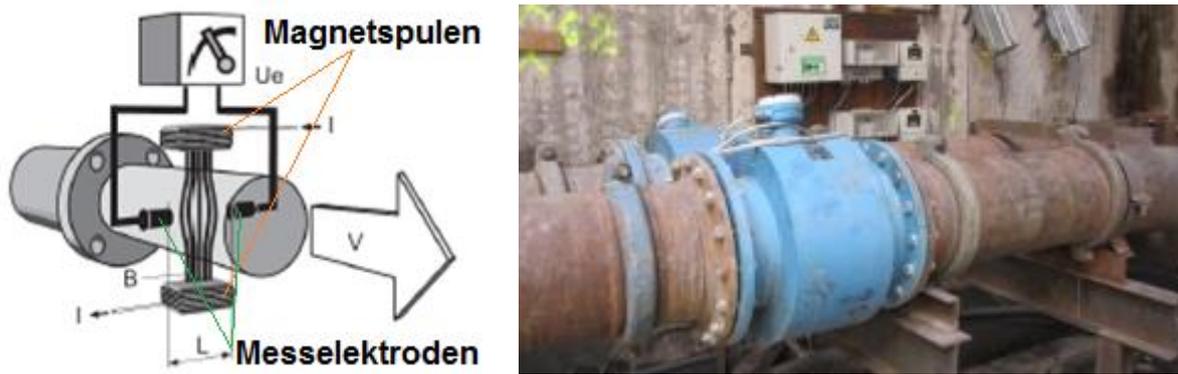


Abbildung 4: Durchflussmesser [68]

Die Durchflussmesser arbeiten für die Speiseleitung ausreichend genau, da hier von einer weitgehend homogenen Feststoffverteilung und einem damit verbunden rotationssymmetrischen Geschwindigkeitsprofil ausgegangen werden kann. In der Förderleitung ist eine solche homogene Feststoffverteilung je nach Bodenart in der Regel nicht gegeben, insbesondere für Sande oder Kiese. Inwieweit für bindige Böden von einer homogenen Feststoffverteilung und einem rotationssymmetrischen Geschwindigkeitsprofil in der Förderleitung ausgegangen werden kann, ist fraglich.. Daher können die Messwerte mit Ungenauigkeiten behaftet sein, die den Zusammenhang zwischen abgebautem Boden und Feststoffaustrag der Separieranlage negativ beeinflussen. Ursache hierfür kann nach Uden [60] weiterhin sein, dass die Geschwindigkeit, die gemessen wird, nicht der mittleren Geschwindigkeit entspricht. Dies wiederum hängt damit zusammen, dass die Spannung in Elektrodennähe stärker wirksam ist als an den Polen. Ist das Strömungsprofil unsymmetrisch, was insbesondere bei einer nicht homogenen Suspension der Fall sein kann, wird nicht der repräsentative Wert gemessen. Außerdem können in dieser Form auch Luft- oder Gasblasen das Magnetfeld beeinflussen. Darüber hinaus ist in der Praxis beobachtet worden, dass nicht ausreichend dimensionierte Messeinrichtungen montiert worden sind. Erkennbar ist dies an der auffällig häufig auftretenden Anzeige des maximal messbaren Durchflusses. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der tatsächliche Durchfluss höher war, die Messwerte sind damit unbrauchbar.

Bei der radiometrischen Dichtemessung (Abbildung 5) fließt die Suspension an einem radioaktiven Strahler (Quelle) auf der einen Seite und einem Strahlungsempfänger (Detektor) auf der anderen Seite vorbei. Je mehr Bodenmaterial sich in der Suspension befindet, desto mehr Strahlung wird absorbiert. Mit der am Detektor ankommenden Reststrahlung kann die Dichte des absorbierenden Materials, also hier der Suspension, abgeleitet werden. Dabei sind die Strahlung, der Massenabsorptionskoeffizient und die Dicke des absorbierenden Stoffes als konstant anzunehmen. Der Massenabsorptionskoeffizient ist abhängig von dem eingesetzten Nuklid (i.d.R. Caesium-137) sowie der Ordnungszahl des absorbierenden Stoffes. Als Detektoren bzw. Empfänger der Strahlung kommen Ionisationskammern oder Szintillationszähler zum Einsatz [55].

$$I = I_0 * e^{-\mu' * \rho * d}$$

mit

$I$  = am Detektor ankommende Strahlung

$I_0$  = ungeschwächte Strahlung (Quelle)

$\mu'$  = Massenabsorptionskoeffizient in  $\text{cm}^2/\text{g}$

$\rho$  = Dichte des absorbierenden Stoffes in  $\text{g}/\text{cm}^3$

$d$  = Dicke des absorbierenden Stoffes in cm

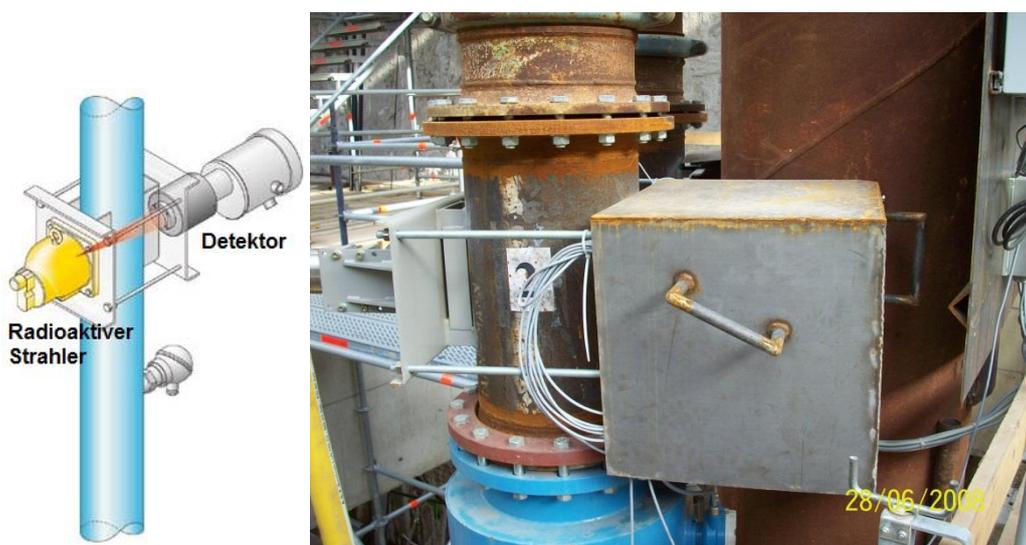


Abbildung 5: Dichtemesser [68]

Je nach Positionierung der Messeinrichtung im Leitungssystem sowie je nach Durchstrahlungswinkel können die Messwerte mit nicht unerheblichen Unschärfen behaftet sein. Umfangreiche Untersuchungen hierzu hat Wehrmeyer [62] durchgeführt. In diesen Untersuchungen wurde sich allerdings im Wesentlichen mit nichtbindigen Böden auseinandergesetzt, so dass es bis heute keine Aussagen zur Größenordnung der Messfehler oder zur empfehlenswerten Anordnung der Messinstrumente bei bindigen Böden gibt.

#### 4.2 Messung des Feststoffaustrags der Separieranlage

Zur Messung des Feststoffaustrags der Separieranlage kommen derzeit hauptsächlich Förderbandwaagen zum Einsatz. Üblicherweise handelt es sich bei diesen um zweiteilige Messeinrichtungen, die unter dem Förderband befestigt werden. Der erste Teil ist eine Rollenkonstruktion, durch die das Gewicht auf Wägezellen übertragen wird (Abbildung 6 links), der zweite Teil ist ein Messrad, mit dem die Geschwindigkeit des Bandes ermittelt wird (Abbildung 6 rechts).

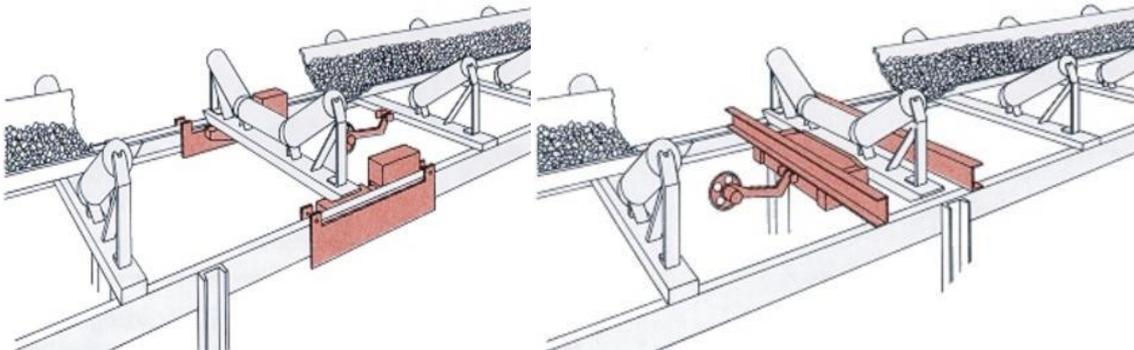


Abbildung 6: Förderbandwaage [68]

Mit einer solchen Durchsatzmesseinrichtung lässt sich die mit dem Förderband durch einen Beobachtungsquerschnitt  $A_q$  hindurchtransportierte Masse  $m_w$  des Wägegutes  $v$  über den Zeitraum  $t_A$  bis  $t_E$  unter Verwendung der folgenden Formel bestimmen [37]:

$$m_{wv} = \int_{t_A}^{t_E} qm_v(t) dt$$

Übertragen in die Praxis kann dieser Zeitraum beispielsweise mit  $t_A$  als Vortriebsbeginn und  $t_E$  als Vortriebsende definiert werden. Anhand der folgenden

Tabelle zur Datenauswertung einer Förderbandwaage von Uden [60] wird veranschaulicht, dass das zeitliche Integral über den Durchsatz  $q_{m,v}$  (in Tonnen pro Stunde) die Gesamtmasse des Wägegutes für diesen Zeitraum (in Tonnen) ergibt.

*Tabelle 1: Beispiel Datenauswertung Förderbandwaage [60]*

A	B	C	D	E	F	G	H
Datenauswertung der Förderbandwaagen							
FBW 1							
			Berechnung	Feinsieb			
Datum	Beginn	Ende	Bandlauf -Zeit	Ring Nr.	Beginn	Ende	Differenz
			[h]		[t]	[t]	[t]
10.5.2010	10.05.10 4:20	10.05.10 7:40	3,33	831	540190	540291	100
10.5.2010	10.05.10 7:40	10.05.10 11:20	3,67	832	540291	540359	69
10.5.2010	10.05.10 11:20	10.05.10 15:35	4,25	833	540359	540448	89
10.5.2010	10.05.10 15:35	10.05.10 18:20	2,75	834	540448	540516	69
10.5.2010	10.05.10 18:20	10.05.10 22:40	4,33	835	540516	540613	97
11.5.2010	10.05.10 22:40	11.05.10 2:10	3,50	836	540613	540690	77

Obwohl Förderbandwaagen erprobte und relativ zuverlässige Messinstrumente sind, existieren im Zusammenhang mit der hier untersuchten Problematik dennoch einige Schwachstellen [60]. Zum einen ist regelmäßig zu beobachten, dass sich gerade bei feinkörnigen und damit oft klebrigem Material Anhaftungen an den Bändern bilden, die durch die installierten Bedüsungen und Abstreifer nicht entfernt werden. Diese Anhaftungen werden mehrfach gewogen und verfälschen die Messwerte in einem unbekanntem Maße (sog. Nullpunktabweichungen, die nur durch regelmäßig durchgeführte, betriebsstörende Reinigung des Förderbandes und anschließende Nullstellung minimiert werden können [37]). Zum anderen kann es insbesondere bei dem Feststoffaustrag aus einer Zentrifuge mit einem erhöhten Wassergehalt zu einem Überlaufen des Bandes kommen, was zu Verklebungen des Messrades führen kann. Das dann „unrund“ laufende Rad kann ein „Schlagen“ des Bandes verursachen, was wiederum zu falschen Messwerten führt.

Weitere wesentliche systembedingte Fehlerquellen, die in der Praxis zu Messabweichungen zwischen 3 - 5 % führen können, sind nach Gundelach und Litz [37] u.a.:

- Längenänderungen des Förderbandes aufgrund von Feuchte- oder Temperatureinwirkung oder Bandzugschwankungen
- Fehlerhafte Geschwindigkeitssignalgewinnung durch Schmutzablagerungen und Schlupf zwischen Antriebsrolle und Förderband

Die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über die Nutzung von Schaufel- oder LKW-Waagen zu generieren wird ebenso selten genutzt wie die Kombination von vermessungstechnischer Aufnahme und systematischer Beprobung der in der Regel vorgehaltenen Zwischenlager. Es gibt zwar immer wieder Ansätze - insbesondere wird auch aus Abrechnungsgründen die Abfuhr über LKW-Waagen erfasst - allerdings werden hierbei Witterungseinflüsse nicht berücksichtigt und es mangelt an einer ausreichenden Kontrolle und Dokumentation.

### **4.3 Bilanzierung des Bodenaushubs**

In der Regel wird verlangt, dass eine möglichst zeitnahe Gegenüberstellung der theoretisch abzubauenen und der tatsächlich abgebauten Bodenvolumina und Bodenmassen erfolgt. Als Soll-Werte fließen die Daten der theoretischen Berechnungen zur Ermittlung der abzubauenen Bodenmassen ein, als Ist-Werte die Daten aus der Erfassung des Bodenaushubs und des Feststoffaustrags der Separieranlage. Da sowohl Soll- als auch Ist-Werte mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet sind, führt eine Gegenüberstellung der Daten zu großen Differenzen. Da die Differenzen unplausibel sein können, die Bilanz aber trotzdem aufgestellt werden muss, weil es entsprechende vertragliche Vereinbarungen hierzu gibt, werden die Daten weiter untersucht, interpretiert, statistischen Auswertungen unterworfen und letztendlich so weit verändert, dass sich die verbleibenden Differenzen in einem plausiblen Rahmen befinden.

Problematisch hierbei ist insbesondere, dass mit den Ergebnissen der beschriebenen Vorgehensweise nachvollziehbare Werte suggeriert werden, ohne dass die einzelnen Ungenauigkeiten ausreichend gewürdigt worden sind. Bei Betrachtung der Soll-Ist-Bilanzen ist dies nicht erkennbar. Die Gefahr der Fehlinterpretationen z.B. bei der

---

Untersuchung von Setzungserscheinungen oder bei der Formulierung der Anforderungen bei weiteren Projekten ist groß.

Um das Ausmaß der Problematik aufzuzeigen, wurden umfangreiche Datenauswertungen verschiedener Projekte durchgeführt. Es wurden ausschließlich Basis- bzw. Rohdaten untersucht, d.h. die Ergebnisse spiegeln den Stand der Technik in Bezug auf die Bodenmassenbilanzierung ohne Interpretationen und Manipulationen wider. Zunächst wurden die Daten eines Projektes intensiv analysiert, eine Auswertungssystematik geschaffen und diese dann angewendet. Anschließend wurde versucht, die Systematik auf die Daten weiterer Projekte zu übertragen. Konkret lag der Schwerpunkt der Untersuchungen bei der Auswertung der im Rahmen der Projektanbahnung und -abwicklung ermittelten und erfassten Daten, die in direktem Zusammenhang mit den Bodenmassen standen. Hierbei handelte es sich als Bezugsbasis für die nachfolgenden Untersuchungsschritte zunächst um die relevanten Grundlagen aus dem geotechnischen Gutachten (Kapitel 2.1) und die hieraus wie in Kapitel 2.2 erläutert theoretisch ermittelten abzubauenen Bodenmassen (vgl. Spalte „Geotechn. Gutachten“ in Tabelle 2). Chronologisch dem Projektverlauf folgend wurden als nächstes die im Rahmen der Angebotsbearbeitung wie im Kapitel 2.3 aufgezeigt prognostizierten Abfuhrmassen (Spalte „Annahmen Kalkulation“ in Tabelle 2) berücksichtigt. Aus der Ausführungsphase fanden die durch Dichte- und Durchflussmesser erfassten abgebauten Bodenmassen (Spalte „Rohdaten Vortrieb“ in Tabelle 2), die durch Förderbandwaagen erfassten Bodenmassen des Feststoffaustrags der Separieranlage (Spalte „Förderbandwaagen“ in Tabelle 2) und teilweise die durch LKW-Waagen erfassten Abfuhrmassen (Spalte „Abfuhr“ in Tabelle 2) Eingang in die Auswertung. Als Ergebnisse wurden Relationswerte erarbeitet, die die jeweilige Diskrepanz der berechneten oder gemessenen Daten zu den theoretisch ermittelten Abbaumassen darstellen. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungsphase sind in der folgenden Tabelle 2 zusammengefasst:

Tabelle 2: Ergebnisse Datenauswertung 1. Untersuchungsphase [68]

Datenauswertung										
Auswertungsbereich					Auswertungsergebnisse					
Bodenart	Kennung	Gleis	Homogenbereich	Anzahl der Ringe	Angaben	Geotechn. Gutachten	Annahmen Kalkulation	Rohdaten Vortrieb	Förderband waagen	Abfuhr
GM	qe+qs	1	1.2	80	Gesamtmassen [to]	9175,33	11193,14	15719,09	12111,96	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	171,32%	132,01%	
GM	qe+qs	1	1.3	65	Gesamtmassen [to]	7471,35	9114,43	10226,16	10392,16	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	136,87%	139,09%	
GM	qe+qs	1	1.5	77	Gesamtmassen [to]	8521,55	10395,60	6966,30	16899,46	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	81,75%	198,31%	
GM	qe+qs	2	2.1	135	Gesamtmassen [to]	15544,52	18963,03	24075,02	20365,69	4467,99
					Relationswerte	100,00%	121,99%	154,88%	131,02%	28,74%
GM	qe+qs	2	2.2	45	Gesamtmassen [to]	5153,46	6286,79	8505,01	6159,99	2553,80
					Relationswerte	100,00%	121,99%	165,04%	119,53%	49,56%
GM	qe+qs	2	2.4	113	Gesamtmassen [to]	13047,07	15916,35	17113,51	14084,33	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	131,17%	107,95%	
GTU	tmi	1	1.1	60	Gesamtmassen [to]	6628,24	7980,46	15594,78	8921,36	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	235,28%	134,60%	
GTU	tmi	1	1.4	854	Gesamtmassen [to]	92970,90	111937,70	92255,38	129079,54	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	99,23%	138,84%	
GTU	tmi	2	2.3	863	Gesamtmassen [to]	94583,94	113879,82	86316,93	126794,98	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	91,26%	134,06%	

Bei den für diese Ausarbeitung relevanten feinkörnigen Böden hat es sich bei dem Projekt im Wesentlichen entweder um Geschiebemergel (GM) oder um Glimmerton / -schluff (GTU) gehandelt. Es wurden zwei Tunnelröhren aufgefahen, daher ist bei den untersuchten Bereichen zwischen Gleis 1 und Gleis 2 zu unterscheiden. In einem ersten Schritt wurden innerhalb dieser gemäß geotechnischem Gutachten jeweils einheitlichen Bereiche sogenannte Homogenbereiche, also Abschnitte mit gleichbleibenden geologischen und hydrologischen Randbedingungen, herausgearbeitet. Details hierzu sind der unter Anleitung des Autors entstandenen Arbeit von Wieland [68] zu entnehmen, eine ausgiebige Erläuterung würde an dieser Stelle zu weit führen. Um die Aussagekraft der Auswertungsergebnisse einordnen zu können, wurde in der Tabelle die Anzahl der Ringe und damit also die Länge des jeweiligen Homogenbereiches aufgeführt. Im Mittel betrug die Länge eines Ringes 1,5m. Es lässt sich grob konstatieren: je länger der Homogenbereich desto umfangreicher die Datenmenge und desto aussagekräftiger die Ergebnisse.

In der Tabelle sind einige Werte rot hervorgehoben, diese Werte scheinen entweder wenig plausibel oder besonders hervorstechend zu sein.

Betrachtet man die Homogenbereiche im **Geschiebemergel**, so lassen sich leichte Tendenzen ablesen. Beispielhaft sei dies in der folgenden Abbildung 7 zu dem Homogenbereich 2.1 erläutert.

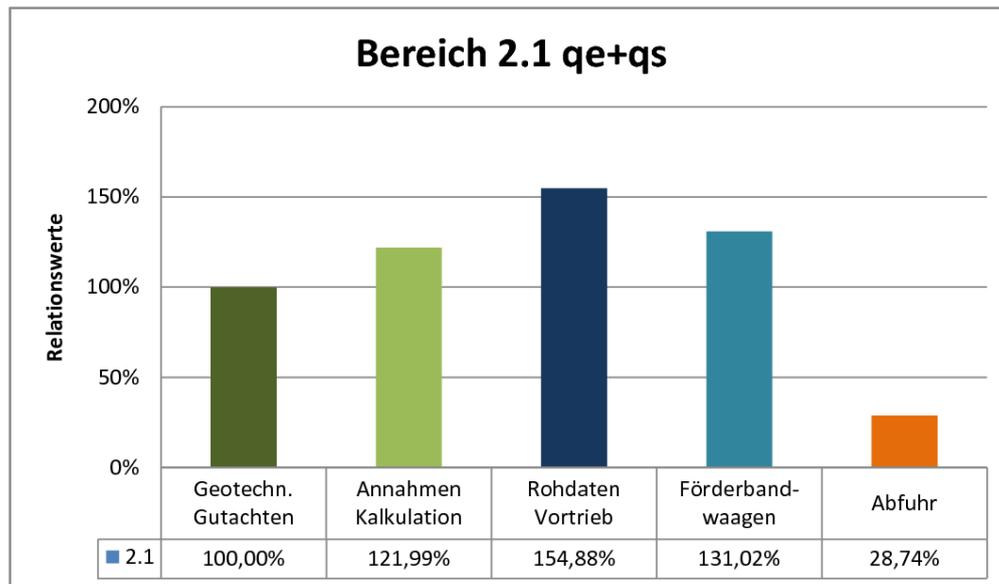


Abbildung 7: Relationswerte Homogenbereich 2.1 [68]

Die 100%, die mit dem Hinweis „Geotechn. Gutachten“ versehen sind, stellen die Bezugsbasis dar und ergeben sich im Wesentlichen aus dem in dem Gutachten angegebenen Wert für die Dichte des Geschiebemergels.

Die 121,99%, die mit dem Hinweis „Annahmen Kalkulation“ versehen sind, zeigen, dass im Rahmen der Angebotsbearbeitung bei der Vorhersage der abzufahrenden Bodenmassen davon ausgegangen wurde, dass 21,99% Mehrmassen auftreten würden.

Die 154,88%, die mit dem Hinweis „Rohdaten Vortrieb“ versehen sind, stellen das kumulierte Ergebnis der gemäß der Erläuterungen in Kapitel 4.1 vortriebsbegleitend erfassten Abbaumassen dar und zeigen, dass 54,88% Mehrmassen aufgetreten seien und damit mehr als doppelt so viel wie im Rahmen der Angebotsbearbeitung ermittelt.

Die 131,02%, die mit dem Hinweis „Förderbandwaagen“ versehen sind, stellen das kumulierte Ergebnis des gemäß der Ausführungen in Kapitel 4.2 erfassten Feststoffaustrags der Separieranlage dar und zeigen, dass 31,02% Mehrmassen aufgetreten seien. Dieser Wert ist deutlich größer als die Vorhersage aus der Angebotsbearbeitung, allerdings auch deutlich niedriger als die gemessenen Abbaumassen.

Die 28,7%, die mit dem Hinweis „Abfuhr“ versehen sind, stellen das Ergebnis der mit Hilfe von LKW-Waagen erfassten Abfuhrmassen dar und zeigen, dass die Daten offensichtlich unzureichend bzw. nicht korrekt erfasst worden sind. Der Wert ist unbrauchbar. Dies ist dennoch interessant und darstellenswert, da die Abrechnungsmodalitäten zwischen Auftragnehmer und Subunternehmer meist dergestalt sind, dass die tatsächlichen Abfuhrmassen abgerechnet werden. Da aber offensichtlich diese Daten gar nicht erfasst werden, stellt sich die Frage nach einer nachvollziehbaren Abrechnungsgrundlage.

Auch bei der Betrachtung der **Glimmerton**-Homogenbereiche lassen sich wiederkehrende Tendenzen erkennen, vorausgesetzt, der Homogenbereich 1.1, der aufgrund seiner geringen Länge von lediglich ca. 90m im Verhältnis zu den anderen beiden Bereichen 1.4 und 2.3 mit jeweils deutlich über 1.200m in seiner Aussagekraft fragwürdig erscheint, wird außer Acht gelassen. Als Beispiel soll hier der Bereich 2.3 dienen (siehe Abbildung 8).

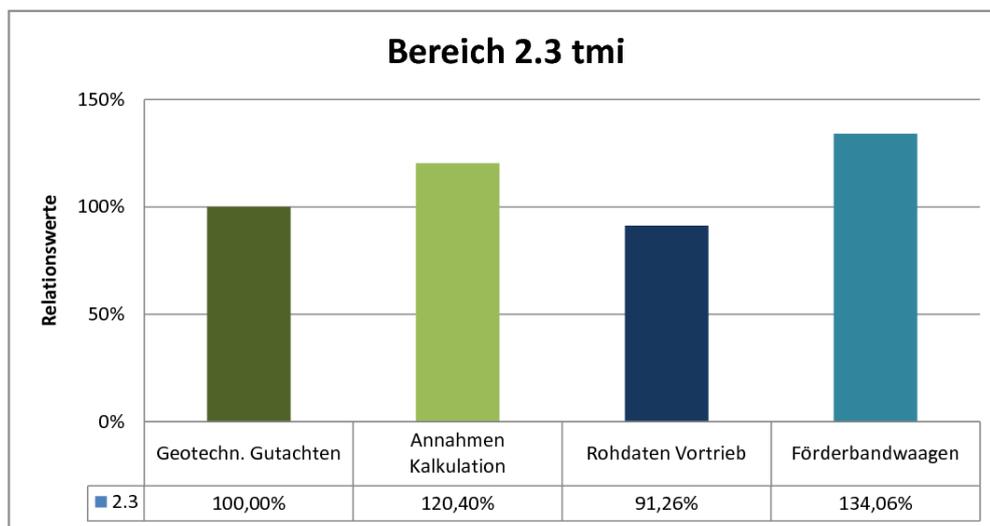


Abbildung 8: Relationswerte Homogenbereich 2.3 [68]

Beim Glimmerton wurde im Rahmen der Angebotsbearbeitung offensichtlich von einer Massenmehrung in Höhe von 20,40% ausgegangen.

Die Ergebnisse von Dichte- und Durchflussmessung zeigen interessanterweise, dass mit 91,26% weniger als die theoretisch ermittelten Bodenmassen abgebaut worden seien. Die wahrscheinlichste Erklärung für dieses Phänomen ist, dass die Messinstrumente für Glimmerton ungeeignet sind.

Die Messergebnisse der Förderbandwaagen zeigen eine Massenmehrung in Höhe von 34,06% an, was wieder deutlich größer ist als die Vorhersage aus der Angebotsbearbeitung.

**Grundsätzlich** lässt sich bei Betrachtung sowohl der Tabelle als auch der Diagramme schlussfolgernd konstatieren, dass

- starke Abweichungen zwischen den verschiedenen Datenerfassungsmechanismen auftreten,
- starke Abweichungen der erfassten Daten von den im Rahmen der Angebotsbearbeitung vorhergesagten Daten auftreten,
- unplausible Werte auftreten, die auf Fehler in der Messtechnik hinweisen,
- offensichtlich keine ausreichende Erfassung der tatsächlichen Abfuhrmassen stattgefunden hat und
- letztendlich keine seriösen Zusammenhänge zwischen gewachsenem Boden und Feststoffaustrag der Separieranlage ableitbar sind.

Eine Ausweitung dieser Art der zielgerichteten Datenauswertung auf von den Randbedingungen her passende Tunnelbauprojekte aus der Vergangenheit sollte im Rahmen einer unter Anleitung des Autors entstandenen Arbeit von Uhlig [61] erfolgen. Es konnten vier Projekte identifiziert werden, bei denen Schildvortriebe mit Flüssigkeitsstützung zumindest partiell in feinkörnigen Böden eingesetzt wurden. Leider konnte dann allerdings nicht das angestrebte Ziel erreicht werden, da während der Bearbeitung offensichtlich wurde, dass der Fokus in der Vergangenheit noch weniger auf der hier grundsätzlich untersuchten Thematik lag als es in der Gegenwart der Fall ist. Außerdem stand teilweise die mittlerweile standardmäßig eingesetzte Messtechnik nicht zur Verfügung. So konnten die geotechnischen Grundlagen ebenso noch ausreichend genau nachvollzogen und aufbereitet werden wie die Annahmen und Ermittlungen in der Angebotsbearbeitungs- bzw. Kalkulationsphase. In den Rohdaten der Vortriebe fehlten dann aber in der Regel Teile der relevanten Informationen. Daten zum Feststoffaustrag, also Messwerte von Förderbandwaagen fehlten meist ebenso vollständig wie irgendeine Art der Dokumentation der tatsächlichen Abfuhrmassen. Daher wurden die entsprechenden Spalten in der Tabelle 3 zur Verbesserung der Übersichtlichkeit im Gegensatz zur Darstellung in Tabelle 2 weggelassen. Bei den Böden, die bei den untersuchten Projekten durchörtert wurden, hat es sich um Geschiebemergel (GM), Beckenschluss

(BU), Beckentonmergel (BTM), Lauenburger Tone (LT), Kaolinsand (KS), Weserterrassensand (WTS), Hamborner Feinsand (HFS), Hamborner Ton (HT) und Kreideschluffe (KU) gehandelt.

Tabelle 3: Ergebnisse Datenauswertung 2. Untersuchungsphase [61]

Datenauswertung						
Auswertungsbereich				Auswertungsergebnisse		
Bodenart	Gleis	Homogenbereich	Anzahl der Ringe	Angaben	Geotechn. Gutachten	Annahmen Kalkulation
GM	F2	S1	102	Gesamtmassen [to]	12.109,66	13.363,18
				Relationswerte	100,00%	110,35%
GM, BU	F2	S2	73	Gesamtmassen [to]	8.665,74	9.561,08
				Relationswerte	100,00%	110,33%
GM, BU	F2	S3	176	Gesamtmassen [to]	20.660,55	22.398,47
				Relationswerte	100,00%	108,41%
GM	F2	S4	45	Gesamtmassen [to]	5.342,50	5.895,52
				Relationswerte	100,00%	110,35%
GM	F1	S5	102	Gesamtmassen [to]	12.109,66	13.363,18
				Relationswerte	100,00%	110,35%
GM, BU	F1	S6	73	Gesamtmassen [to]	8.665,74	9.561,08
				Relationswerte	100,00%	110,33%
GM, BU	F1	S7	176	Gesamtmassen [to]	20.660,55	22.398,47
				Relationswerte	100,00%	108,41%
GM	F1	S8	45	Gesamtmassen [to]	5.342,50	5.895,52
				Relationswerte	100,00%	110,35%
GM, BU, BTM	Röhre 1 (Süd)	H1	138	Gesamtmassen [to]	48.046,49	57.655,79
				Relationswerte	100,00%	120,00%
GM, BU, BTM	Röhre 2 (Nord)	H2	138	Gesamtmassen [to]	48.046,49	57.655,79
				Relationswerte	100,00%	120,00%
LT, KS, WTS	Südröhre	W1	102	Gesamtmassen [to]	33.794,27	47.541,09
				Relationswerte	100,00%	140,68%
LT, GM, KS, WTS	Südröhre	W2	241	Gesamtmassen [to]	79.460,58	107.238,91
				Relationswerte	100,00%	134,96%
LT, GM, KS, WTS	Nordröhre	W3	151	Gesamtmassen [to]	49.786,50	63.375,43
				Relationswerte	100,00%	127,29%
LT, KS, WTS	Nordröhre	W4	156	Gesamtmassen [to]	51.685,36	72.709,91
				Relationswerte	100,00%	140,68%
HFS, HT, KU	Los 31.3 - 31.2 Gleis 1	R1	1192	Gesamtmassen [to]	122.625,14	170.048,49
				Relationswerte	100,00%	138,67%
HFS, HT, KU	Los 31.3 - 31.2 Gleis 2	R2	1192	Gesamtmassen [to]	122.625,14	170.048,49
				Relationswerte	100,00%	138,67%

---

Eine richtige und wichtige Schlussfolgerung von Uhlig [61] ist neben einem Appell zur konsequenten Disziplin bei der Datenerfassung und –sicherung die Empfehlung, eine redundante Datengenerierung einzuführen. Als Beispiel wird hier eine vortriebsbegleitende, strukturierte Probennahme und –analyse des Feststoffaustrags mit Bestimmung charakteristischer Bodenkennwerte genannt.

## 5 Abrechnung des Bodenaushubs

### 5.1 Grundlagen aus Gesetzen, Normen, Richtlinien und Empfehlungen

In **Deutschland** stellt das Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) [12] die Grundlage für Bauaufträge öffentlicher Auftraggeber dar. Tunnelbauprojekte werden in der Regel durch öffentliche Auftraggeber vergeben. Im GWB finden sich allerdings keinerlei konkrete Regelungen für die Abrechnung des Bodenaushubs.

Daher wird die Basis hierfür in der DIN 1960 (VOB/A) [19] gelegt. In dieser Norm wird definiert, dass „die für die Ausführung der Leistung wesentlichen Verhältnisse der Baustelle, z. B. Boden- und Wasserverhältnisse, so zu beschreiben sind, dass der Bewerber ihre Auswirkungen auf die bauliche Anlage und die Bauausführung hinreichend beurteilen kann“.

In der DIN 18299 (VOB/C) [26] wird in diesem Zusammenhang gefordert, dass in der Leistungsbeschreibung „nach den Erfordernissen des Einzelfalls insbesondere“ folgende Angaben zu machen sind: „Bodenverhältnisse, Baugrund und seine Tragfähigkeit. Ergebnisse von Bodenuntersuchungen“. Weiter werden die folgenden Angaben gefordert: „Art, Zusammensetzung und Menge der aus dem Bereich des Auftraggebers zu entsorgenden Böden, Stoffe und Bauteile; Art der Verwertung oder bei Abfall die Entsorgungsanlage; Anforderungen an die Nachweise über Transporte, Entsorgung und die vom Auftraggeber zu tragenden Entsorgungskosten“.

Für Untertagebauarbeiten wird in der DIN 18312 (VOB/C) [27] angeführt, dass „Boden und Fels entsprechend ihrem Zustand vor dem Lösen in Homogenbereiche einzuteilen ist. Der Homogenbereich ist ein begrenzter Bereich, bestehend aus einzelnen oder mehreren Boden- oder Felsschichten, der für Untertagebauarbeiten vergleichbare Eigenschaften aufweist.“ In der Norm wird für die Erstellung der Leistungsbeschreibung darauf hingewiesen, dass „Boden und Fels [...] zu benennen und zu beschreiben sowie in Längs- und Querschnitten darzustellen ist“. Weiterhin wird gefordert, dass „wesentliche Änderungen der Eigenschaften und Zustände von Boden und Fels bei und nach dem Lösen, insbesondere in Verbindung mit Luft, Wasser, Stützflüssigkeit oder sonstigen Konditionierungsmitteln“ anzugeben sind. Ebenso sollen Angaben erfolgen zur „Verwendung der Ausbruchmassen und deren Transport über Tage“. Zum Thema Abrechnung wird definiert, dass für „Ausbruch, getrennt nach Vortriebsklassen unter Berücksichtigung der Homogenbereiche, [...]

Raumaß (m<sup>3</sup>) oder Längenmaß (m)“ als Abrechnungseinheiten vorzusehen sind. „Mehrmengen an Ausbruch sollen nach Raumaß (m<sup>3</sup>)“ abgerechnet werden. Außerdem wird in diesem Zusammenhang definiert, dass „Laden und Entsorgen von gelöstem Boden und Fels einschließlich systembedingter Beimengungen besondere Leistungen sind“.

In der DB-Richtlinie 853 „Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“ [13] sind keine Regelungen zur Abrechnung des Bodenaushubs zu finden.

Im Teil 5 (Tunnelbau) der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV ING) [10] werden zwar Vorgaben für die geotechnischen Untersuchungen gemacht - wie z.B. die Forderung nach einer Angabe zur Deponierbarkeit des Ausbruchmaterials - Angaben zur Abrechnung allerdings fehlen gänzlich.

Der DAUB fordert in seinen Empfehlungen zur Planung, Ausschreibung und Vergabe von schildgestützten Tunnelvortrieben [14] auch Angaben zur Abförderung und zur Separation inkl. der Beschreibung der Erschwernisse durch z.B. Verklebungerscheinungen oder Verschleiß. Darüber hinaus wird erläutert, dass im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens die „Eigenschaften des abgebauten Bodenmaterials im Hinblick auf die Deponieklasse“ zu definieren sind. Dies wird auch in der Checkliste zur Prüfung der Angebote aufgegriffen: hier soll unter der Rubrik „Umweltanforderungen“ auf Angaben zum „Ausbruchmaterial (Deponierfähigkeit, Konsistenzgrenzen, ...)“ geachtet werden. Unter der Rubrik „Besonderheiten bei Flüssigkeitsstützung und Spülförderung“ spielt ebenfalls die „Deponierfähigkeit (Konsistenz des Endproduktes, Wassergehalt, Stichfestigkeit, Transportfähigkeit, Kontaminierung)“ eine Rolle. Konkrete Empfehlungen zur Abrechnungsmodalität der genannten Aspekte werden allerdings nicht formuliert.

In den DAUB Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen [15] wird ausgeführt, dass „für eine abschließende Wirtschaftlichkeitsuntersuchung bei der Auswahl der TVM [...] auch der Bodentransport und die Deponierung zu berücksichtigen“ sind. Dies wird ausführlich konkretisiert, in dem auf die verschiedenen Möglichkeiten der Weiterverwendung des Bodenaushubs z.B. auch unter Zugabe von Kalk oder einer Zwischendeponierung zur Entwässerung eingegangen wird. In Richtung Abrechnung wird empfohlen, „die zu deponierenden

Böden bereits in der Planungsphase in verschiedene Kategorien“ einzuteilen. „Dazu bieten sich die Zuordnungsklassen nach LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) (Z0, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5) und die Deponieklassen (DK0, DK1, DKII, DKIII) an.“ Wie genau dann aber die vertragliche Regelung und damit die Abrechnung aussehen soll, wird nicht beschrieben.

**In Österreich** ist das Bundesgesetz über die Vergabe von Aufträgen (Bundesvergabegesetz – BVergG) [11] die Basis für Tunnelbauprojekte. Ähnlich wie in Deutschland enthält das Gesetz keine konkreten Regelungen zur Abrechnung des Bodenaushubs.

Die ÖNORM B 2110 [49], die die „allgemeinen Vertragsbestimmungen für Bauleistungen“ darstellt, enthält „Hinweise für die Ausschreibung und die Erstellung von Angeboten“. Hier wird ausgeführt, dass „in der Ausschreibung [...] alle Umstände, die für die Ausführung der Leistung und damit für die Erstellung des Angebotes von Bedeutung sind, sowie besondere Erschwernisse oder Erleichterungen, z.B. Baugrundverhältnisse, [...] anzuführen“ sind. Weiterhin sind Angaben zu machen zu „Deponien: insbesondere Lage, Zufahrten, Aufnahmefähigkeit, Einbauvorschriften, Rekultivierung“ sowie zur „Verwendung und Eigentum von gewonnenen Materialien“. In den Leistungsverzeichnissen sind eigene Positionen für die „Behandlung und Deponierung von im Baustellenbereich anfallenden Aushub-, Abtrags-, Abbruch- und Ausbruchsmaterialien, welche einer Baurestmassen-, Inertabfall-, Reststoff- oder Massenabfalldeponie zuzuordnen sind“, vorzusehen. Obwohl in der Norm einige Angaben zur Abrechnung z.B. von Regieleistungen oder von Materialien und Betriebsstoffen enthalten sind, fehlt die konkrete Vorgabe, wie mit der Abrechnung des Bodenaushubs zu verfahren ist.

In der den kontinuierlichen Vortrieb regelnden ÖNORM B 2203-2 [50] wird als Hinweis für die Ausschreibung und die Erstellung von Angeboten festgehalten, dass Angaben zur „Behandlung, Verwertung oder Deponierung von Ausbruchsmaterial [...] unter Berücksichtigung abfallwirtschaftsrechtlicher Vorgaben“ zu machen sind. Außerdem sind „Prognosen zur Verwertbarkeit des Ausbruchsmaterials mit Verteilung, Bandbreiten und örtlicher Zuordnung erforderlich“. Weiterhin sind Auswirkungen von Zusatzmaßnahmen auf die Deponierbarkeit des Ausbruches in eigenen Positionen zu erfassen. Zu Abrechnungsmodalitäten erfolgt kein Hinweis.

**In der Schweiz** zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Deutschland und in Österreich. Die SIA Norm 118 [55], in der die „allgemeinen Bedingungen für Bauleistungen“ geregelt werden, beinhaltet lediglich eher allgemeine Vorgaben hinsichtlich der Abrechnung des Bodenaushubs bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben. So wird beispielsweise gefordert, dass der „Bauherr vor der Ausschreibung die örtlichen Gegebenheiten, insbesondere die Beschaffenheit des Baugrundes, entsprechend den Anforderungen der auszuführenden Arbeit ermittelt“. Weiterhin heißt es, dass der Bauherr „das Ergebnis vollumfänglich in den Ausschreibungsunterlagen festhält, unter Hinweis auf erkannte Vorschriften und Gefahren“. An anderer Stelle wird geregelt, dass „Aushub- und Abbruchmaterialien [...] dem Bauherrn gehören“. „Wird [allerdings] ihr Abtransport auf eine Deponie des Unternehmers vereinbart, so geht das Eigentum des Bauherrn daran, mangels anderer Abrede, ohne Entschädigung auf den Unternehmer über“.

Die Untertagebauarbeiten werden in der SIA Norm 198 [56] geregelt. Hier heißt es, dass „der Ausbruch nach theoretischem Ausmass vergütet“ wird, sofern es keine anderslautende Festlegung in den Ausschreibungsunterlagen gibt. Detailliertere oder konkretere Angaben erfolgen nicht.

Einige Hinweise, wie mit dem Ausbruchmaterial zu verfahren ist, werden in der die „Erfassung des Gebirges im Untertagebau“ behandelnde SIA Norm 199 [57] gegeben. Eine Forderung lautet: „Es ist anzustreben, einen möglichst hohen Anteil des Ausbruchmaterials der Verwertung zuzuführen, wobei ökologische und wirtschaftliche Aspekte zu optimieren sind.“ Es folgt eine Klassifizierung der aus Ausbruchmaterial herstellbaren Materialien. Weiterhin wird in der Norm ausgeführt, dass „im Hinblick auf die Wahl des Transportmittels [...] die für Abförderung und Transport maßgebenden geotechnischen Eigenschaften des Ausbruchmaterials gesondert beurteilt werden“. Vorgaben oder Beispiele für die vertragliche Gestaltung zur Abrechnung des Bodenaushubs sind nicht enthalten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es keine eindeutigen Regelungen in den jeweiligen Gesetzen, Normen, Richtlinien und Empfehlungen gibt, die die Abrechnung des Bodenaushubs bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben definieren. Auch auf die aus den verschiedenen Schwachstellen im Prozess resultierenden Diskrepanzen und Ungenauigkeiten zwischen theoretischem

Bodenaushub und tatsächlichem Feststoffaustrag der Separieranlage wird nicht eingegangen. Daher wird eine projektspezifische, vertragliche Regelung erforderlich.

## 5.2 Übliche vertragliche Regelungen

Bei der Betrachtung verschiedener vertraglicher Regelungen fällt auf, dass große Unsicherheiten bezüglich der konkreten Gestaltung sowie grundsätzlich eher von Misstrauen geprägte Ansätze zu existieren scheinen.

Häufig sind die Verträge in Bezug auf den Umgang mit den Bodenmassen so gestaltet, dass der Auftragnehmer gegenüber dem Auftraggeber das theoretisch abgebaute Volumen in m<sup>3</sup> abrechnen muss. Die Abrechnung gegenüber dem mit der Abfuhr betrauten Subunternehmer erfolgt dahingegen über die tatsächlich zu transportierende Masse in to. Das Risiko, das mit den zuvor beschriebenen Ungenauigkeiten einhergeht, soll damit also vollumfänglich auf den Auftragnehmer oder die Subunternehmer übertragen werden. Durch das Ausblenden dieser Problematik bzw. das Verschieben in die Unternehmersphäre wird bereits in dem Vergabeverfahren der Grundstein für interpretative Herangehensweisen und für eine konfliktreiche Projektabwicklung gelegt.

Auch bei Verträgen, in denen die Abrechnung von tatsächlichen Massen – also in to – erfolgen soll, finden sich immer wieder relativierende Mechanismen, die einem spekulativen Missbrauch durch die Auftragnehmer vorbeugen sollen und doch nur zu einer nicht klar geregelten Situation führen. So werden beispielsweise Formulierungen entweder in den Positionsbeschreibungen, in den Erläuterungen im Leistungsverzeichnis oder in den allgemeinen bzw. technischen Vorbemerkungen gewählt, in denen etwaige Abweichungen der Konsistenz und die dann damit einhergehenden Mehrkosten bei dem Transport, der Weiterverwendung oder der Entsorgung des Aushubs der Risikosphäre des Auftragnehmers zugeordnet werden sollen. Ein anderes Beispiel für eine die Grundregelung der tatsächlichen Massenabrechnung wieder aufhebende Formulierung ist ein in einer technischen Vorbemerkung zur Leistungsbeschreibung enthaltener Hinweis, dass ggf. höhere Entsorgungskosten, die auf vortriebsbedingte Veränderungen der Einstufung des Bodens in die jeweiligen LAGA-Klassen zurückzuführen sind, bei der Preisbildung der Deponierung durch den Auftragnehmer zu berücksichtigen sind. Die somit fehlende klare Vorgabe führt wieder zu Interpretationen bei der Angebotserstellung sowie zu einer wenig konfliktarmen Ausführung.

## 6 Dispergierung

Es wird deutlich, dass es eine sehr große Anzahl an Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen dem theoretisch abzubauenden Boden und dem tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage gibt. Allein durch diese hohe Anzahl wird die Komplexität des Themas offensichtlich. Da manche Einflussfaktoren in verschiedenen Prozessen des Bodenmassenmanagements eine Rolle spielen und dadurch die Übersichtlichkeit erschwert wird, wird im Folgenden eine Systematisierung und Kategorisierung vorgenommen. Wie die Prinzipskizze in der Abbildung 9 verdeutlicht, lassen sich die Kategorien „Geotechnische Einflussfaktoren“, „Maschinentechnische Einflussfaktoren“ und „Verfahrenstechnische Einflussfaktoren“ bilden. Die Summe aller in diese Kategorien eingeordneten Einflussfaktoren bildet den Gesamteinfluss, der auf den genannten Zusammenhang wirkt. So lässt sich eine überschaubare Systematik entwickeln, die die Handhabung des Themas deutlich vereinfacht.

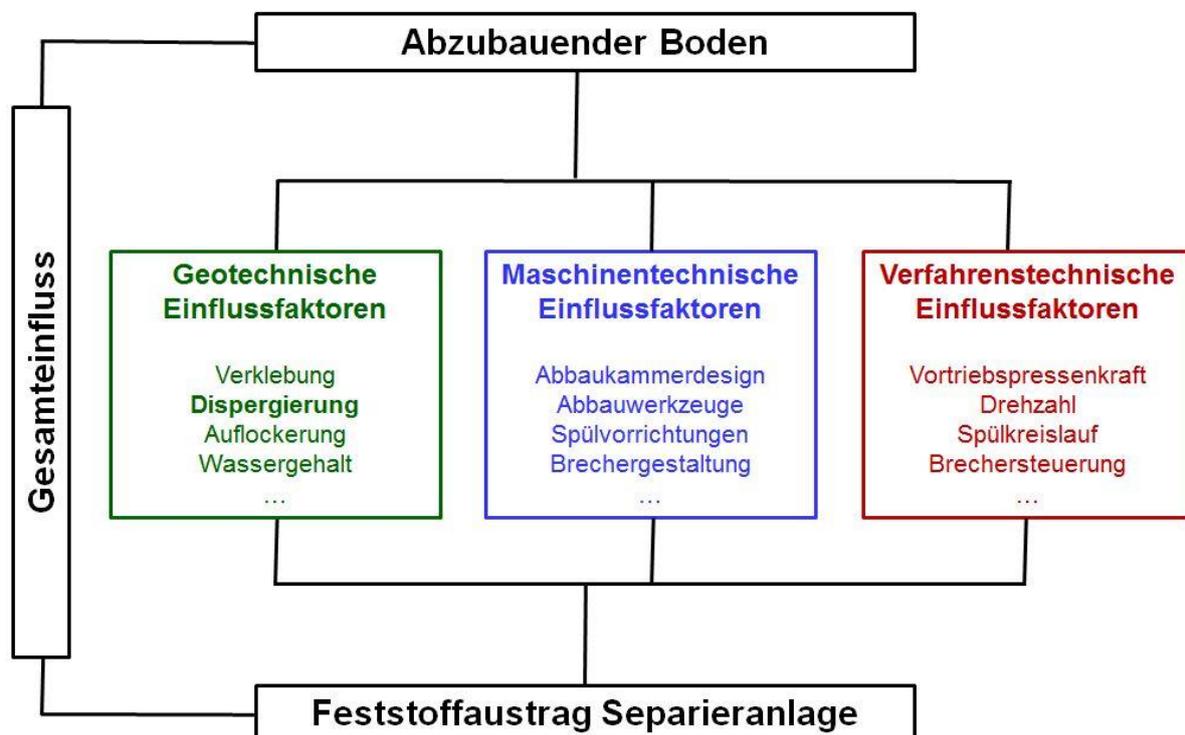


Abbildung 9: Systematisierung der Einflussfaktoren

Um darüber hinaus auch einen Überblick über alle bisher als relevant identifizierten Einflussfaktoren geben zu können, werden diese in den genannten Kategorien in der

folgenden Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber erfolgt die Auflistung in alphabetischer Reihenfolge.

*Tabelle 4: Übersicht über die identifizierten relevanten Einflussfaktoren*

<b>Geotechnische Einflussfaktoren</b>	<b>Maschinentechnische Einflussfaktoren</b>	<b>Verfahrenstechnische Einflussfaktoren</b>
Agglomeratsbildung	Abbaukammerdesign	Austausch Suspension
Aufladung	Abbauwerkzeuge	Brechersteuerung
Auflockerung	Anzahl Hydrozyklone	Drehzahl
Deponierfähigkeit	Anzahl Zentrifugen bzw.	Einstellungen / Betrieb
Dichte / Wichte	Kammerfilterpressen	Hydrozyklone
Dispergierung	Ausbildung geschlossenes	Interpretationen
Konglomeratsbildung	Sohlsegment	Massenbilanzierung
Korngrößenverteilung	Brechergestaltung	Kalibrierung / Wartung
Restfeuchte	Genauigkeit Dichtemesser	Dichtemesser
Transportfähigkeit	Genauigkeit	Kalibrierung / Wartung
Verklebung	Durchflussmesser	Durchflussmesser
Verschleiß (Abrasivität)	Größe Siebflächen	Kalibrierung / Reinigung / Wartung Komponenten
Wassergehalt (natürlicher) / Wassergehaltsänderung	Positionierung Dichtemesser	Separieranlage
Weiterverarbeitbarkeit	Positionierung	Kalibrierung / Reinigung / Wartung
	Förderbandwaagen	Förderbandwaagen
	Rückräumer	Förderbandwaagen
	Spülkreislauf (Auslegung,	Spülkreislauf (Betrieb)
	Dimensionierung,	Volumenstrom
	Installation)	Vortriebspressenkraft
	Spülvorrichtungen	
	- Zentrumsspülung	
	- Brecherspülung	
	Schneidraddesign	

Im Rahmen der vertieften Auseinandersetzung mit der hier behandelten Thematik wurde an verschiedenen Stellen deutlich, dass von diesen Einflussfaktoren die

---

Dispergierung eine zentrale Rolle spielt, da sie in verschiedene Berechnungen direkt oder indirekt einfließt und somit maßgeblichen Anteil z. B. an der Dimensionierung der Separieranlage sowie der Vorhersage des Feststoffaustrags hat. In der Tunnelbaupraxis wird routiniert mit dem Begriff Dispergierung umgegangen und es sind zahlreiche Prognosen zu der zu erwartenden Größenordnung der Dispergierung bei verschiedenen Böden in Erfahrung zu bringen. So wurde z.B. im Rahmen der Angebotsbearbeitung für das Projekt „U4 HafenCity Hamburg“ 2006 eine dezidierte Ermittlung der zu erwartenden Abfuhrmassen und der erforderlichen Anzahl der Zentrifugen vorgenommen [6]. In dieser Ausarbeitung wird unter anderem ausgeführt, dass 30% des prognostizierten Glimmertons als „grobkörnige Zusammenklumpungen [...] abgetrennt werden“. Demnach beläuft sich hier der erwartete Dispergierungsgrad auf 70%. Bei zwei Projekten in England, bei denen die Tunnel jeweils zu großen Teilen in Kreide zu liegen kommen, gestaltet sich das Bild hinsichtlich der Vorhersage der Dispergierung ähnlich. Bei dem Projekt „Crossrail C310“ wurde 2011 in der „Early Contractor Involvement (ECI)“ – Phase versucht, die Anzahl der vorzusehenden Kammerfilterpressen zu ermitteln [47]. Maßgebend für die Dimensionierung war hierbei der Streckenabschnitt, für den eine Bodenzusammensetzung von 95% Kreide und 5% Feuerstein prognostiziert wurde. In der Kalkulation wurde bzgl. der Kreide die Annahme zu Grunde gelegt, dass diese zu 100% dispergiert. Die gleiche Annahme bzgl. des Dispergierungsverhaltens der Kreide ist auch in dem 2016 ebenfalls in der ECI-Phase des Projektes „Humber Crossing“ erstellten „Spoil Treatment and Arisings Management Plan“ [51] zu finden. Hier sind die Streckenabschnitte maßgebend, in denen nahezu vollständig die sogenannten „Flamborough“ und / oder „Burnham“ Kreiden prognostiziert wurden. Bei gezieltem Hinterfragen basieren die Größenordnungen der zu erwartenden Dispergierung jedoch ausschließlich auf subjektiven Einschätzungen. Eine objektive, nachvollziehbare und reproduzierbare Grundlage zur Ermittlung der Dispergierungsneigung verschiedener feinkörniger Böden existiert bisher nicht. Daher wurde die Dispergierung ins Zentrum dieser Untersuchungen gestellt, was im Folgenden erläutert wird. Zunächst werden vertieft Grundlagen zur Dispergierung angeführt, gefolgt von einer für die Tunnelbaupraxis geeigneten Definition. Anschließend werden die durchgeführten Laborversuche vorgestellt, deren Ziel es war, die bisher fehlende Grundlage zur Ermittlung der Dispergierungsneigung zu

schaffen. Das Kapitel wird mit einem Fazit zum Thema Dispergierung abgeschlossen.

## 6.1 Grundlagen und Definition

Bei der Recherche zu dem Themenbereich „Dispergierung“ wurde deutlich, dass der Begriff in äußerst verschiedenen Disziplinen eine Rolle spielt und dabei unterschiedlich definiert wird. So lässt sich der Begriff Dispergierung oder Dispersion z.B. im Zusammenhang mit der Herstellung von Farben und Lacken finden. Dies spielt allerdings in dem hier untersuchten Zusammenhang keine Rolle, so dass zur Verbesserung der Übersichtlichkeit auf eine Erläuterung des Dispergierungsverständnisses in dem Farben-Kontext verzichtet wird. Im Folgenden wird lediglich auf die sehr artverwandte mechanische Verfahrenstechnik und naheliegenderweise auf die Bodenkunde eingegangen. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit einer Definition der Dispergierung für den maschinellen Tunnelbau.

### 6.1.1 Dispergierung in der mechanischen Verfahrenstechnik

Gemäß Stieß [58] ist die Dispergierung dem Mischen – eine der sogenannten Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik – unterzuordnen (siehe Tabelle 5). Grundsätzlich werden in der mechanischen Verfahrenstechnik die Veränderung oder Beeinflussung von Eigenschaften von Stoffen bzw. deren Partikeln durch die Einwirkung mechanischer Mittel beschrieben.

Tabelle 5: Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik nach Stieß [58]

Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik		Bezeichnungen
mit Änderung der Partikelgröße	Zerkleinern	Brechen, Mahlen, Schneiden, Zerfasern, Desagglomerieren
	Agglomerieren	Granulieren, Pelletieren, Dragieren, Kompaktieren, Tablettieren, Brikettieren
ohne Änderung der Partikelgröße	Trennen	Klassieren, Sieben, Sichten, Sortieren, Abscheiden, Klären, Sedimentieren, Filtrieren, Zentrifugieren, Entstauben
	Mischen	Homogenisieren, Rühren, Feststoffmischen, Kneten, <b>Dispergieren</b> , Emulgieren, Begasen, Zerstäuben

Bei der Grundoperation „Mischen“ kommt es gemäß Stieß [58] zu keiner Änderung der Partikelgröße, es ist vielmehr so, dass zufällige oder gezielt erzeugte Bewegungen einzelner Partikel zu einer Veränderung der Stoffeigenschaften führen.

Bei dem dem Mischen untergeordneten Vorgang der Dispergierung ist das maßgebende Kriterium, dass es sich um eine „feine Verteilung“ von Partikeln handelt. Dies spiegelt sich auch in der lateinischen Wortherkunft „dispers = fein verteilt“ wieder. In der Regel findet diese feine Verteilung in einem Fluid statt, da sich insbesondere sehr kleine Partikel leichter in Flüssigkeiten verteilen als im trockenen Zustand [58]. Hierbei wird dann von einer Nassdispergierung gesprochen, der Vorgang ohne Verwendung von Flüssigkeiten wird entsprechend Trockendispergierung genannt. Neben der Verteilung spielt in der mechanischen Verfahrenstechnik die Zerlegung die zweite entscheidende Rolle bei der Definition der Dispergierung. Dies ist beispielsweise im Rahmen der Partikelgrößenanalyse relevant, da es hierbei um die Identifizierung einzelner und kleinster Partikel geht. Dementsprechend sind größere Partikel bzw. Agglomerate durch mechanische Einwirkungen zu zerlegen.

### **6.1.2 Dispergierung in der Bodenkunde**

In der Bodenkunde taucht der Begriff Dispergierung bisher eher als Randerscheinung auf. Zu diesem Ergebnis kommen auch Feinendegen et al. [32] im Zuge einer projektspezifischen gutachterlichen Stellungnahme zur Dispersionsneigung des anstehenden überwiegend bindigen Bodens. So existieren in Deutschland lediglich die folgenden Verfahren zur Bestimmung der Veränderlichkeit von Festgesteinen, bei denen sich eventuell aus den Versuchsergebnissen Rückschlüsse auf die Dispergierung ziehen lassen:

- Wasserlagerungsversuch nach DIN EN ISO 14689-1
- Siebtrommelversuch nach Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises Versuchstechnik Fels der DGGT, entspricht dem Slake Durability Test nach ASTM D 4644
- Ausspülttest der Bundesanstalt für Wasserbau nach der Richtlinie zur Prüfung von mineralischen Weichdichtungen und deren Einbauverfahren im Verkehrswasserbau (RPW)

Beim Wasserlagerungsversuch wird eine nicht getrocknete Probe für 24 Stunden in klarem Wasser gelagert. Entsprechend des Zerfalls folgt eine Einteilung in vier bzw. fünf Veränderlichkeitsklassen (DIN 4022-1 bzw. DIN EN ISO 14689-1) von nicht veränderlich (keine Veränderung an der Probe) bis stark veränderlich (Probe ganz zerfallen).

Der Ausspültest dient zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit eines unter Wasser eingesetzten Dichtungsmaterials aus Ton und hydraulischen Bindemitteln gegen Erosion, das beim Einbau frei durch Wasser fällt. Dafür werden 2000g des zu testenden Dichtungstoffes in einen dafür vorgesehenen Siebkorb gefüllt und verdichtet, der danach in die Testapparatur eingehängt und schließlich dreimal im freien Fall durch eine 1m hohe Wassersäule in einem Zylinder geführt wird. Durch erneutes Wiegen der Probe nach Versuchsdurchführung kann der Masseverlust bestimmt werden. Sofern der Masseverlust 6% nicht unterschreitet, wird der Erosionswiderstand als ausreichend erachtet.

Der Siebtrommelversuch wird detailliert in Kapitel 6.2.1.1 beschrieben.

In der DIN 18123 [22] wird Dispergierung als „mechanisches Aufbereiten einer Bodenprobe zu deren Trennung in Einzelkörner“ definiert.

Im Ausland existieren einige standardisierte Verfahren mit dem Begriff „Dispergierung“ als ausdrücklichem Untersuchungsschwerpunkt. Gemäß Feinendegen et al. [32] handelt es sich hierbei um die Folgenden:

- Crumb Test (ASTM D 6572)
- Pinhole Test (ASTM D 4647)
- Double Hydrometer (ASTM 4221)

Der Crumb Test wird je nach Probenbeschaffenheit in zwei verschiedene Methoden unterteilt: Methode A für natürliche, unbearbeitete Bodenproben und Methode B für aufbereitete Bodenproben (Würfelform). Diese Methoden unterscheiden sich lediglich in der Auswahl bzw. Verarbeitung der Proben, die eigentliche Testmethode ist in beiden Fällen gleich und erlaubt eine qualitative Einschätzung der dispersiven Eigenschaften toniger Böden. Laut Empfehlung sollte der Crumb Test in Kombination mit dem Pinhole Test und dem Double Hydrometer Test durchgeführt werden, um

---

verlässliche Aussagen treffen zu können. Die alleinige Auswertung des Crumb Tests kann zu widersprüchlichen Schlüssen führen.

Zur Durchführung des Crumb Tests sollten keine getrockneten Proben verwendet werden. Es wird entweder ein Würfel aufbereiteten Bodens der Kantenlänge  $15 \pm 5$  mm oder ein natürlicher Probenkörper mit vergleichbaren Abmessungen vorsichtig in ein mit 250ml destilliertem Wasser gefülltes Gefäß gelegt. Sowohl die Temperatur des Wassers (ca. 21 Grad Celsius) als auch die augenscheinliche Veränderung der Bodenprobe nach zwei Minuten, einer Stunde bzw. 6 Stunden hinsichtlich ihres Zerfalls wird protokolliert. Zur Bewertung dienen die Zerfallsgrade 1 – 4 (1 – Non-Dispersive, 2 – Intermediate, 3 – Dispersive, 4 – Highly Dispersive).

Der Pinhole Test dient als Versuch zur qualitativen Beurteilung der Dispersivität und insbesondere der Erodierbarkeit eines bindigen Bodens. Dazu wird eine vorbereitete und verdichtete Bodenprobe in den Pinhole-Test-Zylinder gegeben, in dem sich bereits etwas grober Sand auf einem Schirmdraht befindet (vgl. Abbildung 10). Anschließend wird eine Zentrierhilfe aus Plastik oder Metall mit einer 1,5mm großen Öffnung in der Mitte in die Bodenprobe gedrückt und mit einem Stück Draht oder einer Nadel ein etwa 1mm großes Loch durch diese Öffnung in die Bodenprobe bis in den darunter befindlichen Sand gestochen. Anschließend wird auch oberhalb der Bodenprobe Schirmdraht und darauf etwas Sand platziert, ohne dass dadurch die Öffnung in der Bodenprobe verschlossen wird. Der Zylinder wird anschließend verschlossen und horizontal in die Testapparatur eingesetzt.

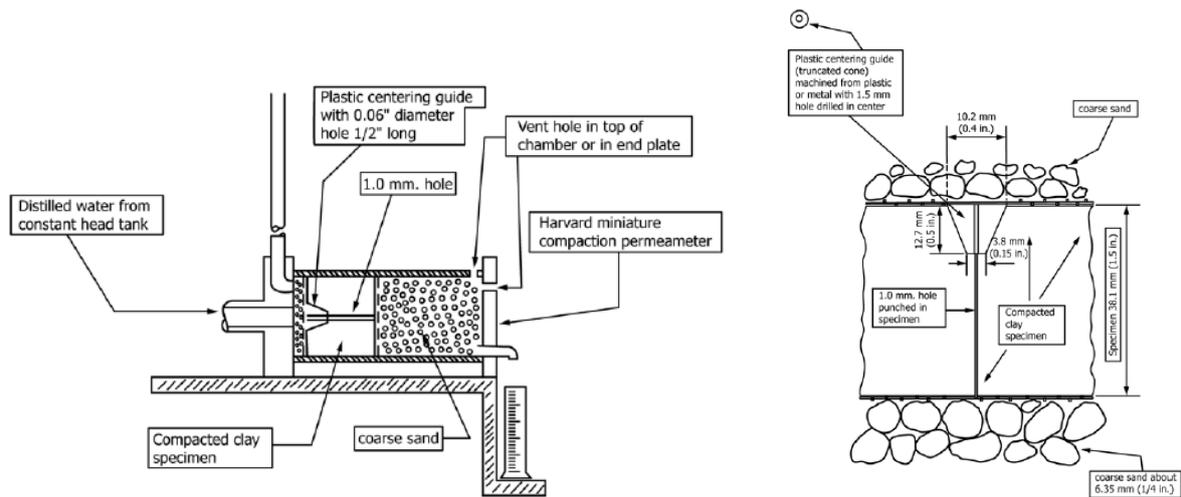


Abbildung 10: Versuchsaufbau Pinhole Test nach ASTM D4647 [3]

Nun lässt man wiederholt eine bestimmte Menge destillierten Wassers durch die Bodenprobe fließen und notiert die benötigte Zeit; Wassermenge und Fließgeschwindigkeit werden ebenfalls protokolliert. Sobald sich eine konstante Fließgeschwindigkeit einstellt, kann der Test abgebrochen werden. Zur Bewertung der Dispersivität des Bodens werden abschließend die Versuchsflüssigkeit, die Fließgeschwindigkeit und die finale Größe des Lochs in der Probe herangezogen. Diese Angaben dienen zur späteren Klassifizierung des Bodens. Für dispersive Böden wird eine dunkle Farbe der Flüssigkeit und eine deutliche Aufweitung des Lochs und damit einhergehend eine steigende Fließgeschwindigkeit erwartet. Bei nicht dispersiven Böden ist die Flüssigkeit klar und keine messbare Aufweitung des Lochs zu erwarten.

Es gibt verschiedene Varianten des Pinhole Tests hinsichtlich der Versuchsdauer oder der verwendeten Wassermenge, die an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Auch die Bewertung der Ergebnisse bzw. Klassifizierung der Bodenproben ist nach unterschiedlichen Methoden möglich.

Mit dem Double Hydrometer Test, der als Möglichkeit zur quantitativen Einschätzung der Dispergierbarkeit vieler bindiger Böden dient, wird eine prozentuale Dispergierung ermittelt. Dazu wird an zwei identischen, repräsentativen Bodenproben eine Sedimentationsanalyse durchgeführt, um den Anteil an Partikeln kleiner als  $2\mu\text{m}$  zu bestimmen. Eine der Proben wird vor der Sedimentationsanalyse (Hydrometer Test) vollständig dispergiert (mechanisch mit einem Rührgerät oder chemisch durch

Zugabe eines Dispergiermittels), die andere Probe wird mit Vakuum beaufschlagt, sodass die in der Probe enthaltene Luft vollständig entzogen wird. Zur Sedimentationsanalyse ist ausschließlich destilliertes oder demineralisiertes Wasser zu verwenden, die Tests werden entweder an luftgetrockneten oder feuchten Proben durchgeführt. Eine Ofentrocknung ist nicht zugelassen.

Die Auswertung erfolgt durch Vergleich der Massenprozentanteile  $< 2\mu\text{m}$  der nicht dispergierten und der dispergierten Probe.

### 6.1.3 Dispergierung im Tunnelbau

Nach Feinendegen et al. [32] handelt es sich bei der Dispergierung bezogen auf bindige Böden um die „Aufspaltung von Aggregaten zu Primärteilchen“. Dieser Vorgang werde durch die folgenden Faktoren beeinflusst:

- Mineralzusammensetzung
- Partikeloberflächen
- Kationenbelegung des Bodens
- Lösungsschemie

Zusammenfassend kommen Feinendegen et al. [32] zu dem Schluss, dass die aufgestellten Hypothesen bzgl. der Einflussfaktoren auf die Dispergierung zwar wahrscheinlich, allerdings insbesondere aufgrund der „Zufälligkeiten und Unzulänglichkeiten bei der Probennahme“ nicht bewiesen sind. Es werden weitere Untersuchungen empfohlen, wobei allerdings hervorgehoben wird, dass es bisher keine genormten Methoden zur Feststellung der Dispergierungsneigung gibt.

Nach Möbius [46], der sich umfassend mit den auch beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb maßgeblich relevanten Bentonitsuspensionen beschäftigt hat, handelt es sich bei der Dispergierung um die „Aufteilung der Agglomerate aus Bentonit-Teilchen in Primärteilchen unter Einwirkung von Scherkräften“.

Für den maschinellen Tunnelbau lässt sich festhalten, dass eine standardisierte Untersuchungsmethode zur Feststellung der Dispergierungsneigung verschiedener Böden und veränderlicher Festgesteine notwendig ist. Zur Abgrenzung zu den anderen Disziplinen, bei denen die Dispergierung eine Rolle spielt sowie zur Präzisierung des Verständnisses des Begriffes „Dispergierung“ im Tunnelbau, erscheint eine spezifische Definition hilfreich zu sein. In Anlehnung an die bisherigen

artverwandten Überlegungen soll für die sich anschließenden Ausführungen die folgende Definition gelten:

***Dispergierung ist die Zerlegung eines Stoffes (hier Boden) in sehr kleine (Einzel-) Partikel und Verteilung dieser Partikel in einer Flüssigkeit.***

Ergänzend zu dieser Definition des Begriffes „Dispergierung“ lässt sich für den Tunnelbau noch das Charakteristikum formulieren, dass die Abtrennbarkeit von dispergiertem Boden nicht mehr mit den im Förderkreislauf befindlichen Separationsstufen (Siebe, Hydrozyklone) gegeben ist, sondern erst nach Ausschleusung der entsprechend aufgeladenen Suspension durch die Verfahren zur Feinstkornabtrennung (i.d.R. Zentrifugen oder Filterpressen) gelingt.

## **6.2 Laboruntersuchungen zur Feststellung der Dispergierungsneigung**

Bisher existieren lediglich die im Folgenden aufgeführten Ansätze für Laborversuche, die das Thema Dispergierung behandeln. Meistens wurde hierbei aber die Dispergierung entweder eher als „Nebeneffekt“ betrachtet oder aber es handelte sich um Untersuchungen, die keine Anwendbarkeit im Tunnelbau zum Ziel hatten.

Baumgärtel et al. [5] haben sich mit dem entwickelten hydraulischen Zerfallsindexversuch und dem Radreifenversuch (Abbildung 11) mit Tonen und Tonsteinen dem Thema Dispergierung bei Hydroschildvortrieben noch am ehesten genähert, ohne allerdings den Begriff „Dispergierung“ in den Mittelpunkt zu stellen.

Zur Abbildung eines hydraulischen Förderkreislaufes wurden mit Hilfe eines Rotationstrommelversuchs mechanische und hydraulische Einwirkungen auf Bodenproben in einem geschlossenen und mit einem Fluid gefüllten Kunststoffzylinder unter Variation der Rotationsdauer und -geschwindigkeit simuliert.



Abbildung 11: Hydraulischer Zerfallsindexversuch (li) und Radreifenversuch (re) [5]

Das Ziel war die Bestimmung eines sogenannten hydraulischen Zerfallsindex (vgl. Abbildung 12) als Vergleichswert in Abhängigkeit von anderen Bodenkennwerten (z.B. Trockendichte oder Konsistenzzahl). Zur Beurteilung des Zerfalls werden anschließend an den Versuch die Massenanteile der zerfallenen Bodenprobe für verschiedene Trennkornbereiche ( $>2\text{mm}$ ,  $<0,2\text{mm}$  und  $<0,02\text{mm}$ ) durch Siebung und Sedimentation bestimmt. Es wurden unterschiedliche Böden und Versuchsflüssigkeiten getestet. Eine großmaßstäbliche Umsetzung mit dem gleichen Ziel stellt der Radreifenversuch dar, wobei dieser aufgrund der erforderlichen Probenmenge von 10kg eher nicht für die Durchführung in einem Baustellenlabor geeignet ist.

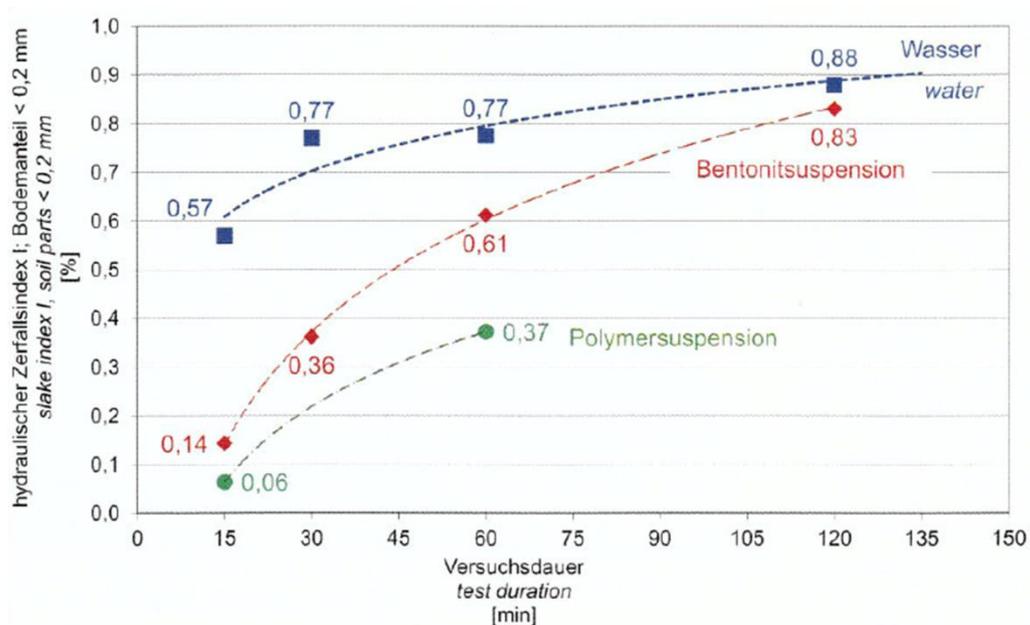


Abbildung 12: Ergebnisse des hydraulischen Zerfallsindexversuchs [5]

Der Ansatz des hydraulischen Zerfallsindexversuchs und der hier entwickelten, in Abschnitt 6.2.1.2 vorgestellten Methode ist ähnlich, jedoch sind eindeutige Unterschiede in der Versuchskonzeptionierung sowie der Zielsetzung erkennbar. Während Baumgärtel et al. [5] den Fokus auf die zerfallene Bodenprobe legen, soll hier die Versuchsflüssigkeit analysiert werden, um Rückschlüsse auf die Dispergierung zu ziehen.

Hollmann setzt sich in seiner Arbeit [40] neben der Verklebung auch intensiv mit dem Thema „Feinkornfreisetzung“ und damit indirekt mit der Dispergierung auseinander. Unter anderem wird der Siebtrommelversuch (vgl. Abschnitt 6.2.1.1) in einer abgewandelten Form angewendet, um die aus dem Versuch entstehenden Zerfallsprodukte nach dem zweiten Zyklus einer weiteren bodenmechanischen Analyse zu unterziehen. Zum einen werden im Unterschied zum Originalversuch keine getrockneten Bodenproben, sondern bergfeuchte Proben verwendet. Zum anderen folgt eine Bestimmung der Konsistenzgrenzen bzw. eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse an der ganzen zerfallenen Bodenprobe, einschließlich Siebtrommelrückstand und Siebtrommeldurchgang. Schematisch ist diese Vorgehensweise der folgenden Abbildung 13 zu entnehmen.

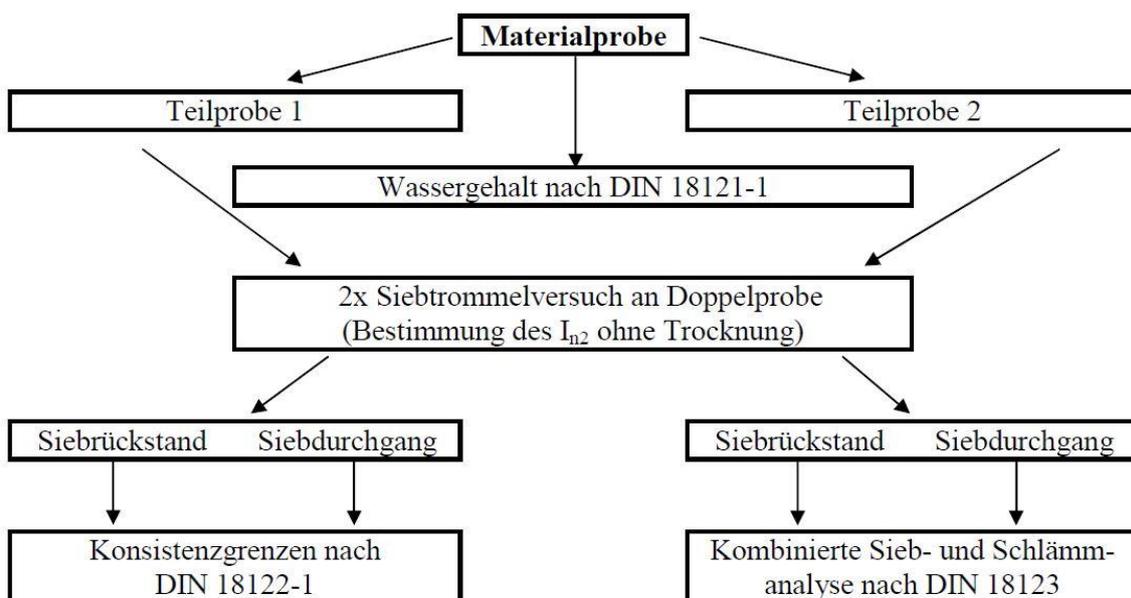


Abbildung 13: Versuchskonzept nach Hollmann [40]

Die durchgeführten Laborversuche führen in Bezug auf die Dispergierungsneigung zu Ansätzen eines Diagramms (siehe Abbildung 14) sowie zu der Empfehlung, diese Ansätze weiterzuverfolgen sowie die Aussagen des Diagramms „im Rahmen weiterer Schildvortriebe“ zu überprüfen und einzugrenzen.

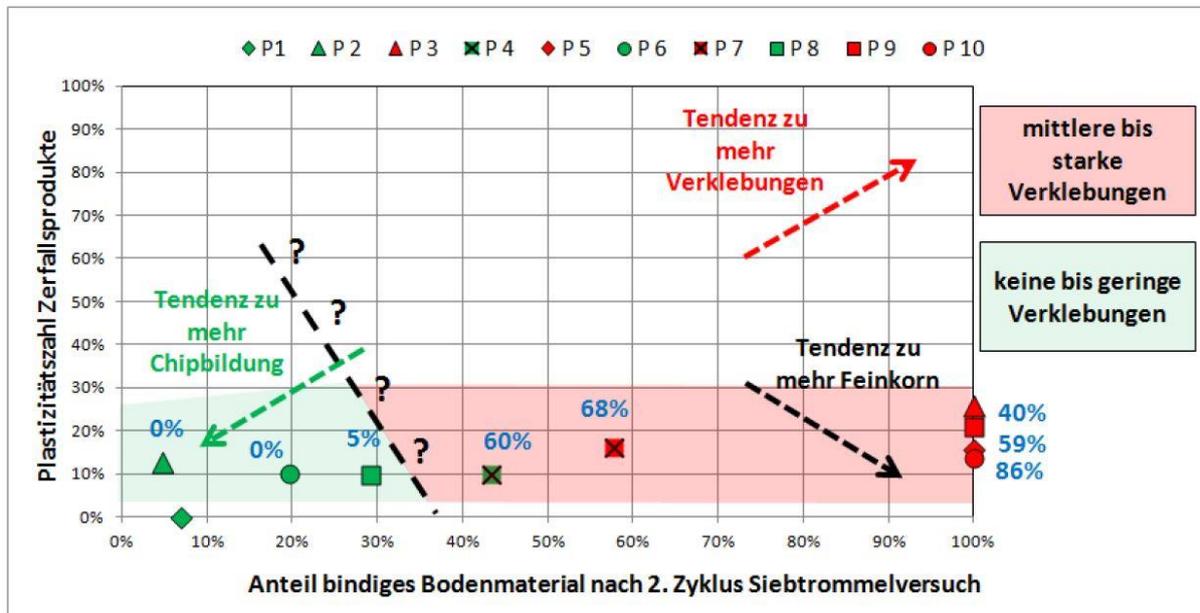


Abbildung 14: Diagramm mit Einschätzung zur Feinkornfreisetzung [40]

Analog zu Hollmann [40] wird in dem hier entwickelten modifizierten Siebtrommelversuch ebenfalls mit bergfeuchten Proben gearbeitet. Ein deutlicher Unterschied liegt aber in der Versuchskonzeptionierung und der Untersuchung der Probenrückstände, da in dieser Arbeit nicht ausschließlich die zerfallene Bodenprobe, sondern die Versuchsflüssigkeit weiter betrachtet wird.

Leshchinsky et. al. [43] haben sich mit dem Zerfall von Tonklumpen im Leitungssystem von Schwimmbaggern und damit indirekt mit der Dispergierung auseinandergesetzt. Es wurde eine Versuchsanordnung (Abbildung 15) entwickelt, mit der die Interaktion zwischen Tonklumpen, der Transportleitung und der Transportflüssigkeit simuliert werden sollte.

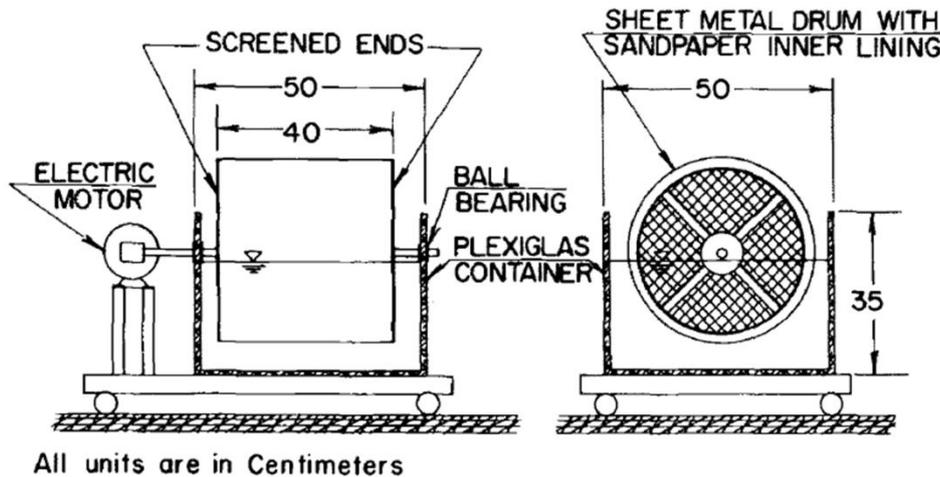


Abbildung 15: Versuchsanordnung von Leshchinsky et al [43]

Die verwendeten Probekörper wurden aus Bentonit und Kaolinit künstlich hergestellt, um konstante Werte für die Plastizität und die Trockendichte zu erzielen. Die Probekörper wurden dann in eine auf der Innenseite mit Sandpapier beschichtete Blechtrommel gegeben und für eine bestimmte Zeit bei einer definierten Geschwindigkeit in einem mit Leitungswasser gefüllten Plexiglasbehälter rotiert. Als Ergebnis wurden Diagramme entwickelt, die den Prozentanteil des intakten Materials über die Versuchsdauer bzw. die Degradierung des Materials in Abhängigkeit der Geschwindigkeit darstellen (Abbildung 16).

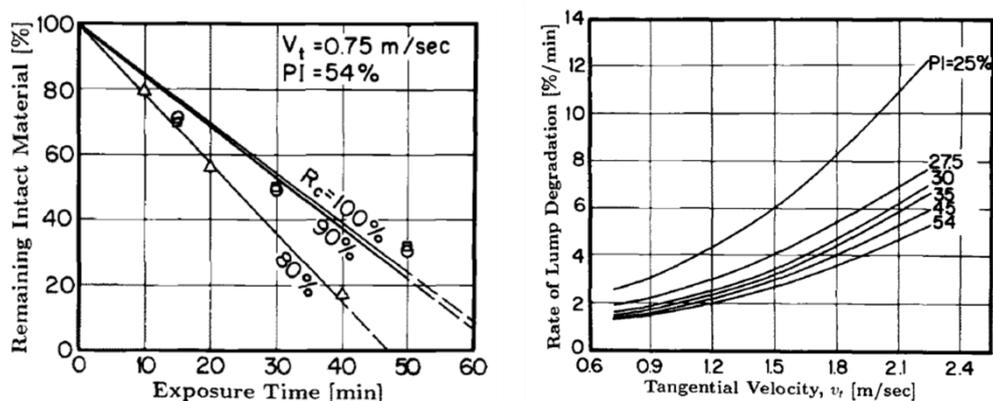


Abbildung 16: Versuchsergebnisse (Beispiel) von Leshchinsky et al [43]

Wesentliche Erkenntnisse der durchgeführten Versuche sind, dass die Größenordnung des Zerfalls von der Länge der Transportleitung, von der Dichte und der Plastizität des Tons sowie von der Transportgeschwindigkeit abhängt. Ob es sich

bei den zerfallenen Anteilen der Probekörper um tatsächlich dispergiertes oder lediglich abgeschältes Material gehandelt hat, wurde nicht untersucht. Einen entscheidenden Unterschied zu dem in dieser Arbeit entwickelten Versuch stellt die künstliche Herstellung der Probekörper dar, während hier mit natürlich gewonnenen Proben gearbeitet wird. Außerdem ist wiederum festzustellen, dass ein Fokus auf das in der Trommel verbleibende Material gelegt und dessen Veränderung über die Versuchsdauer analysiert wird. Die Analyse der Versuchsflüssigkeit, um Rückschlüsse auf das dispergierte Material ziehen zu können, wird auch hier nicht in Betracht gezogen.

In Untersuchungen von Bell et al. [7], [8] zur Dispergierung werden verschiedene Testmethoden zur Beurteilung von dispersiven bzw. nicht dispersiven Böden auf ihre Aussagekraft analysiert. Der Hintergrund dieser Untersuchungen waren einige Havarien von Erddämmen bzw. Böschungen aufgrund von Erosion bei dispersiven Böden in Südafrika. Eine Schlussfolgerung ist, dass keine der existierenden Testmethoden alleine ausreicht, um verlässliche Aussagen zur Beurteilung von Böden hinsichtlich ihrer Dispergierungsneigung zu treffen. Nur eine Kombination mehrerer Testmethoden bzw. Bodenparameter kann zu einer näherungsweisen Annahme führen. Anhand mehrerer Versuchsreihen unter Anwendung verschiedener wissenschaftlicher Methoden (z.B. Pinhole Test, Crumb Test, etc.) wird ein Rating für disperse Böden vorgeschlagen (Abbildung 17).

Pinhole test	Class Rating	Dispersive 5	Moderate 3	Slightly 1	Nondispersive 0
CEC vs. ESP	Class Rating	Highly dispersive 4	Dispersive 3	Marginal 1	Nondispersive 0
Crumb Test	Class Rating	Strong reaction 3	Moderate 2	Slight 1	No reaction 0
SAR	Class Rating	Over 2 2	1.5–2 1		Less than 1.5 0
TDS vs. %Na	Class Rating	Dispersive 2	Intermediate 1		Nondispersive 0
	Total Rating	Highly dispersive 12 or above	Moderately dispersive 8–11	Slightly dispersive 5–7	Nondispersive 4 or less

Abbildung 17: Ratingsystem von Bell et al. [8] zur Identifikation dispersiver Böden

Eine Testmethode zur Quantifizierung der Dispergierungsneigung eines Bodens wird hier nicht entwickelt, es werden lediglich qualitative Aussagen anhand existierender Versuche und deren Ergebnisse getroffen.

Die Ansätze sowohl von Baumgärtel als auch von Hollmann aufgreifend ist das Ziel der hier vorgestellten Laboruntersuchungen, die Dispergierungsneigung feinkörniger Böden zu ermitteln. Hierzu ist der Abbau- und Förderprozess bei einem flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb möglichst praxisnah zu simulieren. Dementsprechend ist zwingend eine Apparatur vorzusehen, bei der gleichzeitig eine mechanische und eine hydraulische Belastung auf den Probekörper einwirken.

Zusätzlich ist ein entscheidender Grundgedanke, möglichst nah an einem bereits existierenden, genormten Versuch zu bleiben, um einerseits die Akzeptanz in der Fachwelt zu erleichtern und andererseits eine schnelle Einführung in die Praxis zu ermöglichen, was bei der Entwicklung einer komplett neuen Apparatur – wie z.B. von Baumgärtel et al. [5]– schwieriger ist.

Diese Voraussetzungen werden durch den Siebtrommelversuch nach der Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 der DGGT zur Bestimmung der Zerfallsbeständigkeit von Gestein [39] erfüllt.

Dabei geht es nicht um eine realitätsnahe physikalische Modellierung der Verhältnisse in Abbaukammer, Förderleitung und Separieranlage, sondern um die Entwicklung eines reproduzierbaren Indexversuches.

## **6.2.1 Versuchsanordnung**

Im Folgenden werden zunächst der genormte Siebtrommelversuch und anschließend der modifizierte Versuch beschrieben. Außerdem wird auf die Genauigkeit der Messinstrumente eingegangen.

### **6.2.1.1 Genormter Siebtrommelversuch**

Nach Herzel [39] dient der Siebtrommelversuch, der in der Empfehlung als „Zerfallsbeständigkeitsversuch“ bezeichnet wird, zur Klassifizierung eines Gesteins hinsichtlich seiner Resistenz gegen mechanischen Abrieb sowie Wassergehalts- und Temperaturänderungen.

Entwickelt wurde dieser Versuch mit der zugehörigen Apparatur 1972 von J.A. Franklin & R. Chandra [35]. 1987 folgte die Normung als „Standard Test Method for

Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks“ [1]. In Deutschland ist der Versuch im Straßenbau die standardisierte Testmethode für das Verhalten veränderlicher fester Gesteine (Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB), Teil C 20, 2005).

Als Prüfeinrichtung wird die ASTM-Siebtrommelapparatur mit einer Siebtrommel (Durchmesser 140mm und Länge 100mm), deren Mantelfläche aus Edelstahl-Siebgewebe mit einer Maschenweite von 2mm besteht, einem Trog aus Plexiglas, in dem die Trommel um die horizontale Achse rotiert (Abbildung 18) sowie einem Antriebsmotor verwendet.

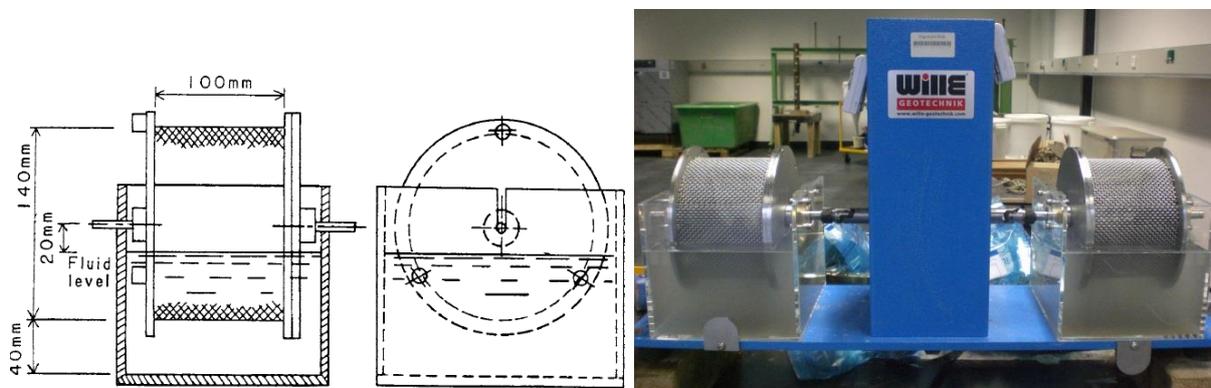


Abbildung 18: Siebtrommelapparatur [1]

Gemäß Norm muss zwischen Trommelsieb und Trogboden ein Freiraum von 40 mm vorhanden sein. Die Drehzahl des Motors beträgt 20 Umdrehungen pro Minute.

Das zu untersuchende Probenmaterial wird bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Es werden 10 repräsentative Einzelstücke mit mehr oder weniger runder Form und einer Masse von 40 bis 60g sowie einer Gesamtmasse von 450 bis 550g ausgewählt bzw. hergestellt.

Die Siebtrommel wird gewogen (Masse  $m_T$ ), mit den Einzelstücken befüllt, erneut gewogen (Ausgangsmasse  $m_{d0} + m_T$ ) und in die Apparatur eingebaut. Der Trog wird mit der Versuchsflüssigkeit (destilliertes Wasser nach ASTM bzw. demineralisiertes Wasser nach DGGT) bis 20mm unter die Trommelachse gefüllt.

Der Versuch wird gestartet, die Rotationsdauer beträgt 10 Minuten. Anschließend wird die Trommel ausgebaut und bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Trommel

wird gewogen (Masse  $m_{d1} + m_T$ ) und der erste Zyklus damit abgeschlossen. Nach Beseitigung der verwendeten Versuchsflüssigkeit folgen in der Regel weitere 5 Zyklen.

Die Zerfallsbeständigkeit wird durch den Index  $I_{di}$  ausgedrückt, der sich wie folgt errechnen lässt:

$$I_{di} = \frac{m_{di}}{m_{d0}} [\%]$$

mit

$m_{di}$  Trockenmasse der Probe nach Zyklus  $i$

$m_{d0}$  Trockenmasse der Gesteinsprobe vor Versuchsbeginn

### **6.2.1.2 Modifizierter Siebtrommelversuch**

Der modifizierte Siebtrommelversuch – im Folgenden auch Dispergierungsversuch genannt – wurde unter Anleitung des Autors im Rahmen einer Arbeit von Fischdick [34] entwickelt. Der Aufbau des Dispergierungsversuchs entspricht grundsätzlich der genormten Variante.

Der entscheidende Unterschied zum Standard-Siebtrommelversuch liegt bei dem Dispergierungsversuch darin, dass primär nicht der Rückstand in der Siebtrommel, sondern die Veränderung der Versuchsflüssigkeit von zentralem Interesse ist. Daher ist es erforderlich, bei der eigentlichen Durchführung des Versuches von den Normvorgaben abzuweichen bzw. weitergehende, bisher noch nicht durchgeführte Untersuchungen vorzunehmen. Hieraus ergibt sich der folgende grundsätzliche Ablauf des Versuches:

Zunächst werden entsprechend des Standardsiebtrommelversuches ca. 10 Einzelproben mit einem Gewicht von je etwa 40-60g hergestellt (Abbildung 19 links) mit einer Gesamtprobenmasse zwischen 450 und 550g. Abweichend von der Norm wird der Boden nicht bis zur Massekonstanz getrocknet sondern in ihrem natürlichen Zustand in die zuvor gereinigte, getrocknete und gewogene Siebtrommel (Masse  $m_T$ ) gelegt (Abbildung 19 rechts). Wie Hollmann [40] ausführlich erläutert, würde eine Trocknung bei bindigen bzw. feinkörnigen Böden zu Veränderungen der charakteristischen Eigenschaften und zu verfälschten Ergebnissen bei der Feinkornfreisetzung und damit auch bei der Feststellung der Dispergierungsneigung

führen. Er verweist bei seinen Ausführungen auf die Arbeiten von Nickmann [48], Weiz [67] sowie Prinz und Strauß [53], die bei einer Trocknung bindiger Böden Veränderungen der Tongehalte (Nickmann), der Fließgrenze (Weiz) und der Kornverteilung (Prinz und Strauß) beschrieben haben. Bei Prinz und Strauß heißt es sogar wörtlich, dass es bei „Trocknungstemperaturen über 100°C ... kaum noch möglich [ist], eine Dispergierung bis hin zur Primärkornverteilung zu erreichen.“

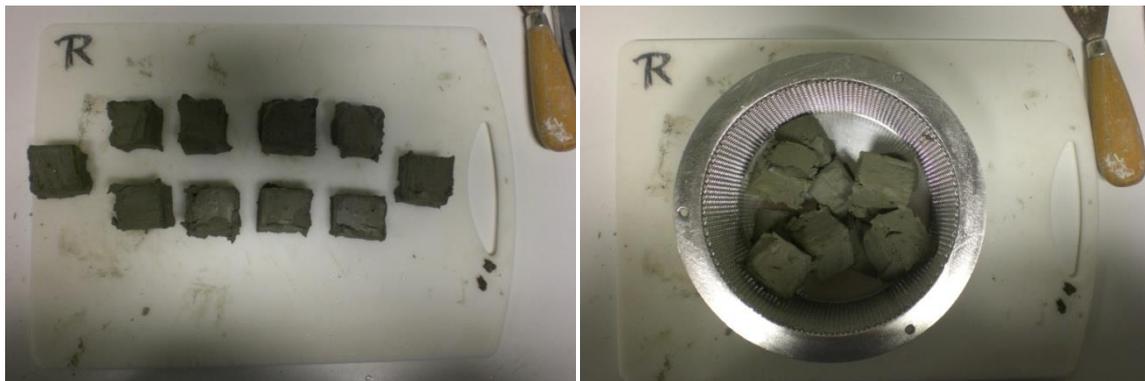


Abbildung 19: Probekörper Dispergierungsversuch

Die befüllte Siebtrommel wird ebenfalls gewogen, aus der Differenz zu der Masse der leeren Siebtrommel  $m_T$  kann die Ausgangsmasse der feuchten Probe  $m_0$  ermittelt werden. Im Anschluss wird die Trommel in die Apparatur eingebaut, danach der Trog mit der Versuchsflüssigkeit gefüllt. Der eigentliche Versuch wird gestartet, die Trommel rotiert also in der Flüssigkeit. Die visuell wahrnehmbare Veränderung der Versuchsflüssigkeit (siehe Abbildung 20) wird fotografisch dokumentiert.

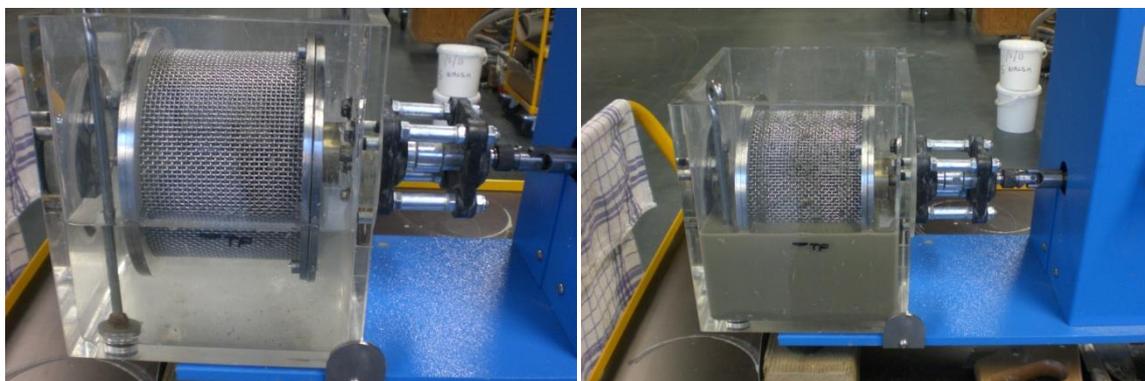


Abbildung 20: Veränderung Versuchsflüssigkeit

Nach Ablauf der Versuchslaufzeit wird die entstandene Suspension abgelassen und für die weiteren Untersuchungen in einem geeigneten Behälter wie z.B. einer Kanne aufgefangen. Die Trommel wird ausgebaut und gewogen, so dass sich die Masse des Trommelrückstandes  $m_{TR}$  ermitteln lässt. Die nach wie vor in der Trommel befindlichen Probekörper (Abbildung 21) werden z.B. für weitere bodenmechanische Untersuchungen luftdicht verpackt und etikettiert.

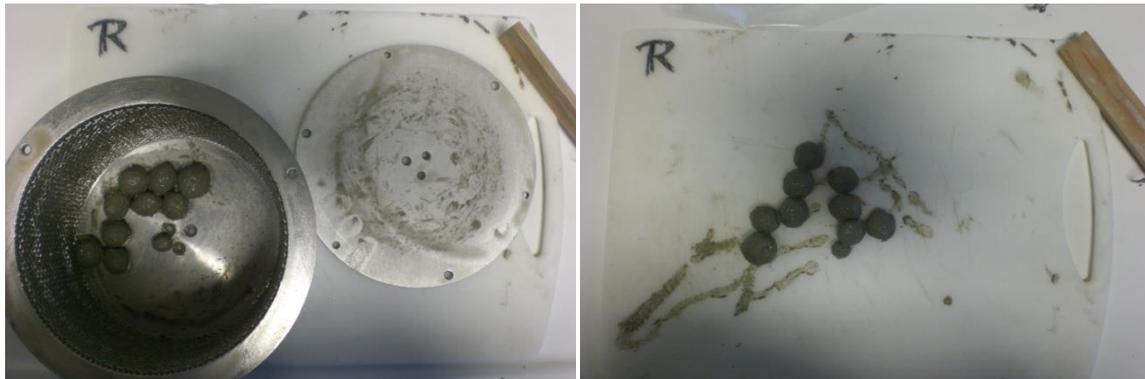


Abbildung 21: Probekörper nach Versuchsdurchführung

Die noch im Trog befindliche Flüssigkeit kann nun ebenfalls in den dafür vorgesehenen Behälter abgelassen werden. Falls bereits ein Absetzen zu beobachten ist, muss die Flüssigkeit für die weiteren Untersuchungen aufgerührt werden. Im nächsten Schritt wird die Suspension durch genormte Analysesiebe geschüttet, um die nicht dispergierten sondern lediglich abgeschälten Bodenpartikel von der Flüssigkeit zu trennen. Der durch Tastversuche ermittelte kleinste hierbei noch umsetzbare Trennschnitt liegt bei 0,071mm. Die jeweiligen Siebrückstände werden gewogen, die Daten protokolliert. Bei dem finalen Siebdurchgang handelt es sich um den hauptsächlichen Untersuchungsgegenstand des Versuches, die Flüssigkeit mit dem dispergierten Boden. Von dieser Suspension sind im nächsten Schritt die Dichte  $\rho_{SUS,1}$  und das Volumen  $V_{SUS,1}$  zu bestimmen. Hierzu ist zunächst die Dichte mit Hilfe eines Pyknometers (Dichteglas) und einer Präzisionswaage (Abbildung 22) zu bestimmen.



Abbildung 22: Bestimmung Dichte  $\rho_{sus,1}$

Es ist die gesamte Versuchsflüssigkeit zu verwenden, der Wert der Dichte, der bei den weiteren Berechnungen verwendet wird, ist arithmetisch zu mitteln. Das Volumen der Suspension ist entweder bei Verwendung eines entsprechend genauen Messbehälters abzulesen oder durch die Division der mit Hilfe der Präzisionswaage gemessenen Masse durch die ermittelte Dichte zu bestimmen:

$$V_{sus,1} = \frac{m_{sus,1}}{\rho_{sus,1}} [cm^3]$$

Anschließend kann der Dichteunterschied  $\Delta\rho_{sus}$  aus der Differenz aus  $\rho_{sus,1}$  und  $\rho_{sus,0}$  ermittelt werden:

$$\Delta\rho_{sus} = \rho_{sus,1} - \rho_{sus,0} \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

Durch Multiplikation von  $\Delta\rho_{sus}$  und  $V_{sus,1}$  kann dann die Masse  $m_{disp}$  des dispergierten Bodens berechnet werden.

$$m_{disp} = \Delta\rho_{sus} * V_{sus,1} [g]$$

Diese Masse wird abschließend ins Verhältnis gesetzt zu der Probenausgangsmasse  $m_0$ , um den Dispergierungsgrad  $\alpha_{disp}$  zu erhalten:

$$\alpha_{disp} = \frac{m_{disp}}{m_0} * 100 [\%]$$

### **6.2.1.3 Genauigkeit der Messinstrumente**

Die Genauigkeit der Messinstrumente wurde im Rahmen einer unter Anleitung des Autors entstandenen Arbeit von Jodehl [41] untersucht. In dieser Arbeit heißt es, dass die Genauigkeit von Messinstrumenten nach DIN EN 60051 [31] definiert wird als „Grad der Übereinstimmung zwischen angezeigtem und richtigem Wert. Die Genauigkeit [...] ist durch die Grenzen der Eigenabweichung und die Grenzen der Einflüsseffekte bestimmt.“

Als Messinstrumente kommen bei dem Siebtrommelversuch eine Waage, ein Thermometer und ein Pyknometer zum Einsatz, deren Genauigkeiten im Folgenden beleuchtet werden.

#### Waage

Bei den Dispergierungsversuchen wurde eine Waage des Typs PCE-BDM6 von der Firma PCE Instruments verwendet. Die vom Hersteller angegebene Ablesegenauigkeit beträgt 0,2g. Gemäß Bedienungsanleitung bedeutet dies, dass sich eine Ungenauigkeit von  $\pm 0,1\text{g}$  ergibt. Um diesen Grad der Genauigkeit zu erreichen, ist die Waage vor der Benutzung mithilfe einer in dem Gerät installierten Wasserwaage auszurichten. Des Weiteren wird empfohlen, die Waage regelmäßig mit Prüfgewichten zu überprüfen und zu kalibrieren.

Auf den Dispergierungsversuch im Allgemeinen sowie auf den Dispergierungsgrad im Besonderen hat die Genauigkeit der Waage insgesamt einen relativ großen Einfluss, da dieses Instrument bei der Messung der feuchten Proben vor und nach Versuchsbeginn, bei der Bestimmung der Masse der Suspension vor und nach der Versuchsdurchführung, bei der Ermittlung der Ergebnisse des Siebvorgangs sowie insbesondere bei der Bestimmung der Dichte der Suspension nach der Versuchsdurchführung zum Einsatz kommt.

#### Thermometer

Als Thermometer wurde bei den Dispergierungsversuchen das Produkt Checktemp1 der Firma HANNA Instruments eingesetzt. Dieses misst gemäß der Bedienungsanleitung auf  $\pm 0,3^\circ\text{C}$  genau bei einer Temperatur zwischen  $-20$  und  $90^\circ\text{C}$ .

Bei dem Dispergierungsversuch wird mit Hilfe des Thermometers die Temperatur der Versuchsflüssigkeit vor und nach Versuchsdurchführung bestimmt. Einfluss auf den Dispergierungsgrad hat die Genauigkeit des Thermometers in der Hinsicht, dass sich bei Einsatz von Wasser als Versuchsflüssigkeit temperaturabhängige Unterschiede der Dichte ergeben. Jodehl hat in ihrer Arbeit [41] allerdings herausgearbeitet, dass die Messgenauigkeit des Thermometers bei üblichen Wassertemperaturen zwischen 18°C und 22°C lediglich eine Differenz der Dichte von 0,00006g/cm<sup>3</sup> hervorruft. Diese Größenordnung erscheint vernachlässigbar klein.

### Pyknometer

Das beim Dispergierungsversuch zum Einsatz gebrachte Pyknometer ist ein kalibriertes Messglas mit geschliffenem Deckel, das auch bei der Dichtebestimmung von Bentonitsuspensionen verwendet wird. Das heißt, dass sowohl das einfüllbare Volumen als auch das Eigengewicht exakt bekannt sind. Genauigkeiten zu diesen beiden Parametern werden vom Hersteller IBECO nicht angegeben.

Mit dem Pyknometer wird die Dichte der Versuchsflüssigkeit nach Versuchsdurchführung bestimmt. Diese beeinflusst unmittelbar den Dispergierungsgrad, da sie direkten Eingang in die entsprechende Berechnung findet. Aufgrund dieser großen Sensibilität und zur Erhöhung der Präzision wird die Suspension vollständig zur Bestimmung der Dichte verwendet, d. h. es erfolgen mehrere Pyknometer-Messvorgänge, deren Ergebnisse arithmetisch gemittelt werden. Durch diese Vorgehensweise gleichen sich geringfügige Messunterschiede aus und eventuelle Ausreißer können erkannt werden. Gemäß DIN 1319-3 [18] verringert sich die Ungenauigkeit mathematisch je  $n$  Wiederholungen der Messung um  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ . Des Weiteren wird durch das Verwenden der gesamten Suspension ein maximal homogenes Ergebnis erzielt, da eine eventuell auftretende ungleichmäßige Verteilung der Partikel in der Versuchsflüssigkeit ausgeglichen wird.

### **6.2.2 Stellgrößen**

Da mit dem Versuch Neuland betreten wird, war eine sorgfältige Untersuchung der Stellgrößen notwendig. Hierbei spielten Überlegungen, die aus Erfahrungen und Beobachtungen aus der Praxis aufgestellt worden sind ebenso eine Rolle wie der Ansatz, möglichst nahe an dem anerkannten Siebtrommelversuch zu bleiben. Die im Rahmen des grundsätzlichen Ablaufs festzulegenden Stellgrößen waren

- die Versuchsprobenform,
- die Versuchsflüssigkeit und deren Füllhöhe in dem Trog sowie
- die Versuchslaufzeit.

Aus diesen unterschiedlichen zu untersuchenden Aspekten ergaben sich verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Zudem ist gerade bei dem Vorgang zur Festlegung der Stellgrößen besonders auf die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche zu achten. Daher wurden drei Versuchsreihen konzipiert. Im ersten Schritt wurde als Boden London Clay (charakteristische Eigenschaften siehe Kapitel 6.2.3.1) und als Flüssigkeit Bentonitsuspension verwendet. Die Versuche wurden in Vollfüllung durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Trommel vollständig in die Flüssigkeit eingetaucht war. Variabel waren die Versuchslaufzeit oder Versuchsdauer und die Probenform. Eine Übersicht über die unter diesen Randbedingungen durchgeführten Versuche ist der folgenden Tabelle 6 zu entnehmen.

*Tabelle 6: Matrix erste Versuchsreihe in Anlehnung an [34]*

<b>Versuchsdauer</b>	10 Minuten	20 Minuten	30 Minuten
<b>Probenform</b>			
Würfel	4	4	4
Quader	4	4	4

Im zweiten Schritt wurde als Versuchsflüssigkeit Leitungswasser eingesetzt. Als Probenform wurden Würfel verwendet. Die Versuche wurden sowohl in Voll- als auch in Teilfüllung durchgeführt. Unter Teilfüllung ist hier die gemäß Norm vorgegebene Füllung bis 20mm unter der Trommelachse zu verstehen. Eine weitere Variable war wieder die Versuchsdauer. Die Übersichtsmatrix zu dieser Versuchsreihe ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Matrix zweite Versuchsreihe [34]

<b>Versuchsdauer</b>			
	10 Minuten	20 Minuten	30 Minuten
<b>Füllstand</b>			
Vollfüllung	3	2	1
Teilfüllung	3	2	1

Im dritten Schritt kam als alternativer Boden Emschermergel (charakteristische Eigenschaften siehe Kapitel 6.2.3.1) zum Einsatz. Die mit Leitungswasser durchgeführten Versuche wurden sowohl in Voll- als auch in Teilfüllung durchgeführt. Auch in dieser Versuchsreihe war die Laufzeit variabel. Die durchgeführten Versuche im dritten Schritt sind in der folgenden Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Matrix dritte Versuchsreihe [34]

<b>Versuchsdauer</b>			
	10 Minuten	20 Minuten	30 Minuten
<b>Füllstand</b>			
Vollfüllung	4	6	2
Teilfüllung	4	6	2

### 6.2.2.1 Versuchsprobenform

Bei dem Standard-Siebtrommelversuch ist die Probenform nicht genau vorgeschrieben. Dies ist damit begründet, dass der Versuch eigentlich für Fels entwickelt wurde und bei diesem eine exakte Form nur schwer realisierbar ist. Dementsprechend existiert lediglich die Vorgabe des Gewichtes der einzelnen Probekörper sowie der Gesamtprobe. In anderen Versuchen, bei denen die Siebtrommelapparatur zur Untersuchung von Böden herangezogen wurde, wurde wiederholt der Würfel als Probenform gewählt. Der Würfel scheint auch für den Dispergierungsversuch eine geeignete Probenform zu sein, da in der Praxis sowohl in der Abbaukammer immer wieder würfelförmige Abbauprodukte zu beobachten sind als auch die oft runde Form der auf dem Grobsieb der Separieranlage zu beobachtenden Konglomerate auf einen würfelförmigen Ausgangszustand schließen

lassen. Je nach Geologie, Werkzeugbestückung und Betrieb der Vortriebsanlage sind allerdings auch wiederholt eher quaderförmige Abbauprodukte zu beobachten. Für die Ermittlung der am besten geeigneten Probenform des Dispergierungsversuches wurde daher festgelegt, sowohl Versuche mit Würfeln (Kantenlänge ca. 3cm) als auch mit Quadern (Kantenlängen ca. 3 x 3 x 7cm) durchzuführen (Abbildung 23).



*Abbildung 23: Probekörper Würfel (links) und Quader (rechts)*

Die Ergebnisse der jeweils 12 in der ersten Untersuchungsreihe durchgeführten Versuche mit Würfeln und Quadern sind in der folgenden Abbildung 24 dargestellt.

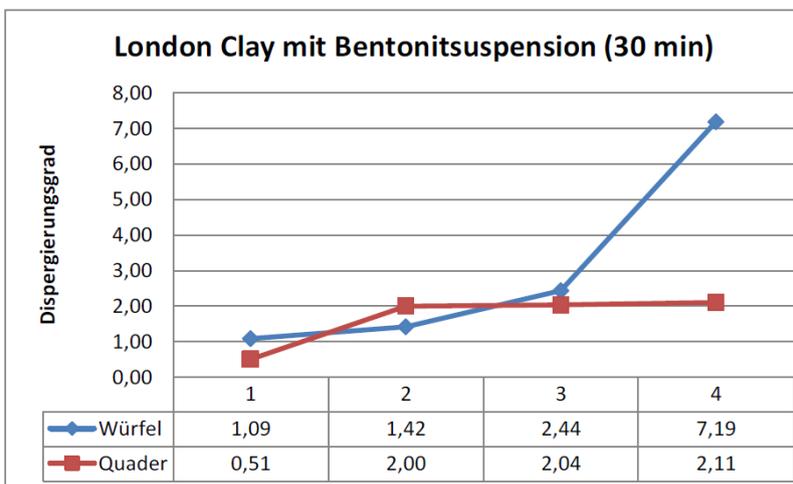
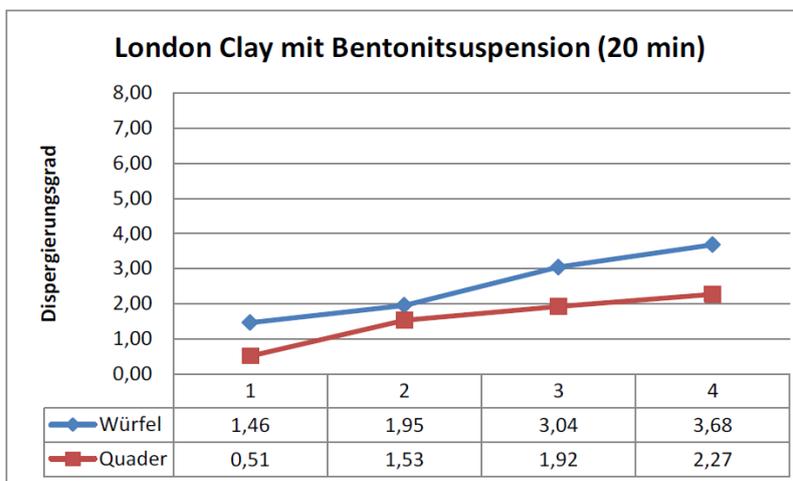
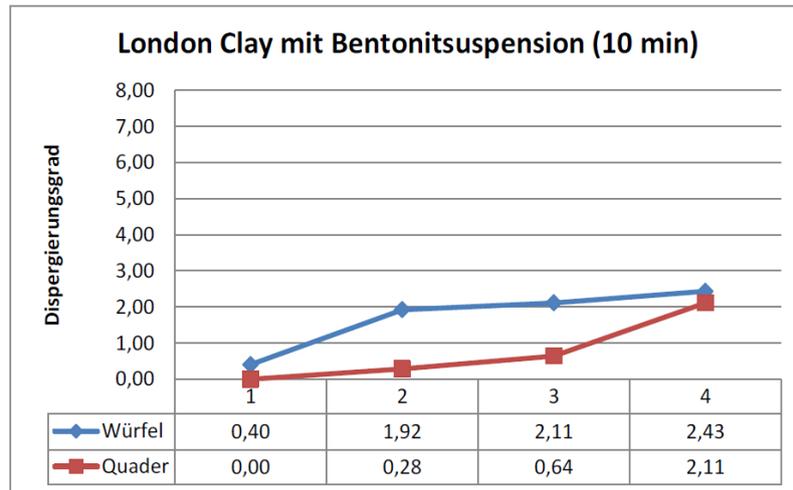


Abbildung 24: Gegenüberstellung Würfel - Quader

Es lassen sich folgende Gesamtmittelwerte des Dispergierungsgrades  $\alpha_{\text{disp}}$  errechnen:

- $\alpha_{\text{disp}} = 2,43\%$  (Würfel)
- $\alpha_{\text{disp}} = 1,33\%$  (Quader)

Bei Betrachtung der verschiedenen Laufzeiten ergeben sich die folgenden Mittelwerte:

10 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 1,72\%$  (Würfel)
- $\alpha_{\text{disp}} = 0,76\%$  (Quader)

20 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 2,53\%$  (Würfel)
- $\alpha_{\text{disp}} = 1,55\%$  (Quader)

30 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 3,04\%$  (Würfel)
- $\alpha_{\text{disp}} = 1,67\%$  (Quader)

Es ist zu erkennen, dass die Dispergierung bei den Würfeln deutlich höher ist als bei den Quadern. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist, dass die Würfel eine höhere spezifische Oberfläche als die Quader aufweisen und damit eine größere Kontakt- und Angriffsfläche für die Flüssigkeit bieten.

Die Probenform „Würfel“ ist in ähnlich gelagerten Versuchen bereits mehrfach zum Einsatz gekommen, man kann also von einer in der Fachwelt anerkannten Probenform sprechen. Außerdem lassen sich Würfel leichter herstellen als Quader. Darüber hinaus wird für die Herstellung von Würfeln insgesamt weniger Probenmaterial benötigt, da weniger „Verschnitt“ anfällt. Auch lassen sich Würfel aus verschiedenen Ausgangsformen herstellen, wohingegen Quader größere zusammenhängende Stücke erfordern. Unter Berücksichtigung der Überlegung, dass die Versuchsprobekörper aus Bohrkernen oder aus mit Ausstechzylindern gewonnenen Proben beispielsweise aus der Ortsbrust hergestellt werden müssen, erscheint die Festlegung auf Quader mit einem bestimmten Kantenlängenverhältnis

impraktikabel zu sein. Daher wurde festgelegt, dass die Versuche mit Würfeln durchgeführt werden.

### **6.2.2.2 Versuchsflüssigkeit und Füllhöhe**

Beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb kommt meistens eine Bentonitsuspension zum Einsatz. In Böden mit hohen Feinkornanteilen wird außerdem regelmäßig Wasser als Suspensionsmedium verwendet, da sich die erforderlichen Feinanteile aus dem Boden lösen und demnach kein Bentonit zugegeben werden muss. Bei dem Standard-Siebtrommelversuch kommt entweder destilliertes Wasser (nach ASTM) oder demineralisiertes Wasser (Deionat) (nach DGGT) zum Einsatz. Da der Versuch einen größtmöglichen Praxisbezug aufweisen soll, wurde die Verwendung sowohl von destilliertem Wasser als auch von Deionat als nicht zielführend ausgeschlossen. Dementsprechend wurde also festgelegt, sowohl Versuche mit einer Bentonitsuspension als auch Versuche mit Leitungswasser durchzuführen, um schlussendlich das besser geeignete Medium zu finden.

Bei den Überlegungen zu der Versuchsflüssigkeit spielt auch die Füllhöhe eine Rolle. Bei dem Dispergierungsversuch wird hauptsächlich der Transport des abgebauten Bodens von der Ortsbrust bis zur Separieranlage simuliert. Bei diesem Transport befindet sich der Boden in der Regel vollumfänglich in der Suspension, er kommt also nicht mehr mit Luft in Berührung. Bei dem Standard-Siebtrommelversuch geht es aber gerade darum, die Proben sowohl der Flüssigkeit als auch der Luft auszusetzen. Um bei diesem Zwiespalt zu einer Lösung zu kommen, mussten also Versuche sowohl mit vollständig eingetauchter Trommel (Vollfüllung) als auch mit der gemäß Standardversuch vorgegebenen Füllung des Troges bis zu einer Höhe von 20mm unter der Trommelachse (Teilfüllung) durchgeführt werden (Abbildung 25).



*Abbildung 25: Teilfüllung (links) und Vollfüllung (rechts)*

Zur Identifizierung des besser geeigneten Mediums werden in der folgenden Abbildung 26 die Ergebnisse der 12 mit London Clay in Bentonitsuspension in Vollfüllung mit Würfeln durchgeführten Versuche der ersten Reihe den 6 äquivalenten Versuchen in Leitungswasser der zweiten Reihe gegenübergestellt:

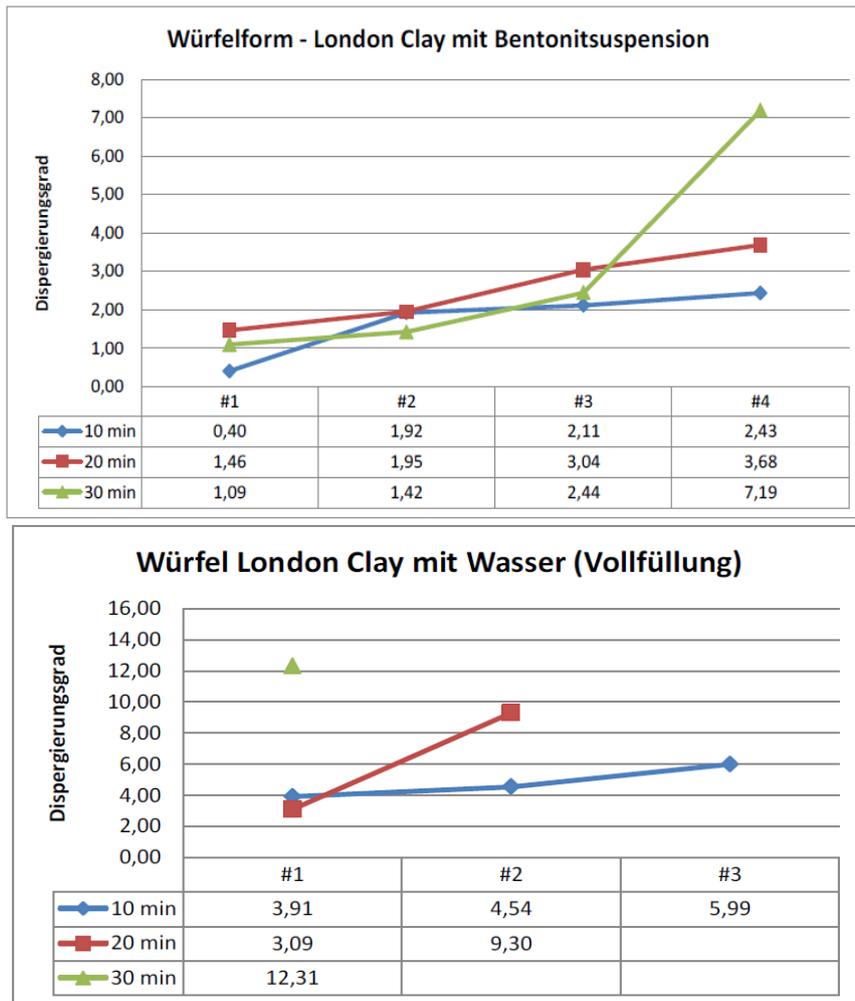


Abbildung 26: Gegenüberstellung Bentonitsuspension - Leitungswasser

Es lassen sich folgende Gesamtmittelwerte des Dispergierungsgrades  $\alpha_{\text{disp}}$  errechnen:

- $\alpha_{\text{disp}} = 2,31\%$  (Bentonitsuspension)
- $\alpha_{\text{disp}} = 6,52\%$  (Leitungswasser)

Bei Betrachtung der verschiedenen Laufzeiten ergeben sich die folgenden Mittelwerte:

10 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 1,72\%$  (Bentonitsuspension)
- $\alpha_{\text{disp}} = 4,81\%$  (Leitungswasser)

20 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 2,53\%$  (Bentonitsuspension)
- $\alpha_{\text{disp}} = 6,20\%$  (Leitungswasser)

30 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 3,04\%$  (Bentonitsuspension)
- $\alpha_{\text{disp}} = 12,31\%$  (Leitungswasser)

Es lässt sich also konstatieren, dass bei dem Einsatz von Leitungswasser eine deutlich höhere Dispergierungsneigung feststellbar ist als bei dem Einsatz von einer Bentonitsuspension.

Diese Beobachtung erscheint dahingehend logisch, als dass sich bei der Bentonitsuspension bereits eine nicht unerhebliche Menge an dispergierten Feinkornanteilen in der Flüssigkeit befindet und demnach die Aufnahmefähigkeit für weitere Feinkornanteile geringer ist als bei Wasser. Interessant ist dieser Gedanke für die Praxis des Hydroschildvortriebes, da dies in letzter Konsequenz bedeuten würde, dass der Einsatz von einer Bentonitsuspension in Böden mit hohen Feinkornanteilen zu einer Verringerung der Dispergierung führt. Oftmals wird allerdings aus wirtschaftlichen Gründen in diesen geologischen Abschnitten auf den Einsatz von Bentonitsuspensionen verzichtet und der Vortriebsanlage stattdessen lediglich Wasser zugeführt. Inwieweit diese gängige Praxis unter Berücksichtigung des dann höheren Aufwandes bei der Separierung tatsächlich die wirtschaftlichere Variante ist, bleibt eine spannende Frage und sollte in weitergehenden Forschungsvorhaben aufgegriffen werden. Da das Ziel dieser Untersuchung die Entwicklung eines praxistauglichen Versuches für die Feststellung der Dispergierungsneigung ist, kann die aufgeworfene Frage aufgrund des absehbaren hohen Aufwandes nicht weiterverfolgt werden.

Der Verzicht auf die Zugabe von Bentonit in Bereichen mit hohen Feinkornanteilen spricht in Bezug auf die Versuchskonzeptionierung dafür, ebenfalls Wasser zu verwenden. Außerdem spricht unter Berücksichtigung der Messgenauigkeiten ebenfalls das insgesamt höhere Niveau des Dispergierungsgrades für die Verwendung von Wasser. Ein weiteres Argument für Wasser und gegen die

Bentonitsuspension ist die deutliche Vereinfachung der Versuchsdurchführung. Es wurde daher festgelegt, die Versuche mit Wasser durchzuführen. Um eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, sind hierbei dann nach Möglichkeit jeweils die Temperatur und der pH-Wert des Wassers zu messen.

In Bezug auf die Versuchsflüssigkeit ist weiterhin festzulegen, ob der Versuch in Vollfüllung oder in Teilfüllung durchgeführt werden soll. Als Entscheidungsgrundlage werden hierzu die entsprechenden Ergebnisse der zweiten und dritten Versuchsreihe gegenübergestellt (Abbildung 27 und Abbildung 28).

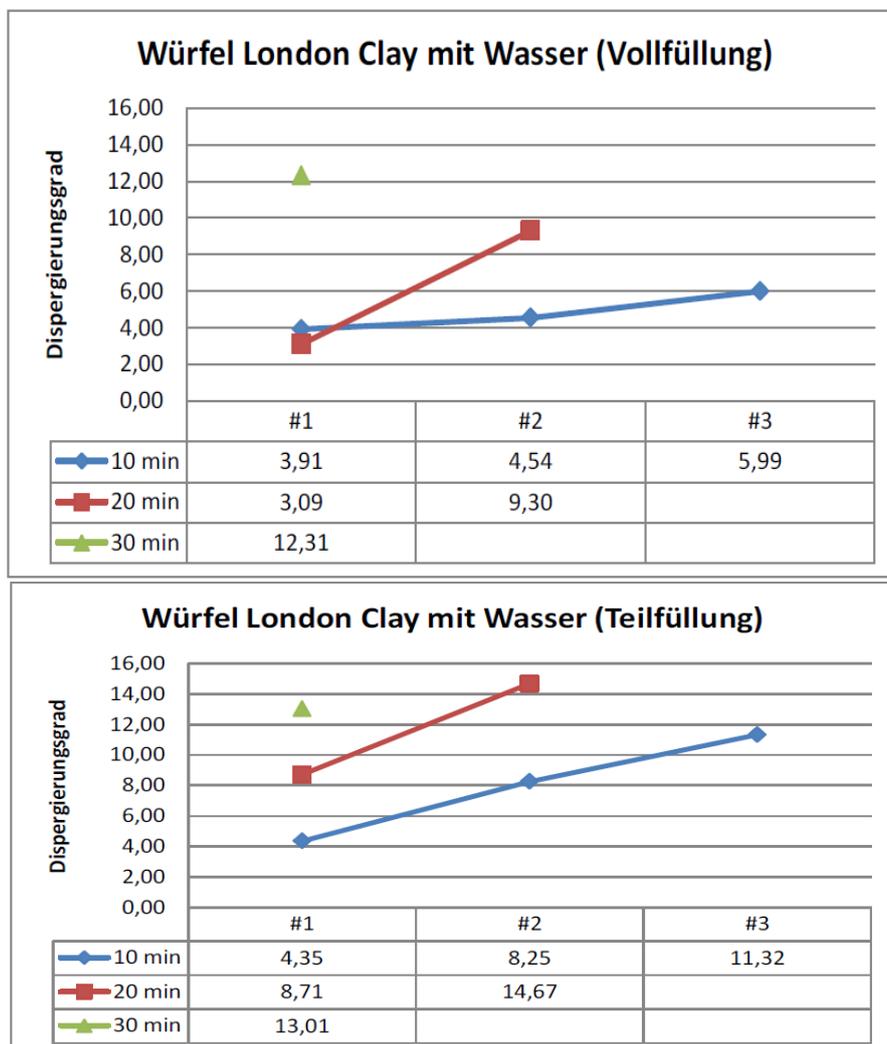


Abbildung 27: Gegenüberstellung Vollfüllung – Teilfüllung London Clay

---

Es lassen sich folgende Gesamtmittelwerte des Dispergierungsgrades  $\alpha_{\text{disp}}$  errechnen:

- $\alpha_{\text{disp}} = 6,52\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 10,05\%$  (Teilfüllung)

Bei Betrachtung der verschiedenen Laufzeiten ergeben sich die folgenden Mittelwerte:

10 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 4,81\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 7,97\%$  (Teilfüllung)

20 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 6,20\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 11,69\%$  (Teilfüllung)

30 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 12,31\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 13,01\%$  (Teilfüllung)

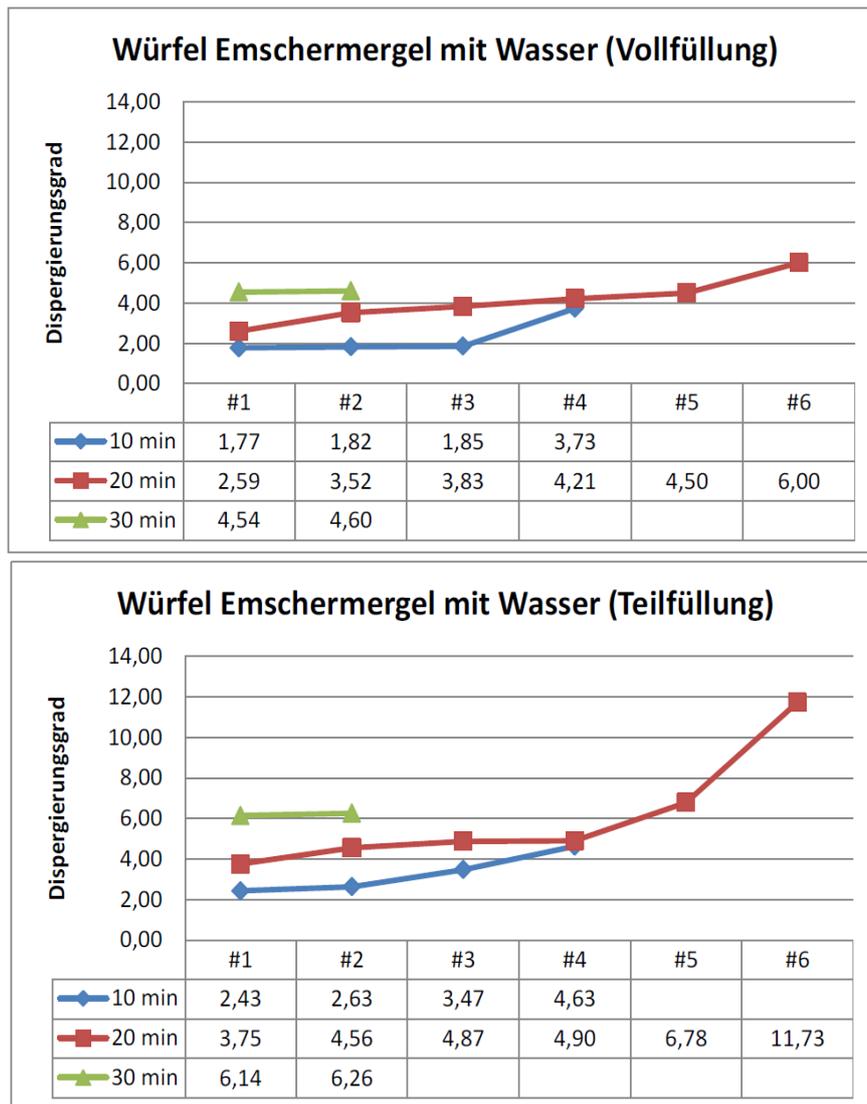


Abbildung 28: Gegenüberstellung Vollfüllung – Teilfüllung Emschermergel

Es lassen sich folgende Gesamtmittelwerte des Dispergierungsgrades  $\alpha_{\text{disp}}$  errechnen:

- $\alpha_{\text{disp}} = 3,59\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 5,18\%$  (Teilfüllung)

Bei Betrachtung der verschiedenen Laufzeiten ergeben sich die folgenden Mittelwerte:

10 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 2,29\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 3,29\%$  (Teilfüllung)

20 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 4,11\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 6,10\%$  (Teilfüllung)

30 Minuten:

- $\alpha_{\text{disp}} = 4,57\%$  (Vollfüllung)
- $\alpha_{\text{disp}} = 6,20\%$  (Teilfüllung)

Es ist erkennbar, dass sich der Wert der Dispergierungsneigung bei den Teilfüllungsversuchen auf einem signifikant höheren Niveau befindet als bei den Vollfüllungsversuchen.

Stärkstes Argument für die Vollfüllung ist der Ansatz, dass mit dem Versuch im Wesentlichen der Transport des abgebauten Bodens von der Ortsbrust bis zur Separieranlage simuliert werden soll. Das bedeutet, dass sich der Boden in der Regel in der geschlossenen Rohrleitung befindet und demnach vollumfänglich in der Stützflüssigkeit. Stärkstes Argument für die Teilfüllung ist die Überlegung, dass bei den Versuchen mit Teilfüllung eine höhere mechanische Einwirkung auf die Bodenproben erzielt wird, was eher der Realität entspricht, wenn man an die mitunter vielfältigen mechanischen Einwirkungen z.B. durch Rückräumer, Steinbrecher, Rechen, Pumpen oder Rohrkrümmer denkt. Für die Teilfüllung spricht außerdem, dass der versuchstechnische Aufwand deutlich geringer als bei Vollfüllung ist, was z.B. bei der Modifikation des Gerätes beginnt. Versuche mit Teilfüllung können mit jedem standardisierten Siebtrommelgerät durchgeführt werden und lassen somit eine höhere Akzeptanz in der Fachwelt erwarten. Es wurde daher festgelegt, dass die Versuche mit Teilfüllung durchgeführt werden.

### **6.2.2.3 Versuchslaufzeit**

Mit der Versuchslaufzeit ist hier die reine Rotationsdauer der Trommel gemeint. Beim Standard-Siebtrommelversuch ist diese auf 10min festgelegt. Die Übernahme dieser Festlegung scheint nicht angezeigt, da die Tunnellängen und damit die Transportwege des Bodens in der Suspension sowohl von Projekt zu Projekt als auch mit zunehmender Vortriebslänge innerhalb eines Projektes stark divergieren. Da in der Regel von einer Transportgeschwindigkeit von 3 bis 4m/sec [63] ausgegangen wird, können sich die Bodenpartikel deutlich länger als 10min in der Suspension befinden, was die Hypothese nahelegt, dass dann auch die Dispergierung höher sein müsste. Diese Überlegungen führen zu dem Entschluss, den Dispergierungsversuch mit verschiedenen Laufzeiten durchzuführen. In einem ersten Schritt wurden hierzu Laufzeiten von 10, 20 und 30min festgelegt.

Die Ergebnisse sind bereits vollständig in Abbildung 24 bis Abbildung 28 dargestellt.

In allen Versuchsreihen ist eindeutig der Trend zu erkennen, dass die Dispergierung mit Zunahme der Versuchsdauer steigt. Übertragen in die Baustellenpraxis bedeutet dies, dass die Dispergierung mit Zunahme der vorgetriebenen Strecke steigt. Dementsprechend scheint die Festlegung einer festen Versuchsdauer nur unzureichende Ergebnisse für die Praxis erwarten zu lassen. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass kein einfacher linearer Zusammenhang zu existieren scheint, der eine Extrapolation erlauben würde. Es erscheint vielversprechender, einen Ansatz mit mehreren Versuchslaufzeiten zu wählen. Dies bedeutet, dass der Dispergierungsversuch im Vorfeld der Projektdurchführung mit 10, 20 und 30 Minuten durchgeführt wird, so dass eine ausreichende Sicherheit z.B. für die Auslegung der Separieranlage erreicht wird. Außerdem kann dann während der Projektausführung jederzeit ein vergleichender Versuch mit Proben aus der Ortsbrust durchgeführt werden. Es wurde also festgelegt, dass die Versuche weiterhin mit 10, 20 und 30 Minuten Laufzeit durchgeführt werden.

### **6.2.3 Versuchsdurchführung**

In den folgenden Ausführungen wird zunächst auf die Auswahl der untersuchten Böden, dann detailliert auf den eigentlichen Ablauf der Versuche und abschließend auf die Dokumentation der Versuchsergebnisse sowie die Weiterverarbeitung dieser eingegangen.

### **6.2.3.1 Auswahl der Böden**

Bei der Auswahl der Böden wurde einerseits das Ziel verfolgt, eine möglichst große Bandbreite abzudecken und andererseits einen direkten Praxisbezug herzustellen. Als Basis für die Bandbreite dienten Erfahrungswerte bzgl. des Dispergierungsverhaltens, mit denen in der Baupraxis z.B. im Rahmen von Angebotsbearbeitungen oder die Bauausführung begleitenden geotechnischen Untersuchungen gearbeitet wird. Die untersuchten Böden stammten unmittelbar von Projekten, bei denen der flüssigkeitsgestützte Schildvortrieb im Einsatz war oder zukünftig eingesetzt werden könnte. Außerdem spielte auch die Verfügbarkeit eine nicht unerhebliche Rolle bei der Auswahl der Böden.

Folgende Böden konnten für die Versuchsdurchführung akquiriert werden:

#### Emschermergel

Beim Emschermergel gehen die Meinungen auseinander, ob es sich um Boden oder um ein veränderliches Festgestein handelt. Da es sowohl in der Vergangenheit als auch in der Gegenwart umfangreiche Infrastrukturmaßnahmen im Emschermergel unter Einsatz des flüssigkeitsgestützten Schildvortriebes gab und gibt, sind neue Erkenntnisse zum Dispergierungsverhalten zu diesem Baugrund von hohem Interesse. Aufgrund dieser hohen Praxisrelevanz und der räumlichen Nähe zu den Laboreinrichtungen spielte der Emschermergel sowohl bei den Kalibrierungsversuchen als auch bei den folgenden vergleichenden Untersuchungen eine zentrale Rolle. Es konnte Emschermergel an verschiedenen Orten für die Versuche gewonnen werden. Im Folgenden wird daher zwischen Emschermergel 1 und Emschermergel 2 unterschieden. Der in der Praxis in Erfahrung zu bringende Wert für den Dispergierungsgrad liegt im Mittel bei 40%. Hier wird interessanterweise nicht zwischen den verschiedenen Gewinnungsorten unterschieden. Sowohl für den Emschermergel 1 als auch den Emschermergel 2 wurden im Zuge der Entwicklung und Durchführung des Dispergierungsversuches in einem Labor des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum charakteristische Kennwerte bestimmt.

Aus dem entsprechenden Bericht [42] bzw. aus der Bachelorarbeit von Jodehl [41] ist die folgende Abbildung 29 entnommen, in der die Korngrößenverteilung von

Emschermergel 1 dargestellt wird. Es ist zu erkennen, dass der Feinkornanteil mit 75% überwiegt und die Grenze der Korngröße 2 mm bei 100% liegt.

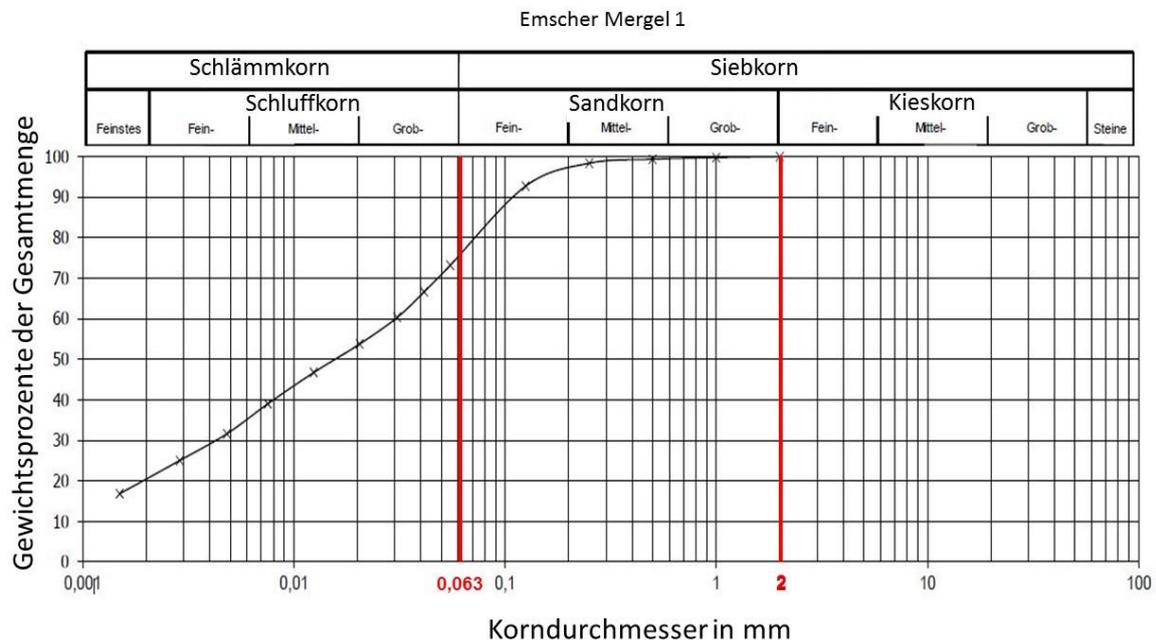


Abbildung 29: Korngrößenverteilung Emschermergel 1 [41] bzw. [42]

Die neben der Korngrößenverteilung bestimmten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Charakteristische Bodenkennwerte Emschermergel 1 [41] bzw. [42]

Geotechnischer Kennwert	Wert	Einheit
Trockendichte $\rho_d$	1,7930	[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	2,1254	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	18,53	[%]
Fließgrenze $w_L$	50,71	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	26,48	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	24,23	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	1,33	[-]

Mit einer Fließgrenze von 50,71% und einer Plastizitätszahl von 24,23% befindet sich der Boden oberhalb der A-Linie und kann als mittelplastisch bis ausgeprägt plastisch

klassifiziert werden. Mit der Konsistenzzahl  $I_c$  von 1,33 kann der Zustand des Bodens als halbfest charakterisiert werden.

Das Erscheinungsbild von Emschermergel 1 ist der folgenden Abbildung 30 zu entnehmen. Auf dem Bild sind für die Versuchsdurchführung vorbereitete Probekörper dargestellt.



Abbildung 30: Erscheinungsbild Emschermergel 1

Bei dem Emschermergel 2 beträgt der Feinkornanteil des Bodens etwa 72%, Körner mit einem Durchmesser von 2mm und größer sind nicht vorhanden (vgl. Abbildung 31).

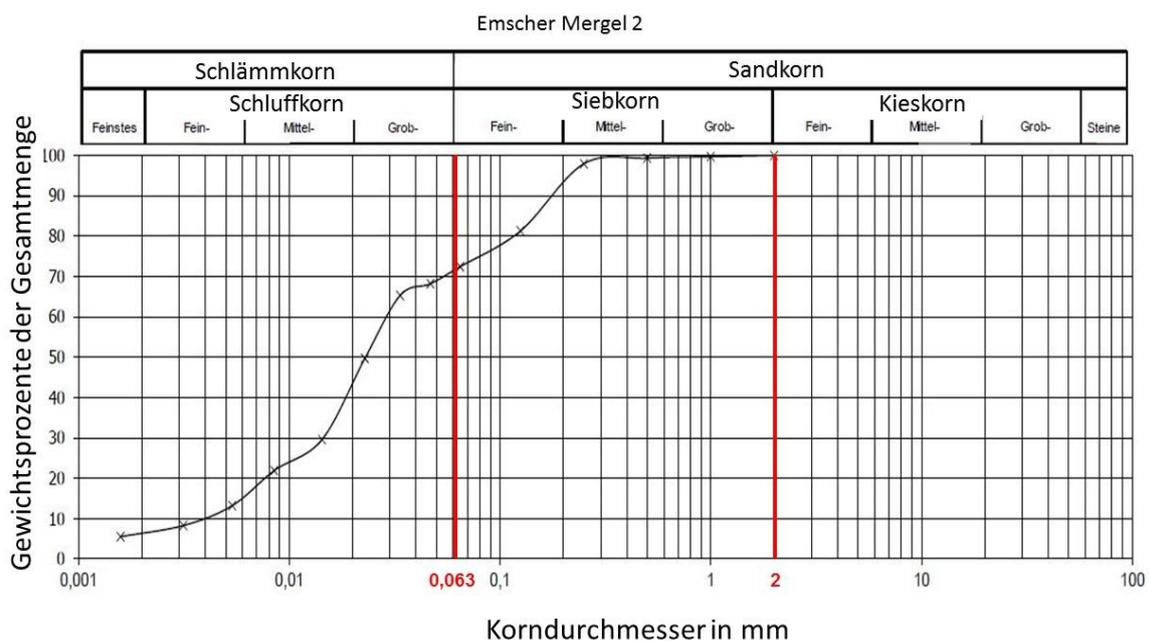


Abbildung 31: Korngrößenverteilung Emschermergel 2 [41] bzw. [42]

Die weiteren charakteristischen Bodenkennwerte von Emschermergel 2 sind in der folgenden Tabelle 10 dargestellt.

*Tabelle 10: Charakteristische Bodenkennwerte Emschermergel 2 [41] bzw. [42]*

<b>Geotechnischer Kennwert</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Trockendichte $\rho_d$	1,3038	[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	1,8232	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	39,83	[%]
Fließgrenze $w_L$	52,45	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	29,85	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	22,61	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	0,56	[-]

Mit einer Fließgrenze von 52,45% und einer Plastizitätszahl von 22,61% ist der Emschermergel 2 den Tonen mit organischen Beimengungen, den organogenen Tonen bzw. den ausgeprägt zusammendrückbaren Schluffen zuzuordnen. Mit einer Konsistenzzahl von 0,56 ist die Konsistenz als weich bis breiig zu beschreiben.

Das Erscheinungsbild von Emschermergel 2 ist der folgenden Abbildung 32 zu entnehmen.



*Abbildung 32: Erscheinungsbild Emschermergel 2*

### Berliner Mergel

Wie beim Emschermergel handelt es sich auch beim Berliner Mergel je nach Auslegung um Boden oder um veränderliches Festgestein. Die Praxisrelevanz liegt aufgrund der umfangreichen unterirdischen Infrastrukturmaßnahmen der Vergangenheit, Gegenwart und ggf. Zukunft auf der Hand. Der in der Praxis erwartete Wert für die Dispergierung beläuft sich auf 60%.

Der Berliner Mergel ist mit 36% Feinkornanteilen und 3% Kieskörnern als gemischtkörnig einzustufen (Abbildung 33).

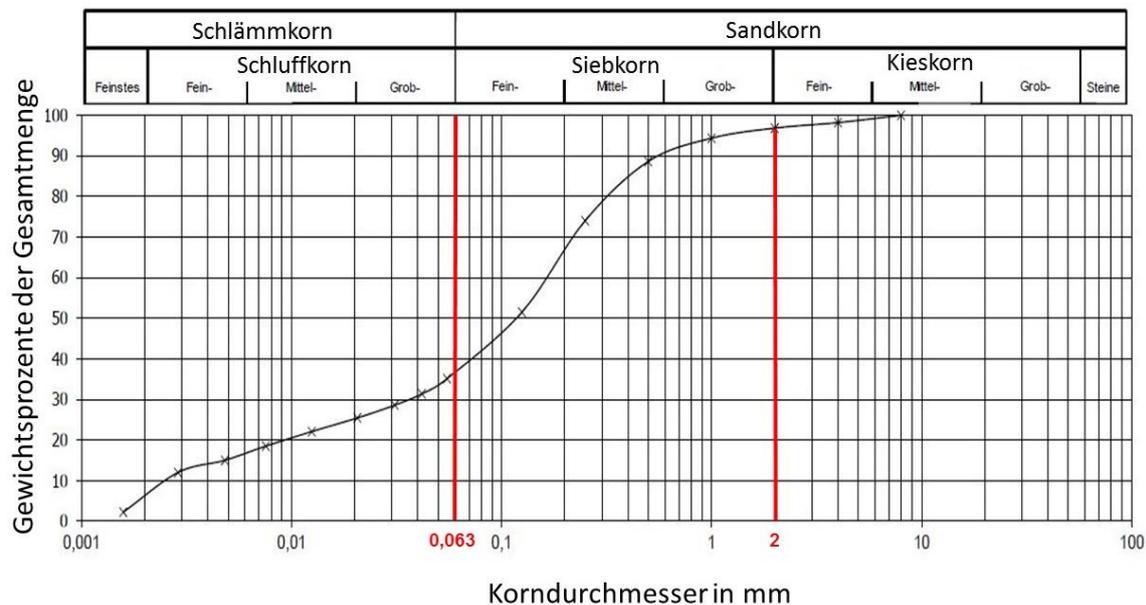


Abbildung 33: Korngrößenverteilung Berliner Mergel [41] bzw. [42]

Daher erfolgt die Klassifizierung sowohl über die plastischen Eigenschaften als auch über die Korngröße. Da 97% der Körner eine Korngröße von 2mm unterschreiten, sind die Körner hauptsächlich der Gruppe der Sandkörner (S) zuzuordnen. Weiterhin ist der Feinkornanteil für einen gemischtkörnigen Boden hoch (U\* oder T\*).

Die weiteren charakteristischen Bodenkennwerte des Berliner Mergels sind in der folgenden Tabelle 11 aufgeführt.

*Tabelle 11: Charakteristische Bodenkennwerte Berliner Mergel [41] bzw. [42]*

<b>Geotechnischer Kennwert</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Trockendichte $\rho_d$	2,1049	[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	2,2717	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	7,92	[%]
Fließgrenze $w_L$	18,31	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	11,11	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	7,19	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	0,95	[-]

Mit einer Plastizitätszahl von 7,19% und einer Fließgrenze von 18,31% ist der Berliner Mergel gerade noch den Sand-Ton-Gemischen zuzuordnen. Aufgrund der Konsistenzzahl von 0,95 ist der Zustand des Berliner Mergels als steif zu bezeichnen.

Das Erscheinungsbild von dem untersuchten Berliner Mergel ist in der folgenden Abbildung 34 dargestellt.

*Abbildung 34: Erscheinungsbild Berliner Mergel*

### Glimmerton

Dieser Boden hat einerseits retrospektiv eine Bedeutung für insbesondere in Hamburg ausgeführte Projekte und andererseits sicherlich auch eine Bedeutung für zukünftige Projekte im norddeutschen Raum. Bzgl. der Bandbreite liegt der Erfahrungswert für den Dispergierungsgrad mit 50 bis 70% im Mittelfeld.

Die folgenden charakteristischen Kenngrößen stammen aus dem geotechnischen Gutachten [9], das im Vorfeld des Projektes „U4 HafenCity“ erstellt worden ist.

Der Korngrößenverteilung (Abbildung 35) ist zu entnehmen, dass der Feinkornanteil bei etwa 90% liegt, Anteile >2,0mm sind nicht vorhanden.

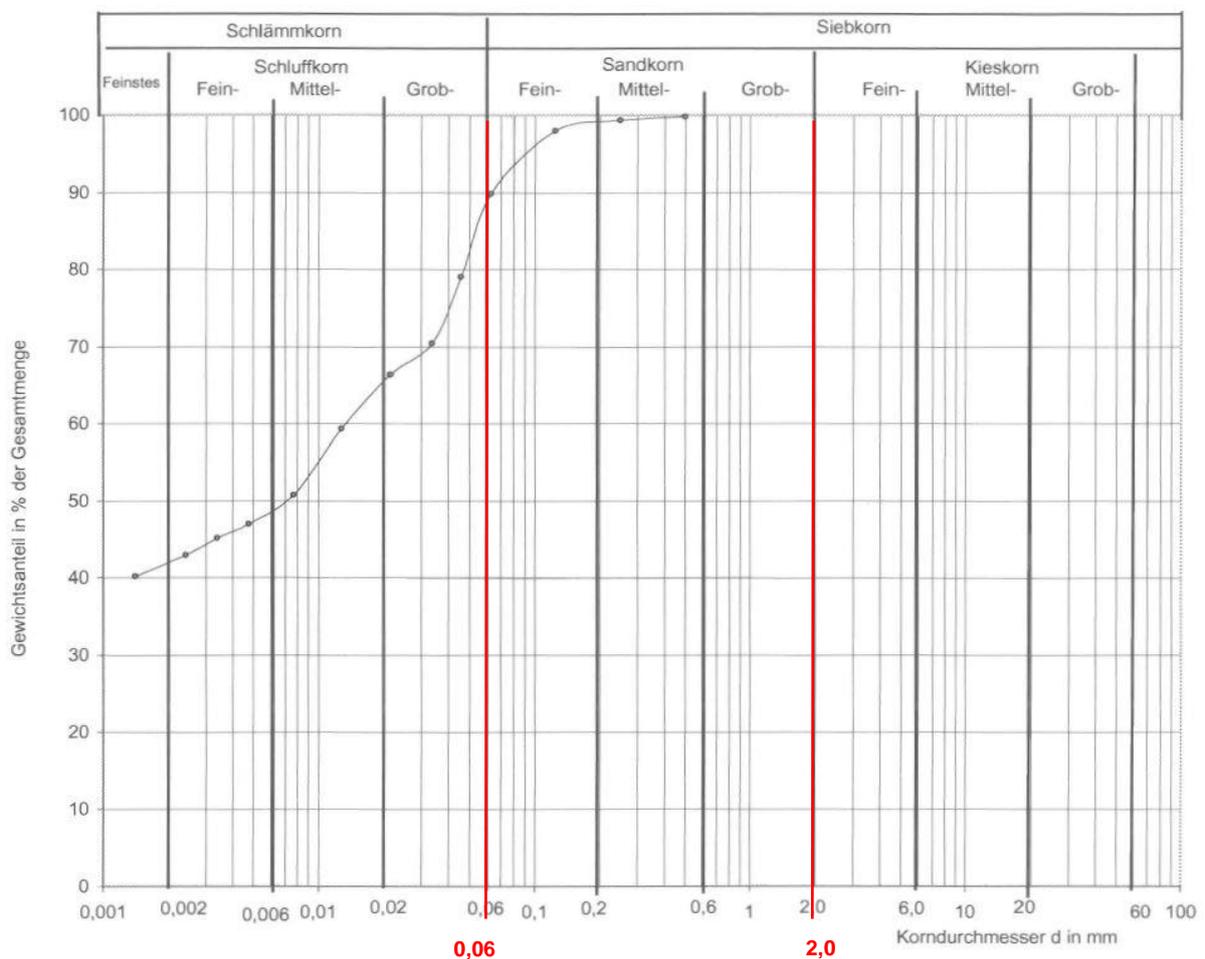


Abbildung 35: Korngrößenverteilung Glimmerton [9]

Die weiteren charakteristischen Bodenkennwerte des Glimmertons sind in der folgenden Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Charakteristische Bodenkennwerte Glimmerton [9]

Geotechnischer Kennwert	Wert	Einheit
Trockendichte $\rho_d$		[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	2,1305	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	17,40	[%]
Fließgrenze $w_L$	44,60	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	19,10	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	25,50	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	1,09	[-]

Mit einer Plastizitätszahl von 25,50% und einer Fließgrenze von 44,60% ist der Glimmerton als mittelplastischer Ton zu klassifizieren. Mit der Konsistenzzahl von 1,09 ist der Zustand als steif bis halbfest zu bezeichnen.

Das Erscheinungsbild des untersuchten Glimmertons ist in der folgenden Abbildung 36 dargestellt.



Abbildung 36: Erscheinungsbild Glimmerton

### London Clay

Bei diesem Boden handelt es sich wie der Name schon sagt um einen Ton aus London. Aufgrund der guten Verfügbarkeit, des hohen Feinkornanteils und der Tatsache, dass er bei den sehr großen Projekten „Crossrail“ und „Thames Tideway“ prognostiziert bzw. angetroffen wurde und damit über eine hohe Praxisrelevanz verfügt, wurde dieser Boden bereits für die Kalibrierungsversuche verwendet. Der in der Praxis genannte Erfahrungswert für den Dispergierungsgrad dieses Bodens liegt bei 30%.

Der London Clay zählt zu den feinkörnigen Böden. Wie in der folgenden Abbildung 37 zu erkennen ist, liegt der Feinkornanteil des Tons bei fast 90% und der Kieskornanteil bei 0%.

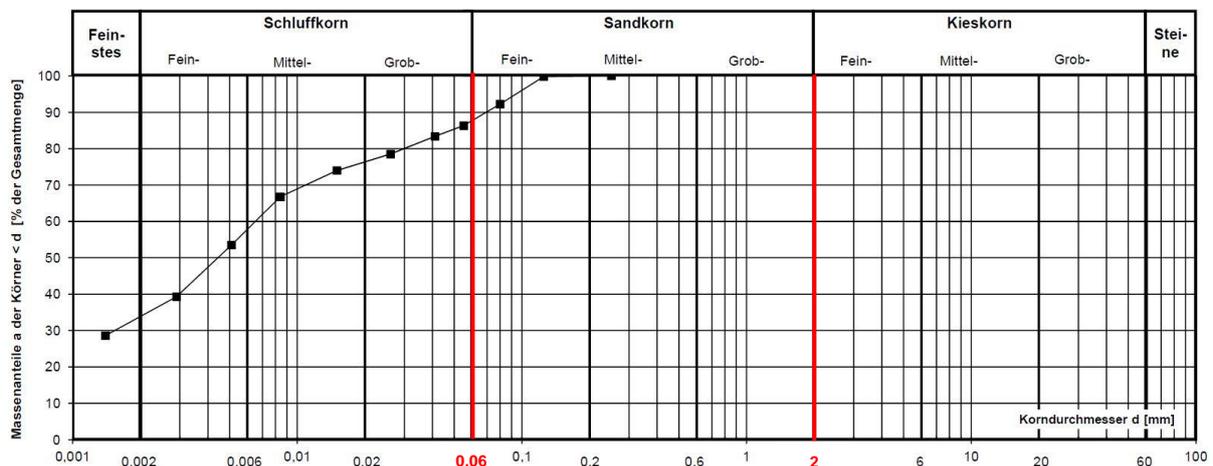


Abbildung 37: Korngößenverteilung London Clay [54]

Die Korngößenverteilung wurde ebenso wie die weiteren charakteristischen Bodenkennwerte des London Clay (Tabelle 13) im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau an der RWTH Aachen [54] bestimmt.

Tabelle 13: Charakteristische Bodenkennwerte London Clay [54]

Geotechnischer Kennwert	Wert	Einheit
Trockendichte $\rho_d$	1,134	[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	1,722	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	30,39	[%]
Fließgrenze $w_L$	74,00	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	20,60	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	53,40	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	0,20	[-]

Mit der hohen Plastizitätszahl von 53,40% und der ebenfalls hohen Fließgrenze von 74,00% ist der London Clay eindeutig als ausgeprägt plastischer Ton zu klassifizieren. Mit einer Konsistenzzahl von 0,20 ist der Zustand als breiig zu beschreiben.

Das Erscheinungsbild von dem untersuchten London Clay ist in der folgenden Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: Erscheinungsbild London Clay

### London Chalk

Bei dieser Kreide aus London handelt es sich um ein veränderliches Festgestein. Auch hier hat die hohe Praxisrelevanz verbunden mit der guten Verfügbarkeit dazu geführt, dass London Chalk Eingang in die Versuchsreihe gefunden hat. Aufgrund der in der Vergangenheit bei einem Projekt gemachten Erfahrungen war London Chalk außerdem hochinteressant, weil von Projektbeteiligten ein Dispergierungsgrad von 100% genannt worden ist. Somit wäre in Bezug auf die möglichst große Bandbreite das Maximum abgedeckt.

Wie der Korngrößenverteilung in der folgenden Abbildung 39 zu entnehmen ist, setzt sich London Chalk zu 94% aus Schluffkörnern mit der Korngröße unter 0,063mm zusammen und ist somit als feinkörnig zu bezeichnen. Die Kreide weist jedoch auch etwa 1% Körner der Korngröße größer als 2mm auf.

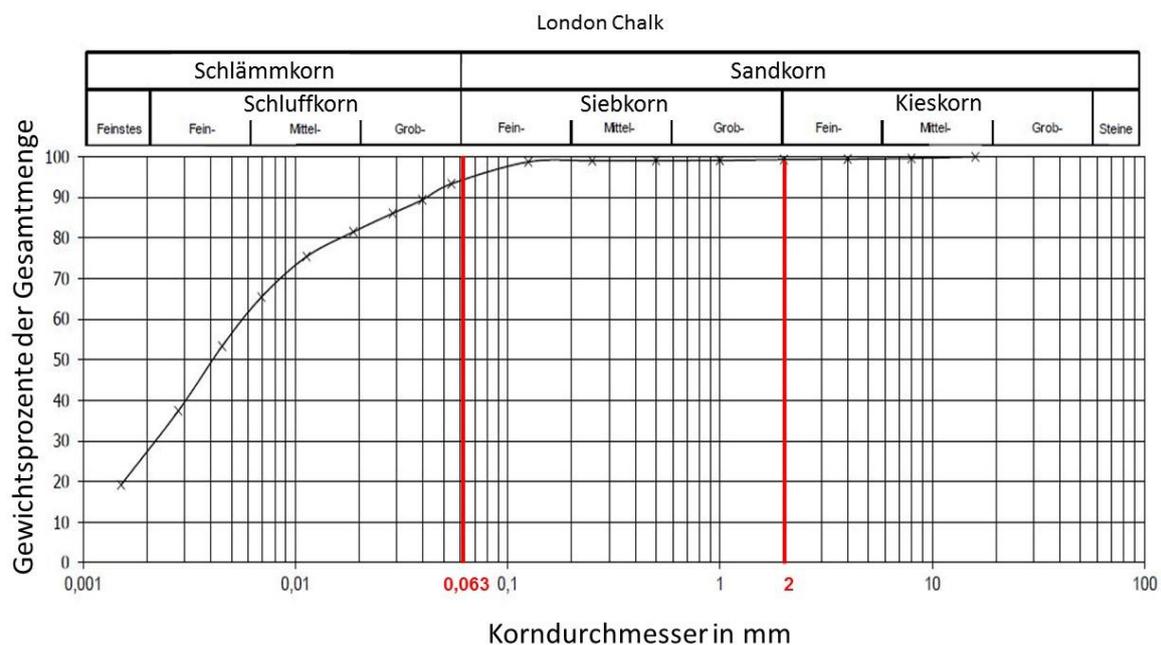


Abbildung 39: Korngrößenverteilung London Chalk

Die weiteren charakteristischen Bodenkennwerte der London Chalk sind in der folgenden Tabelle 14 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 14: Charakteristische Bodenkennwerte London Chalk

Geotechnischer Kennwert	Wert	Einheit
Trockendichte $\rho_d$	1,5741	[g/cm <sup>3</sup> ]
Feuchtdichte $\rho$	1,8824	[g/cm <sup>3</sup> ]
Wassergehalt $w$	24,49	[%]
Fließgrenze $w_L$	27,57	[%]
Ausrollgrenze $w_p$	22,64	[%]
Plastizitätszahl $I_p$	4,93	[%]
Konsistenzzahl $I_c$	0,62	[-]

Anhand der Plastizitätszahl von 4,93% und der Fließgrenze von 27,57% lässt sich London Chalk als leicht plastischer Schluff klassifizieren. Mit der Konsistenzzahl von 0,62 ist der Zustand als weich zu kategorisieren. Ob diese Art der Einsortierung bei der Kreide geeignet ist, erscheint fraglich. Eher felsmechanische Charakteristika wie eine gewisse Kornbindung werden hier nicht berücksichtigt.

Das Erscheinungsbild der London Chalk ist in der folgenden Abbildung 40 dargestellt.



Abbildung 40: Erscheinungsbild London Chalk

### 6.2.3.2 *Ablauf der Versuche*

Da übliche auf dem Markt erhältliche Siebtrommelapparaturen in der Regel mit zwei Trommeln ausgestattet sind, lassen sich mit einem Durchlauf immer gleich zwei Versuche durchführen. Es hat sich bei den Dispergierungsversuchen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Laufzeiten als optimal herausgestellt, je Boden ein Programm abzuarbeiten, das insgesamt aus 6 Versuchen und damit 3 Durchläufen besteht. Hierbei ist es vorteilhaft, mit der Laufzeit von 30 Minuten zu beginnen, da während der Rotationsdauer die Probenvorbereitung für den folgenden 20-Minuten-Durchlauf erfolgen kann. Auch bei diesem kann die Rotationsdauer für die Probenvorbereitung für den das Programm abschließenden 10-Minuten-Durchlauf genutzt werden. Je nach Menge des zur Verfügung stehenden Bodenmaterials kann das Programm mehrfach durchgeführt werden.

Zur Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Versuche und damit zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit wird im Folgenden ergänzend zu dem oben erläuterten grundsätzlichen Versuchsablauf detailliert auf die „handwerklichen“ Besonderheiten eingegangen.

Für die Herstellung der Probekörper kamen je nach Bodenart verschiedene Werkzeuge wie z.B. ein Messer, eine Säge oder ein Spachtel zum Einsatz (siehe Abbildung 41). Mitunter musste auch auf einen Hammer zurückgegriffen werden.



*Abbildung 41: Herstellung Probekörper*

Die Dauer der Herstellung belief sich je nach Boden auf 20 bis 40 Minuten für einen Durchlauf, also 2 Versuche und damit etwa 20 Würfel.

---

Zur Bestimmung der Ausgangsprobenmasse  $m_0$  wurden sowohl die einzelnen Würfel als auch die Summe der Würfel mit einer Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1\text{g}$  gewogen. Dieses Vorgehen diene außerdem dazu, die Einhaltung der Vorgaben (40-60g pro Würfel, 450-550g pro Probe) zu gewährleisten. Neben der Gesamtmasse wurde auch die Anzahl der Würfel protokolliert. Zusätzlich wurden die Würfel sowohl auf einem Brett als auch in der Trommel zu Dokumentationszwecken fotografiert.

Bei der festgelegten Teilfüllung werden pro Versuch ca. 2,5 Liter Versuchsflüssigkeit benötigt. Für die Bestimmung und Protokollierung des exakten Volumens  $V_{\text{Sus},0}$  wurde die Masse  $M_{\text{Sus},0}$  mit Hilfe der Waage bestimmt und durch die Dichte  $\rho_{\text{Sus},0}$  geteilt. Bei der Dichte der Versuchsflüssigkeit „Leitungswasser“ wurde die jeweils gemessene und protokollierte Temperatur berücksichtigt. Der ebenfalls dokumentierte pH-Wert der Flüssigkeit wurde mit einem pH-Meter bestimmt.

Nach dem Einbau der mit den Würfeln gefüllten Trommeln in die Apparatur und dem Einfüllen der Versuchsflüssigkeit wurde diese als Ausgangszustand ebenfalls fotografiert, um die später eintretende augenscheinliche Veränderung der Versuchsflüssigkeit darstellen zu können. Aus diesem Grund wurde auch jeweils der Zustand nach der Hälfte der Laufzeit und nach Beendigung der Rotation fotografisch festgehalten (vgl. Abbildung 42).

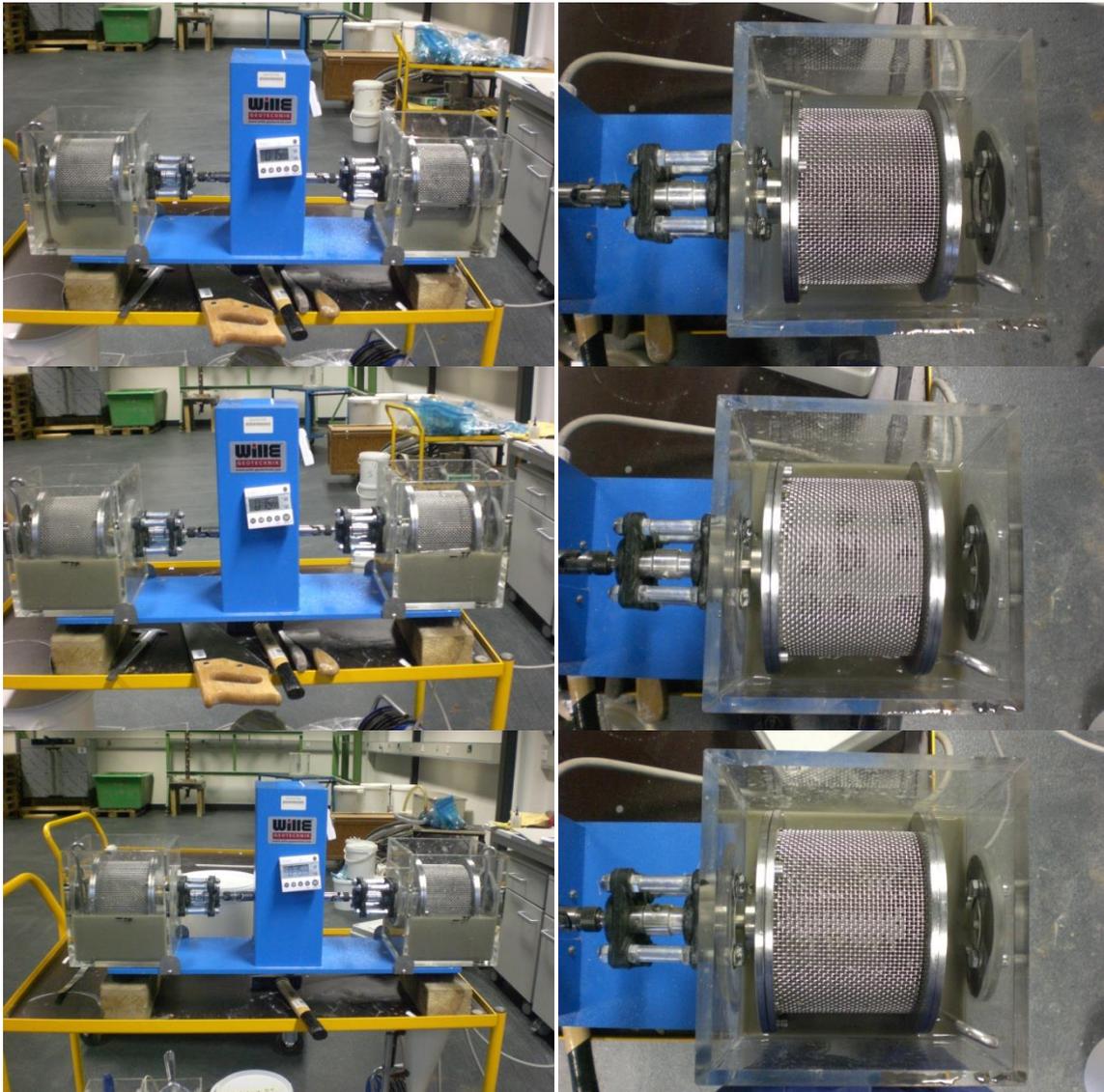


Abbildung 42: Fotografische Dokumentation der Veränderung der Versuchsflüssigkeit (obere Reihe: vor Rotationsbeginn, mittlere Reihe: nach der Hälfte der Laufzeit, untere Reihe: nach Beendigung der Rotation)

Das Ablassen der Versuchsflüssigkeit erfolgte verfahrensbedingt in zwei Schritten. Zunächst musste so viel Flüssigkeit abgelassen werden, dass die Trommeln ausgebaut werden konnten. Nach erfolgtem Ausbau konnte der Rest der Flüssigkeit entweder ebenfalls durch Ablassen oder durch Auskippen des Troges in den Auffangbehälter erfolgen. In beiden Fällen wurde in der Regel der Einsatz eines Silikonspachtels erforderlich, um den gesamten Inhalt aus der Trommel in den Auffangbehälter zu befördern. Für das weitere Handling war es vorteilhaft, die Flüssigkeit in eine Kanne umzufüllen.

Die ausgebauten Trommeln wurden geöffnet und ohne Deckel gewogen. Die Masse des Trommelrückstandes  $m_{TR}$  ließ sich durch Subtraktion des Trommelgewichts von diesem gemessenen Wert ermitteln. Die Würfel wurden in der Trommel und wieder auf dem Brett fotografiert, um den Unterschied vor und nach der Versuchsdurchführung darstellen zu können. Alle Probekörper wurden mit beschrifteten Tüten luftdicht verpackt, um zu Vergleichszwecken die gleichen Kennwerte wie an den „natürlichen“ Proben bestimmen zu können.

Aufgrund der Tatsache, dass es ablaufbedingt insbesondere bei dem zweiten weiterbearbeiteten Versuch eine gewisse Zeit dauert, bis die nächsten Schritte erfolgen, war in der Regel ein Absetzverhalten in der Kanne zu beobachten. Daher wurde die Versuchsflüssigkeit vor dem Sieben manuell aufgerührt. Ggf. war dieser Vorgang während der Siebung und der Dichtebestimmung zu wiederholen. Die Flüssigkeit wurde auf einen Turm genormter Analysesiebe (Abbildung 43) gegeben.



*Abbildung 43: Turm genormter Analysesiebe*

Als praktikabel hat sich die Verwendung der Maschenweiten 0,2mm, 0,125mm, 0,09mm und 0,071mm erwiesen (siehe Abbildung 44). Die mit den jeweiligen Sieben abgetrennten Feuchtmassen wurden der Vollständigkeit halber gewogen und protokolliert.

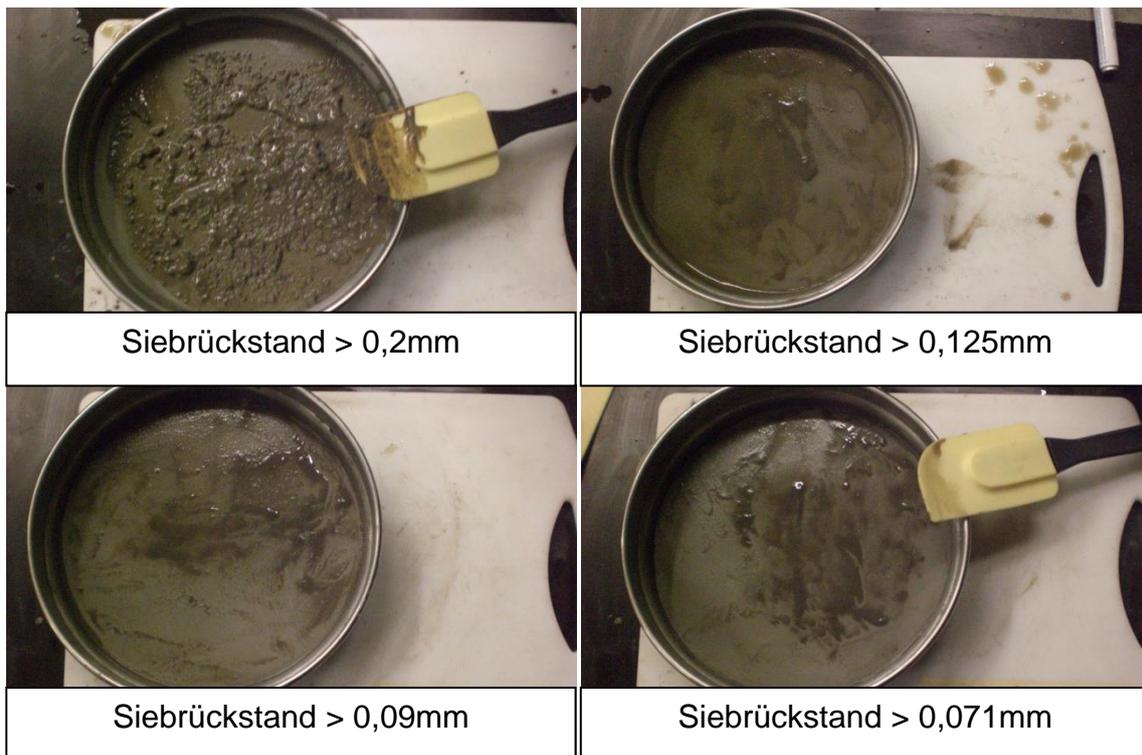


Abbildung 44: Siebrückstände

Der Siebdurchgang – also die Suspension mit dem dispergierten Boden – wurde für die weiteren Untersuchungen wieder in eine Kanne gefüllt. Die Masse  $M_{\text{Sus},1,\text{gem}}$  konnte nun durch Wiegen der Kanne und anschließender Subtraktion des Kannenleergewichtes bestimmt werden. Als Plausibilitätsprüfung wurde außerdem das Volumen  $V_{\text{Sus},1,\text{gel}}$  an der auf der Kanne befindlichen Skala abgelesen. Der Vollständigkeit halber wurden von der Suspension auch wieder die Temperatur und der pH-Wert bestimmt und protokolliert.

Mit Hilfe des Dichteglasses konnte bei der Teilfüllung die Dichte in der Regel in 6 Teilmessungen ermittelt werden. Hierzu wurde das Dichteglas jeweils sorgfältig gefüllt – durch leichte „Überfüllung“ und anschließendes Abstreifen unter Zuhilfenahme des Deckels wurde das Einschließen von Luftblasen verhindert – und mit der Präzisionswaage gewogen. Von diesen Messwerten wurde das arithmetische Mittel gebildet. Von diesem wurde im Anschluss die Masse des Dichteglasses subtrahiert. Dieses Ergebnis wurde dann durch das exakt bestimmte Volumen des Dichteglasses dividiert, um schlussendlich die Dichte der Suspension zu erhalten. Die weiteren Rechenschritte zur Ermittlung des Dispergierungsgrades erfolgten dann wie beim grundsätzlichen Ablauf beschrieben.

### **6.2.3.3 Dokumentation**

Für die Dispergierungsversuche wurde ein Protokoll in Anlehnung an die Vorgaben aus der ASTM-Norm und den DGGT-Empfehlungen erstellt (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46).

Das aus zwei Seiten bestehende Protokoll ist in 6 Abschnitte unterteilt. In dem ersten Abschnitt werden grundsätzliche für die eindeutige Identifizierung des Versuches und Zuordnung zu Fotos und Rückstellproben erforderliche Informationen wie die Probennummer, um welchen Boden es sich handelt sowie Datum, Uhrzeit und Bearbeiter festgehalten. Darüber hinaus werden die Ausgangsdaten „Stückzahl Einzelproben“, „Trommelgewicht“, „Trommelgewicht + feuchte Probe“ und „Gesamtmasse der feuchten Probe“ dokumentiert.

Der zweite Abschnitt dient der Ermittlung und Dokumentation der Kennwerte der Versuchsflüssigkeit vor der Versuchsdurchführung. Da als Versuchsflüssigkeit Leitungswasser festgelegt wurde, hat eine Hilfstabelle für die Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur Eingang in das Protokoll gefunden.

Im dritten Abschnitt werden die ersten Erkenntnisse der Versuchsdurchführung protokolliert. Hierbei geht es darum, was mit den Probekörpern geschieht, also die Veränderung der Masse und die Identifizierung von abgeschälten Bodenpartikeln mit einer Größe von  $> 0,071\text{mm}$ . Außerdem sind einige Zeilen für subjektive Beobachtungen oder Besonderheiten vorgesehen.

Im vierten Abschnitt werden die Kennwerte der Versuchsflüssigkeit nach der Versuchsdurchführung festgehalten. Im Zusammenhang mit dem fünften Abschnitt „Versuchsauswertung“ handelt es sich um die Kerninformationen zu dem Untersuchungsziel „Dispergierung“.

Der sechste Abschnitt „Berechnungen“ stellt eine Hilfestellung für die im Abschnitt 4 zu protokollierende Dichte der Suspension dar und spiegelt das oben erläuterte Vorgehen bei der Dichtebestimmung wider.

<b>Dispergierungsneigung in Anlehnung an ASTM D4644-87 und E20 (AK 3.3 DGGT)</b>								
Datum ____. ____ . ____	Uhrzeit ____ : ____	Name _____						
Boden: _____	<div style="border: 1px solid black; background-color: #cccccc; width: 100%; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">           Probe Nr.: _____         </div>							
Stückzahl Einzelproben: _____								
Trommelgewicht $m_T$ [g]: _____	Trommel+feuchte Probe $m_0 + m_T$ [g]: _____	Gesamtmasse der feuchten Probe $m_0$ [g]: _____						
<b>Kennwerte der Versuchsflüssigkeit vor Versuchsdurchführung</b>								
Versuchsflüssigkeit: _____								
pH-Wert: _____ Temperatur: _____ [°C]								
Masse Suspension: $M_{sus,0} =$ _____ [g]								
Dichte: $\rho_{sus,0} =$ _____ [g/cm <sup>3</sup> ] <sup>*)</sup>								
Wasserdichte in Abhängig der Temperatur								
T [°C]	18	19	20	21	22			
$\rho_{H_2O}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9986	0,9984	0,9982	0,998	0,9978			
Volumen Suspension: $V_{sus,0} =$ _____ [cm <sup>3</sup> ]								
<b>Versuchsdurchführung</b>								
Dauer	Trommelrückstand (> 2mm)			Siebrückstand (> 0,071mm)				
D	$m_T$	$m_T + m_{TR}$	$m_{TR}$	> 0,2	> 0,125	> 0,09	> 0,071	$\Sigma$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Anmerkungen:								

Abbildung 45: Versuchsprotokoll Seite 1

Kennwerte der Versuchsflüssigkeit nach Versuchsdurchführung																			
pH-Wert: _____	Temperatur: _____	[°C]																	
Masse Suspension nach Siebung (gemessen):	$M_{\text{sus},1,\text{gem}} =$ _____	[g]																	
Volumen Suspension nach Siebung (gelesen):	$V_{\text{sus},1,\text{gel}} =$ _____	[cm <sup>3</sup> ]																	
Dichte:	$\rho_{\text{sus},1} =$ _____	[g/cm <sup>3</sup> ] *) & **)																	
Volumen Suspension nach Siebung (gemessen):	$V_{\text{sus},1,\text{gem}} =$ _____	[cm <sup>3</sup> ]																	
Versuchsauswertung																			
Dichteunterschied:	$\Delta\rho_{\text{sus}} = \rho_{\text{sus},1} - \rho_{\text{sus},0} =$ _____	[g/cm <sup>3</sup> ]																	
Dispergierter Boden:	$m_{\text{disp}} = \Delta\rho_{\text{sus}} \times V_{\text{sus},1} =$ _____	[g]																	
Dispergierungsgrad:	$\alpha_{\text{disp}} = (m_{\text{disp}} / m_0) \times 100 =$ _____	[%]																	
Berechnungen																			
	$V_{\text{Dichteglas}} =$ _____	[cm <sup>3</sup> ]																	
	$m_{\text{Dichteglas, leer, Zylinder+Deckel}} =$ _____	[g]																	
*) $\rho_{\text{sus}} = (m_{\text{Dichteglas, mit Suspension}} - m_{\text{Dichteglas, leer, Zylinder+Deckel}}) / V_{\text{Dichteglas}}$																			
**) Mittelwertermittlung der Massen der mit Suspension gefüllten Dichtegläser																			
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="padding: 2px;">Einzelmassen</th> </tr> <tr> <th style="width: 30px; padding: 2px;"></th> <th style="padding: 2px;"><math>m_i, \text{ Dichteglas, mit Suspension [g]}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">1</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">2</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">3</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">4</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">5</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">6</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center; padding: 2px;">7</td><td style="padding: 2px;"></td></tr> </tbody> </table>	Einzelmassen			$m_i, \text{ Dichteglas, mit Suspension [g]}$	1		2		3		4		5		6		7		<p style="margin: 0;"><b>Mittelwert:</b></p> <p style="margin: 0;"><math>m_{\text{Dichteglas, mit Suspension},1} =</math> _____ [g]</p> <p style="margin: 0;"><b>Dichtebestimmung *):</b></p> <p style="margin: 0;"><math>\rho_{\text{sus},1} =</math> _____ [g/cm<sup>3</sup>]</p>
Einzelmassen																			
	$m_i, \text{ Dichteglas, mit Suspension [g]}$																		
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			

Abbildung 46: Versuchsprotokoll Seite 2

Alle erfassten Informationen und Daten werden in eine entsprechende Auswertungsdatei übertragen, so dass Auswertungen und Gegenüberstellungen erfolgen können. Es wird ein Programm zur Tabellenkalkulation verwendet, so dass auch hier eine einfache Adaption durch die Praxis erfolgen kann.

In ihrem Aufbau folgt die Datei den Abschnitten des Protokolls. Lediglich der Hilfsabschnitt „Berechnungen“ spielt für die weiteren Auswertungen keine Rolle und entfällt. Somit ergeben sich für die Datei 5 Abschnitte, die zur Verbesserung der Lesbarkeit getrennt voneinander in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. In der Datei selbst sind die Abschnitte miteinander verbunden.

Probendaten							
Proben- nr.	Trommel- seite	Datum	Uhrzeit	Stückzahl Einzel- proben	Trommel- gewicht	Gewicht Trommel + feuchte Probe	Gesamt- masse der feuchten Probe
					[g]	[g]	[g]
BM001	rechts	25.10.2013	09:15	9	1133,2	1586,0	452,8
BM002	links	25.10.2013	09:15	9	1125,4	1634,8	509,4
BM007	rechts	31.10.2013	10:00	10	1133,2	1622,6	489,4
BM008	links	31.10.2013	10:00	9	1125,4	1575,8	450,4
BM017	links	08.11.2013	12:00	10	1125,4	1636,8	511,4
BM018	rechts	08.11.2013	12:00	10	1133,2	1591,0	457,8
BM003	rechts	25.10.2013	11:45	9	1133,2	1621,0	487,8
BM004	links	25.10.2013	11:45	9	1125,4	1603,4	478,0
BM009	links	07.11.2013	10:00	10	1125,4	1636,8	511,4
BM010	rechts	07.11.2013	10:00	10	1133,2	1610,6	477,4
BM015	links	08.11.2013	10:00	10	1125,4	1645,6	520,2
BM016	rechts	08.11.2013	10:00	10	1133,2	1653,2	520,0
BM005	links	25.10.2013	14:10	9	1125,4	1617,4	492,0
BM006	rechts	25.10.2013	14:10	9	1133,2	1623,6	490,4
BM011	rechts	07.11.2013	14:10	10	1133,2	1590,4	457,2
BM012	links	07.11.2013	14:10	10	1125,4	1584,2	458,8
BM013	links	08.11.2013	07:30	10	1125,4	1678,8	553,4
BM014	rechts	08.11.2013	07:30	10	1133,2	1635,6	502,4

Abbildung 47: Beispiel Auswertungsdatei, 1. Abschnitt „Probendaten“

Kennwerte der Versuchsflüssigkeit vor Versuchsdurchführung					
Versuchsflüssigkeit	pH-Wert	Temperatur	Masse	Dichte	Volumen
	pH	T	$M_{\text{sus},0}$	$\rho_{\text{sus},0}$	$V_{\text{sus},0}$
	[-]	[°C]	[g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]
Wasser	7,14	20,5	2419,6	0,9981	2424,21
Wasser	7,14	20,5	2544,8	0,9981	2549,64
Wasser	7,53	20,5	2483,6	0,9981	2488,33
Wasser	7,53	20,5	2562,8	0,9981	2567,68
Wasser		19,0	2526,4	0,9984	2530,45
Wasser		19,0	2532,2	0,9984	2536,26
Wasser	7,90	20,1	2427,2	0,9982	2431,63
Wasser	7,90	20,1	2612,0	0,9982	2616,76
Wasser		20,8	2487,0	0,9982	2491,58
Wasser		20,8	2401,2	0,9982	2405,63
Wasser		20,8	2463,6	0,9982	2468,14
Wasser		20,8	2559,8	0,9982	2564,52
Wasser	7,14	20,0	2399,6	0,9982	2403,93
Wasser	7,14	20,0	2502,8	0,9982	2507,31
Wasser		20,5	2494,8	0,9981	2499,55
Wasser		20,5	2515,3	0,9981	2520,09
Wasser		20,7	2542,8	0,9981	2547,54
Wasser		20,7	2604,0	0,9981	2608,85

Abbildung 48: Beispiel Auswertungsdatei, 2. Abschnitt „Kennwerte der Versuchsflüssigkeit vor Versuchsdurchführung“

Versuchsdurchführung				
Dauer	Trommelrückstand (> 2mm)			Siebrückstand (> 0,071mm)
D	$m_T$	$m_T + m_{TR}$	$m_{TR}$	$\Sigma m_{SR}$
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]
10	1133,2	1361,4	228,2	181,2
10	1125,4	1417,6	292,2	160,4
10	1133,2	1394,4	261,2	196,8
10	1125,4	1381,2	255,8	183,5
10	1125,4	1469,2	343,8	159,0
10	1133,2	1438,2	305,0	131,6
20	1133,2	1285,2	152,0	269,6
20	1125,4	1293,6	168,2	260,0
20	1125,4	1313,0	187,6	283,4
20	1133,2	1306,0	172,8	251,4
20	1125,4	1370,8	245,4	233,6
20	1133,2	1375,8	242,6	230,0
30	1125,4	1231,8	106,4	312,0
30	1133,2	1250,6	117,4	274,6
30	1133,2	1227,8	94,6	312,2
30	1125,4	1235,8	110,4	298,2
30	1125,4	1276,6	151,2	355,0
30	1133,2	1264,2	131,0	330,0

Abbildung 49: Beispiel Auswertungsdatei, 3. Abschnitt „Versuchsdurchführung“

Kennwerte der Versuchsflüssigkeit nach Versuchsdurchführung					
pH-Wert	Temperatur	Masse (gemessen)	Volumen (gelesen)	Dichte	Volumen (gemessen)
pH	T	$M_{\text{sus},1}$	$V_{\text{sus},1}$	$\rho_{\text{sus},1}$	$V_{\text{sus},1}$
[-]	[°C]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]
7,96	20,7	2339,6	2290	1,0148	2305,48
7,96	20,7	2514,4	2470	1,0167	2473,10
7,46	20,1	2464,3	2430	1,0175	2421,92
7,72	19,5	2486,4	2470	1,0137	2452,80
	19,0	2521,8	2500,0	1,0117	2492,64
	19,3	2520,8	2480,0	1,0154	2482,57
7,96	20,5	2432,8	2390	1,0257	2371,84
7,96	20,4	2609,2	2570	1,0197	2558,79
	20,2	2484,0	2470	1,0227	2428,86
	20,8	2407,0	2380	1,0241	2350,36
	19,5	2550,0	2510,0	1,0220	2495,11
	19,8	2517,8	2490,0	1,0222	2463,12
6,88	20,9	2236,0	2170	1,0322	2166,25
7,36	20,6	2554,6	2500	1,0287	2483,33
	20,1	2479,6	2450	1,0258	2417,24
	19,8	2508,4	2480	1,0241	2449,37
	19,4	2582,6	2510,0	1,0206	2530,47
	20,0	2603,0	2560,0	1,0224	2545,97

Abbildung 50: Beispiel Auswertungsdatei, 4. Abschnitt „Kennwerte der Versuchsflüssigkeit nach Versuchsdurchführung“

Versuchsergebnisse		
Dichte-unterschied	Masse dispergierter Boden	Dispergierungsgrad
$\Delta\rho_{\text{sus}}$	$m_{\text{disp}}$	$\alpha_{\text{disp}}$
[g/cm <sup>3</sup> ]	[g]	[%]
0,0167	38,50	8,50
0,0186	46,00	9,03
0,0194	46,99	9,60
0,0156	38,26	8,50
0,0133	33,15	6,48
0,0170	42,20	9,22
0,0275	65,27	13,38
0,0215	55,07	11,52
0,0245	59,60	11,66
0,0259	60,97	12,77
0,0238	59,48	11,43
0,0240	59,21	11,39
0,0340	73,65	14,97
0,0305	75,74	15,44
0,0277	66,96	14,65
0,0260	63,68	13,88
0,0225	56,83	10,27
0,0243	61,77	12,29

Abbildung 51: Beispiel Auswertungsdatei, 5. Abschnitt „Versuchsergebnisse“

Zusammenfassend lässt sich der Ablauf des Dispergierungsversuchs inklusive Darstellung der Ergebnisse im folgenden Flowchart (Abbildung 52) plakativ verdeutlichen:

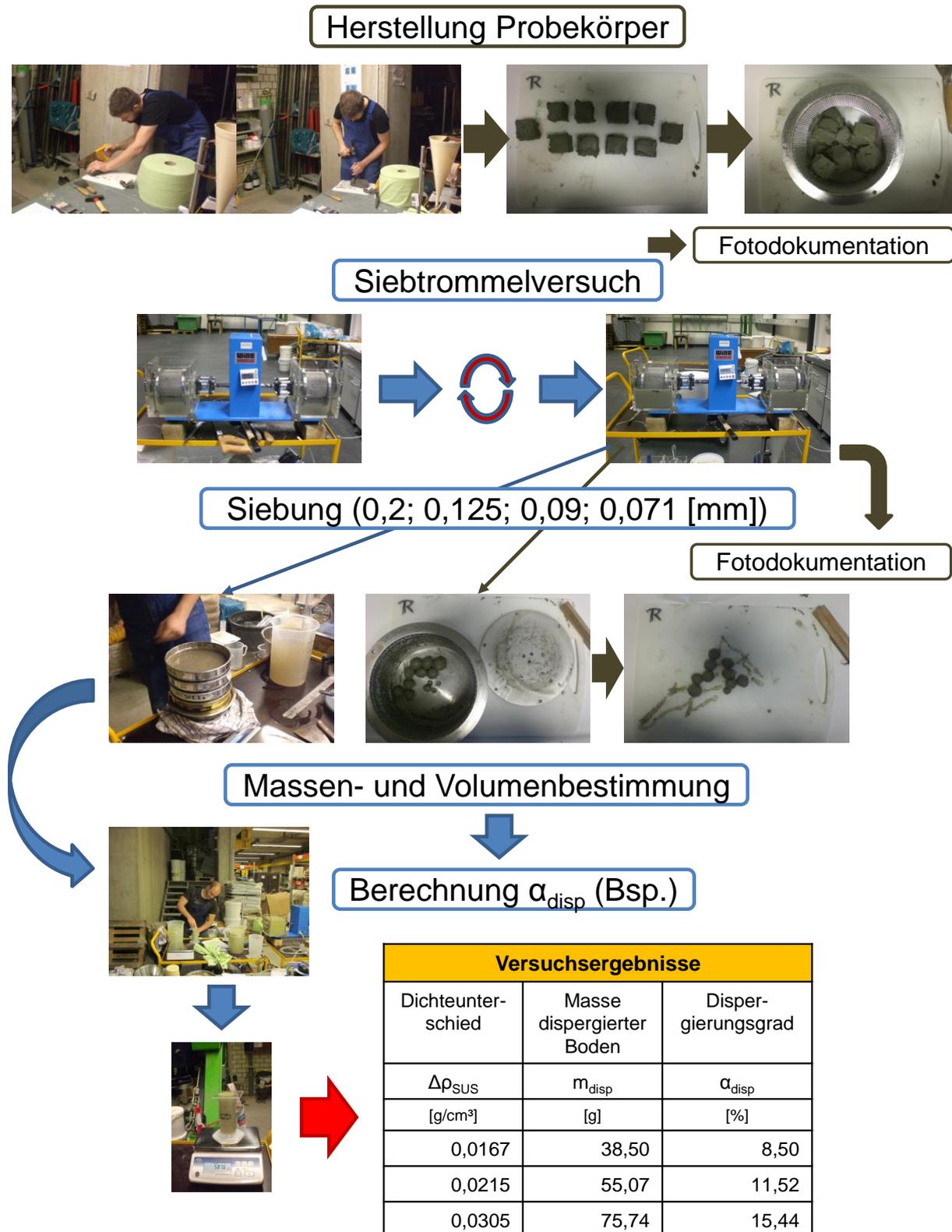


Abbildung 52: Flowchart Ablauf Dispergierungsversuch

### 6.2.4 Ergebnisse

Die Untersuchungen erfolgten in zwei Phasen. In der ersten Phase wurde der Schwerpunkt auf vergleichende Untersuchungen unter Verwendung der verschiedenen Böden gelegt, um die grundsätzliche Eignung des Versuches zu überprüfen. In der zweiten Phase wurden basierend auf den Erkenntnissen aus der ersten Phase gezielte Versuche mit Emschermergel 1 und Kunstboden durchgeführt, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Versuches zu eruieren.

Insgesamt wurden **in der ersten Phase** 83 Versuche durchgeführt, hiervon 28 mit einer Rotationsdauer von 10 Minuten, 26 mit 20 Minuten und 29 mit 30 Minuten Laufzeit.

Sowohl beim Emschermergel 1 als auch beim London Clay entspricht die Anzahl der durchgeführten Versuche nicht dem oben erläuterten Programm. Das heißt, dass nicht je Laufzeit 6 Durchläufe erfolgt sind. Dies ist damit zu erklären, dass es sich um die Versuche aus der Kalibrierungsphase handelt, die mit den später festgelegten Stellgrößen durchgeführt wurden. Beim London Clay war nicht mehr ausreichend Bodenmaterial für weitere Versuche vorhanden. Dennoch sollen die Ergebnisse der Versuche an dieser Stelle nicht vorenthalten werden, da gerade die vergleichende Betrachtung der Dispergierungsgrade der verschiedenen Böden einen nicht unbedeutenden Erkenntnisgewinn liefert.

Beim Glimmerton ist die Aussagekraft mit lediglich zwei durchgeführten 30-Minuten-Versuchen sehr gering. Dies ist damit zu erklären, dass sich der vorhandene Boden durch sein sprödes Verhalten nicht gut bearbeiten ließ. Dies führte bei der Probenvorbereitung zu einem erheblichen Verlust von Bodenmaterial, so dass sich schlussendlich in der Kombination mit der insgesamt begrenzten zur Verfügung stehenden Bodenmenge nicht genug Proben herstellen ließen, um eine größere Anzahl von Versuchen durchzuführen. Da aber die beiden Versuche sehr gründlich durchgeführt wurden und es sich um einen Boden handelt, der sich deutlich von den anderen Böden unterscheidet, sollen auch diese Ergebnisse Eingang in die weiteren Betrachtungen finden.

Eine Zusammenstellung der im Rahmen der ersten Phase durchgeführten Versuche ist der folgenden Tabelle 15 zu entnehmen.

Tabelle 15: Übersicht durchgeführte Versuche Phase 1

Bodenart	Laufzeit [min]	Anzahl Versuche [Stk]
Emschermergel 1	10	7
	20	6
	30	8
Emschermergel 2	10	6
	20	6
	30	6
Berliner Mergel	10	6
	20	6
	30	6
Glimmerton	10	-
	20	-
	30	2
London Clay	10	3
	20	2
	30	1
London Chalk	10	6
	20	6
	30	6

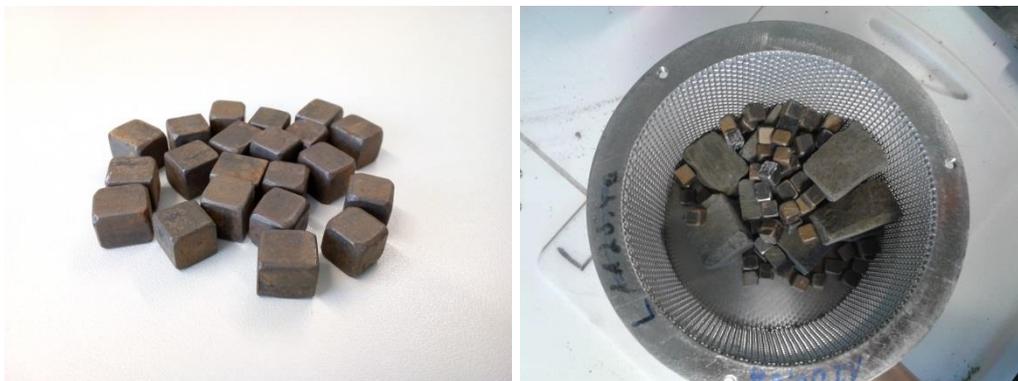
**In der zweiten Phase** wurden weitere 109 Versuche durchgeführt.

Mit 18 zusätzlichen regulären 20-Minuten-Versuchen mit Emschermergel 1 sollte eine breitere Basis für die Untersuchung der Streuung des Versuches geschaffen werden.

Mit 40- und 60-Minuten-Versuchen wurde das Ziel verfolgt, eine Datenbasis für Untersuchungen zu einem eventuellen mathematischen Zusammenhang des Dispergierungsgrades zur Versuchslaufzeit zu schaffen.

Weiterhin wurde bei einigen Versuchen destilliertes Wasser verwendet, um eventuelle Einflüsse der Bestandteile von Leitungswasser erkennbar zu machen. Außerdem kommt es im Standard-Siebtrommelversuch nach ASTM zum Einsatz.

Mit einer Zugabe von Stahlwürfeln sollte eine Erhöhung der mechanischen Einwirkung auf die Probekörper erzielt werden. Diese Überlegung basiert auf der Erkenntnis aus den Versuchen der Phase 1 und aus den Versuchen zur Festlegung der Stellgrößen, dass die Totalwerte der mit dem Versuch ermittelten Dispergierungsgrade deutlich unter den in der Praxis erwarteten Dispergierungsgraden lagen. Es kamen Stahlwürfel mit einer Kantenlänge von ca. 1,0cm und einem Einzelgewicht von 8,0g zum Einsatz (siehe Abbildung 53). 60 Würfel entsprechen demnach in ihrer Masse in etwa der zu verwendeten Masse des Ausgangsprobenmaterials. Mit 90 Stahlwürfeln wird entsprechend ein Verhältnis von 1 zu 1,5 erreicht. Mit diesen Verhältnissen wurden insgesamt 41 Versuche durchgeführt.



*Abbildung 53: Stahlwürfel*

Mit dem Einsatz von Kunstboden wurde das Ziel verfolgt, die systemimmanente Genauigkeit des Versuches zu eruieren. Da bei den Eigenschaften des Kunstbodens eine größtmögliche Homogenität zu erwarten ist, sollten die Streuungen des Versuches auf systematische Fehler bzw. den „Humanfaktor“ des jeweiligen Labormitarbeiters zurückzuführen sein und kleinstmöglich ausfallen. Es wurde ein Töpferton der Firma Glorex verwendet. Gemäß Datenblatt [41] wird dieser unschamottierte Ton als natürlicher Modellierton beschrieben. Er besteht aus natürlicher Tonerde, Kalziumcarbonat, Wasser und aus Konservierungsstoffen. Die Tonerde setzt sich aus Silicaten, Quarz, Calcit und Feldspat zusammen. Des Weiteren wird die Tonmasse als plastisch beschrieben und weist eine Dichte von  $2 \text{ g/cm}^3$  auf. Als Versuchskörper beim Dispergierungsversuch sieht der Kunstboden wie auf der folgenden Abbildung 54 dargestellt aus.



Abbildung 54: Erscheinungsbild Kunstboden

Eine Übersicht der im Rahmen der zweiten Phase durchgeführten Versuche ist der folgenden Tabelle 16 zu entnehmen:

Tabelle 16: Übersicht durchgeführte Versuche Phase 2

Bodenart	Besonderheit	Laufzeit [min]	Anzahl Versuche [Stk]
Emschermergel 1	-	20	18
	-	40	6
	-	60	6
	Destilliertes Wasser	10	6
		20	6
		30	6
	60 Stahlwürfel	10	6
		20	9
		30	8
	90 Stahlwürfel	10	6
		20	6
		30	6
Kunstboden	-	10	-
	-	20	20
	-	30	-

### 6.2.4.1 Datenanalyse - Schritt 1

In einem ersten Schritt der Datenanalyse werden zunächst die Ergebnisse aller in Phase 1 durchgeführten Versuche dargestellt. Ziel der folgenden Darstellungen (Abbildung 55 bis Abbildung 60) ist, die Streuung der Ergebnisse und damit die Qualität der Versuche zu verdeutlichen sowie als Basis für die Diskussion zur Plausibilität zu dienen. Mit der Darstellung der uninterpretierten Ergebnisse, also ohne Bemühung der Statistik soll außerdem darauf hingewiesen werden, dass die Versuche äußerst sorgfältig und mit einem natürlichen Werkstoff durchgeführt wurden und es daher nicht auszuschließen ist, dass bei scheinbaren Ausreißern kein Fehler vorliegt, sondern eventuell tatsächlich eine große Streuung auftreten kann.

#### Emschermergel 1

Beim Emschermergel 1 (Abbildung 55) scheint die Streuung der Ergebnisse auf den ersten Blick akzeptabel zu sein. Es gibt in jeder Datenreihe (10min, 20min, 30min) je einen scheinbaren Ausreißer, ansonsten entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen und sind plausibel.

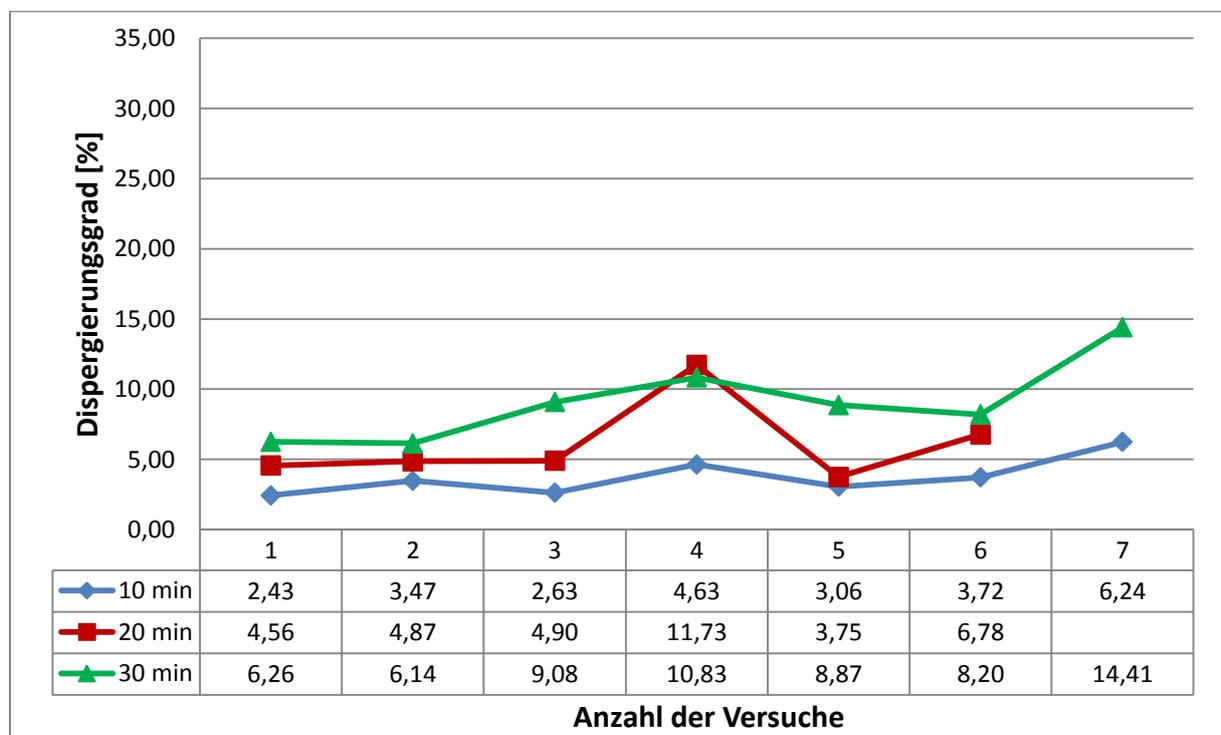


Abbildung 55: Versuchsergebnisse Phase 1 Emschermergel 1

Emschermergel 2

Auch beim Emschermergel 2 (Abbildung 56) scheint die Streuung der Versuchsergebnisse auf den ersten Blick akzeptabel zu sein. Die Ergebnisse der jeweiligen Datenreihen sind relativ gleichmäßig, Ausreißer sind nicht zu konstatieren.

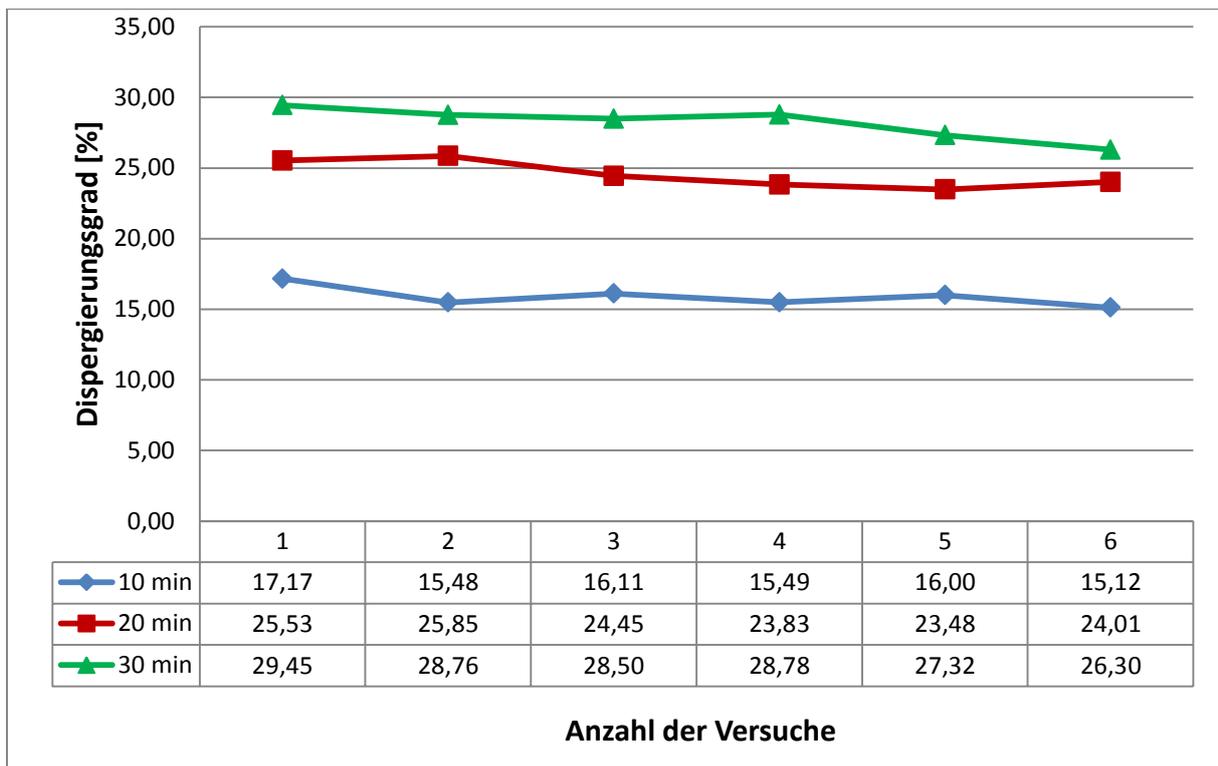


Abbildung 56: Versuchsergebnisse Phase 1 Emschermergel 2

Berliner Mergel

Beim Berliner Mergel (Abbildung 57) sind einige der Werte der 20- und 30-Minuten-Versuche nah beieinander, als Ausreißer ließe sich allenfalls der Wert 10,27 bei den 30-Minuten-Versuchen identifizieren.

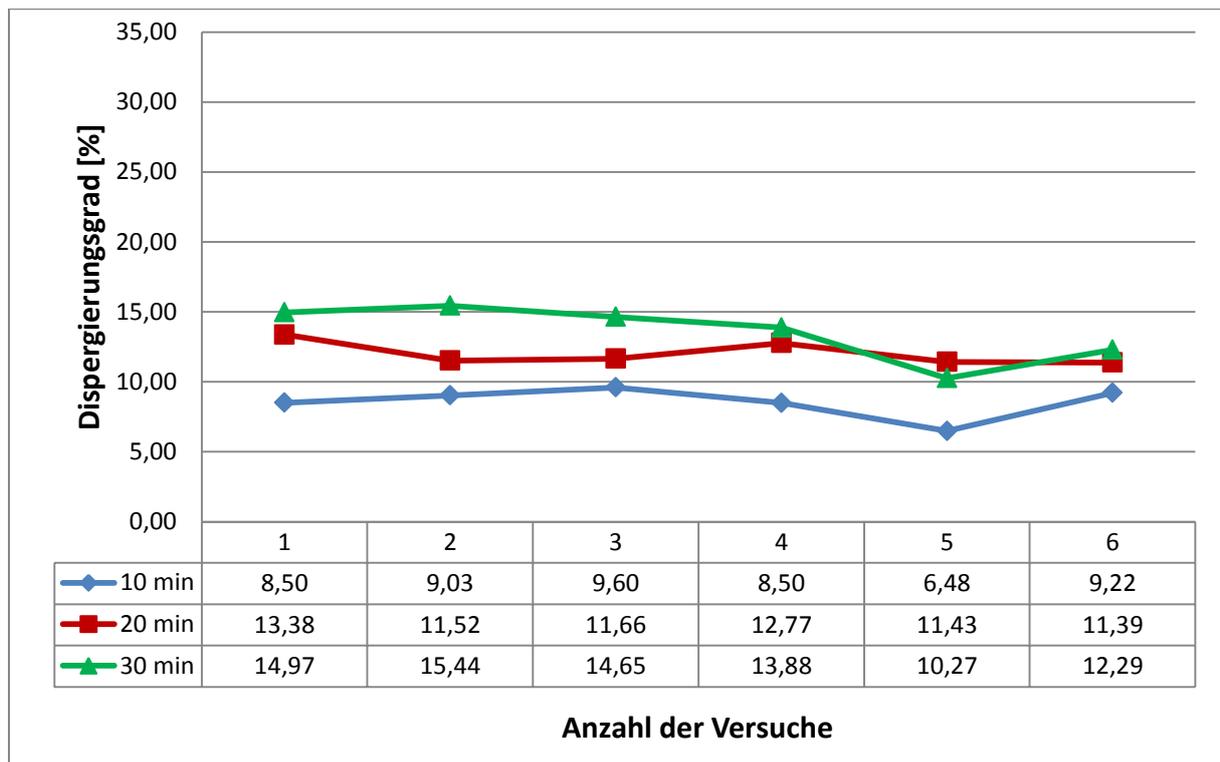


Abbildung 57: Versuchsergebnisse Phase 1 Berliner Mergel

Glimmerton

Die Glimmertonversuche (Abbildung 58) haben aufgrund der geringen Anzahl keine Aussagekraft bezüglich der Streuung. Interessant ist das Ergebnis dennoch, da sich die Totalwerte der beiden sorgfältig durchgeführten Versuche so deutlich von den Versuchen der anderen Böden unterscheiden.

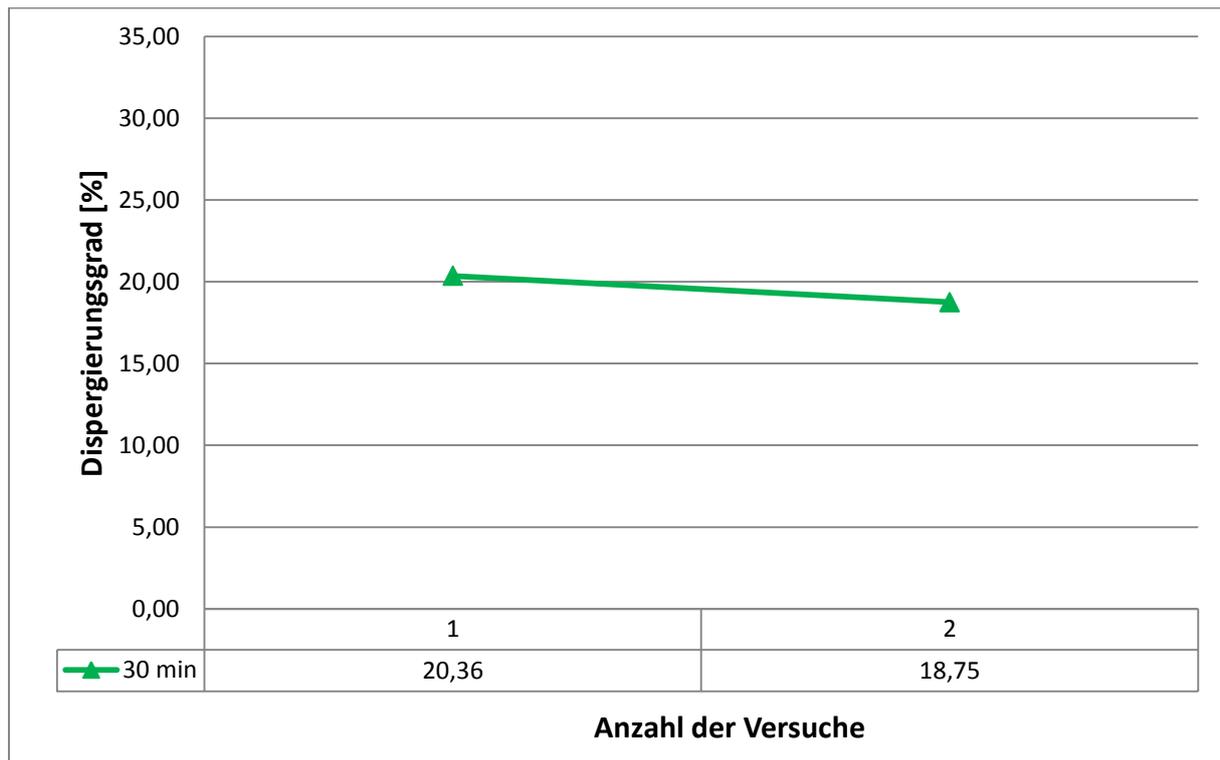


Abbildung 58: Versuchsergebnisse Phase 1 Glimmerton

London Clay

Die Ergebnisse der Versuche mit London Clay (Abbildung 59) weichen sehr stark voneinander ab und streuen stark. Es ist nicht plausibel, dass bei allen Versuchsdauern ähnliche Dispergierungsgrade ermittelt werden. Die Anzahl der Versuche lässt eine qualifizierte Beurteilung nicht zu. Im Folgenden werden die Ergebnisse lediglich der Vollständigkeit halber weiter mit aufgeführt.

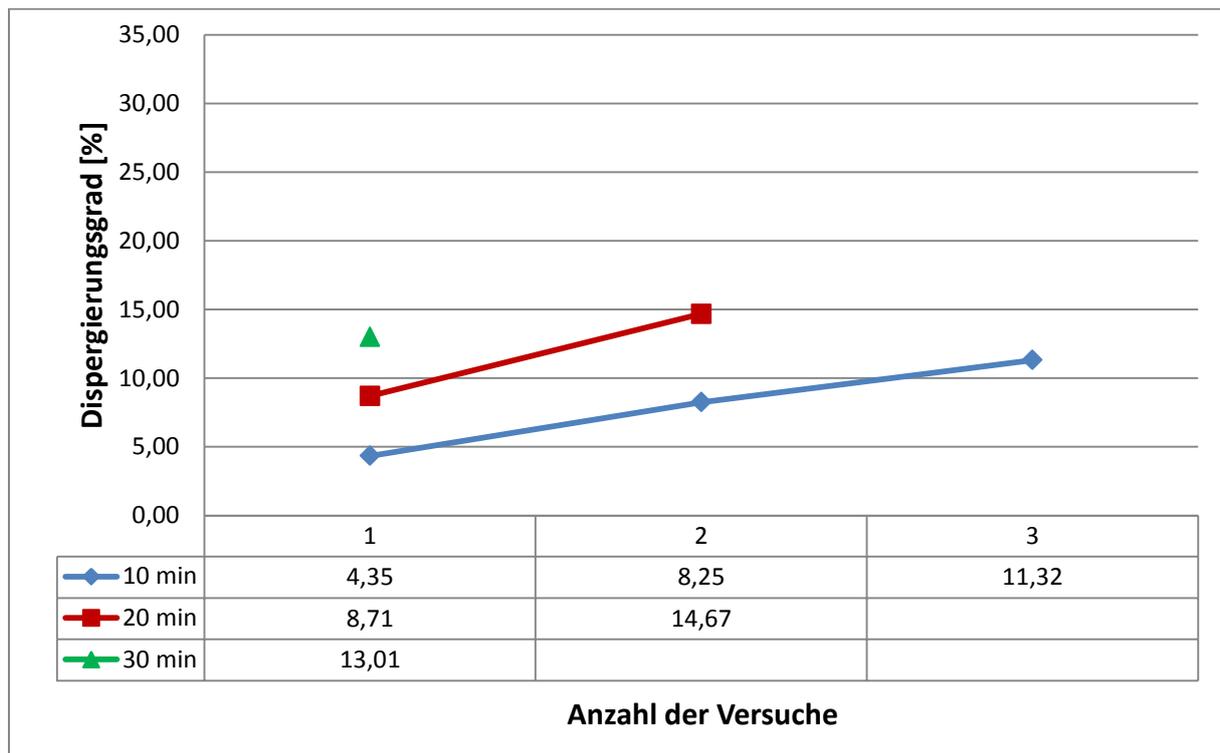


Abbildung 59: Versuchsergebnisse Phase 1 London Clay

London Chalk

Beim London Chalk (Abbildung 60) erscheinen die Ergebnisse ähnlich plausibel wie beim Emschermergel. Lediglich der Wert 9,70 bei den 30-Minuten-Versuchen könnte ein Ausreißer sein.

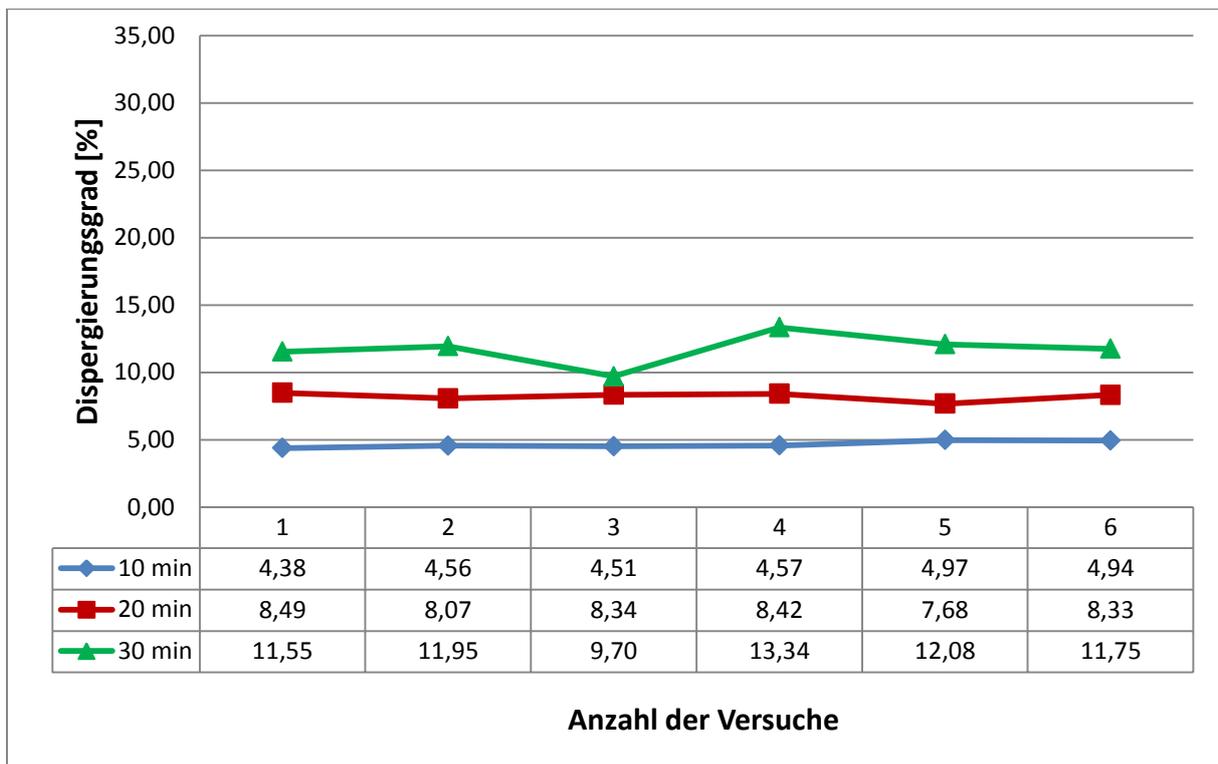


Abbildung 60: Versuchsergebnisse Phase 1 London Chalk

Nach Eliminierung der Ausreißer und in direkter Gegenüberstellung lassen sich die Ergebnisse wie folgt präsentieren (Abbildung 61):

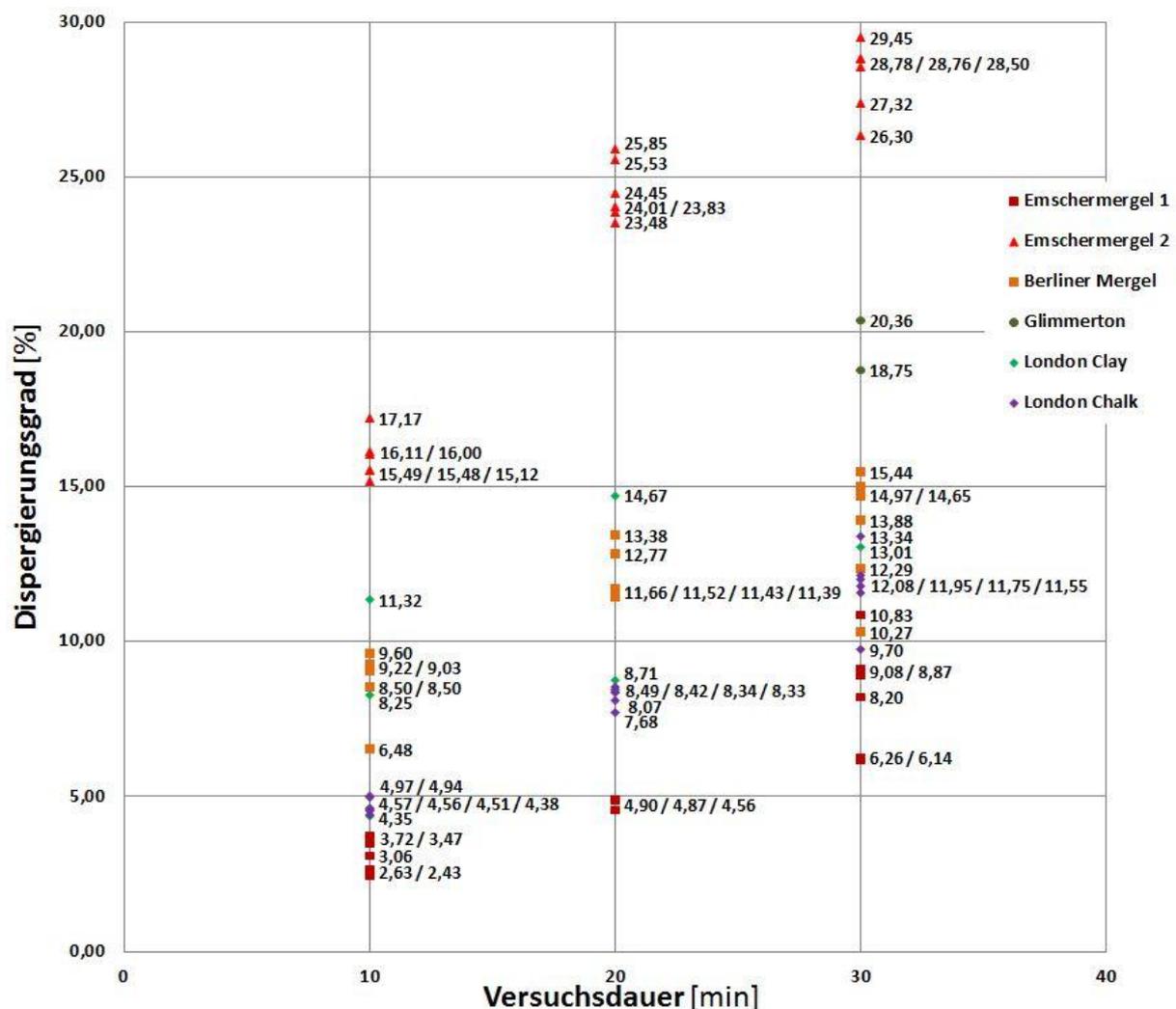


Abbildung 61: Einzelwerte Dispergierungsgrade

Es sind die Einzelwerte der Dispergierungsgrade in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt. Die Streuungen sind relativ gut zu erkennen, durch die Überlagerung der einzelnen Werte wird dies allerdings etwas eingeschränkt. Aus diesem Grund sind in der folgenden Abbildung 62 die Mittelwerte der Dispergierungsgrade ebenfalls in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt.

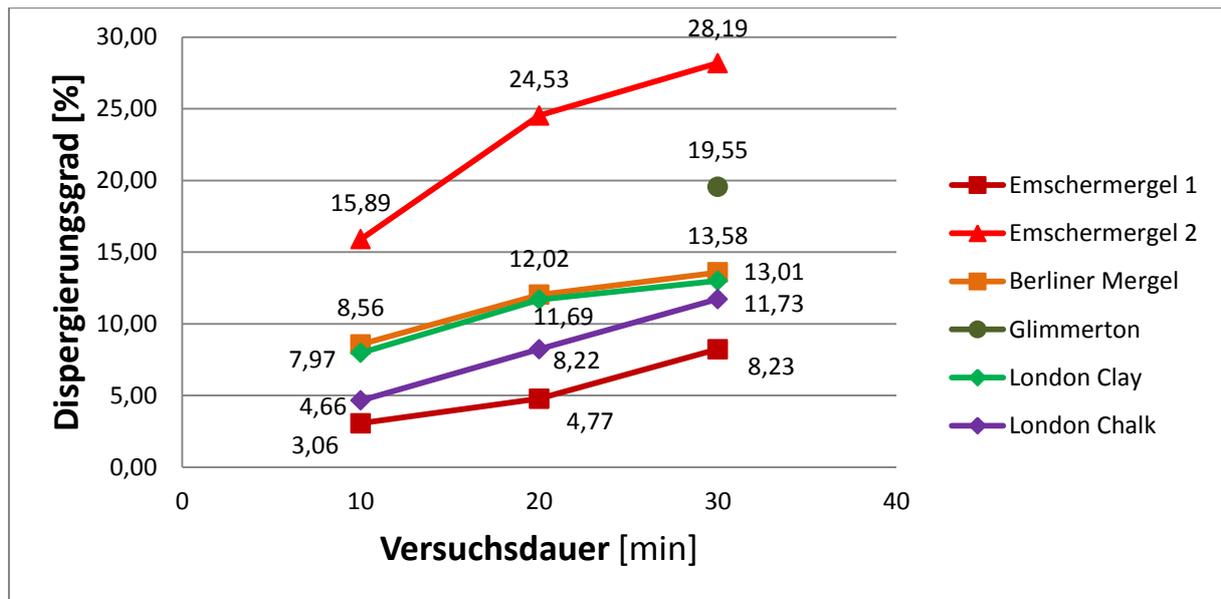


Abbildung 62: Mittelwerte Dispergierungsgrade

Die niedrigsten Dispergierungsgrade wurden beim Emschermergel 1 festgestellt, die höchsten beim Emschermergel 2. Bei allen Böden bzw. Gesteinen ist erkennbar, dass die Dispergierungsneigung mit zunehmender Versuchsdauer steigt. Lediglich beim London Chalk scheint ein linearer Zusammenhang zu bestehen, der eine Extrapolation der Ergebnisse erlauben würde. Bei den anderen Böden bzw. Gesteinen deuten sich unterschiedliche Kurvenverläufe an. Eine Verallgemeinerung ist nicht möglich.

### 6.2.4.2 Datenanalyse – Schritt 2

In einem zweiten Schritt der Datenanalyse werden im Folgenden die Ergebnisse der in Phase 2 durchgeführten Versuche sowie deren Auswirkungen auf die Ergebnisse der Phase 1 dargestellt.

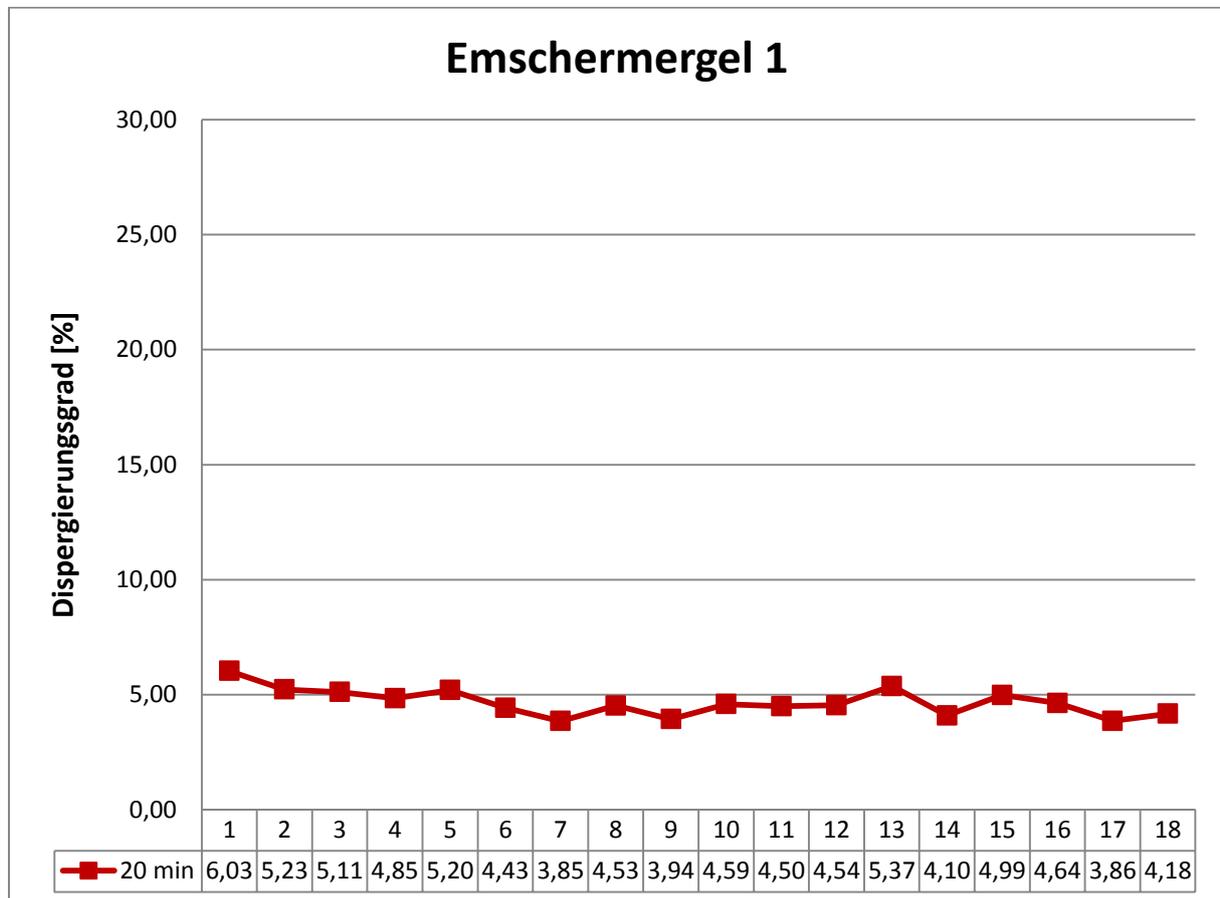


Abbildung 63: Versuchsergebnisse Phase 2 Emschermergel 1 – 20 Minuten

Die Ergebnisse der 18 zusätzlichen 20-Minuten-Versuche mit Emschermergel 1 (Abbildung 63) zeigen gerade in der vergleichenden Betrachtung mit den Ergebnissen aus der Phase 1 (Abbildung 55) eine deutliche Reduzierung der Streuung. Größere Ausreißer sind nicht zu identifizieren.

Die Ergebnisse der Versuche mit 40 und 60 Minuten Laufzeit sind in der Abbildung 64 und der Tabelle 17 als Einzelwerte sowie in der Abbildung 65 als Mittelwerte jeweils in unmittelbar vergleichender Art und Weise den Versuchen mit den kürzeren Laufzeiten gegenübergestellt.

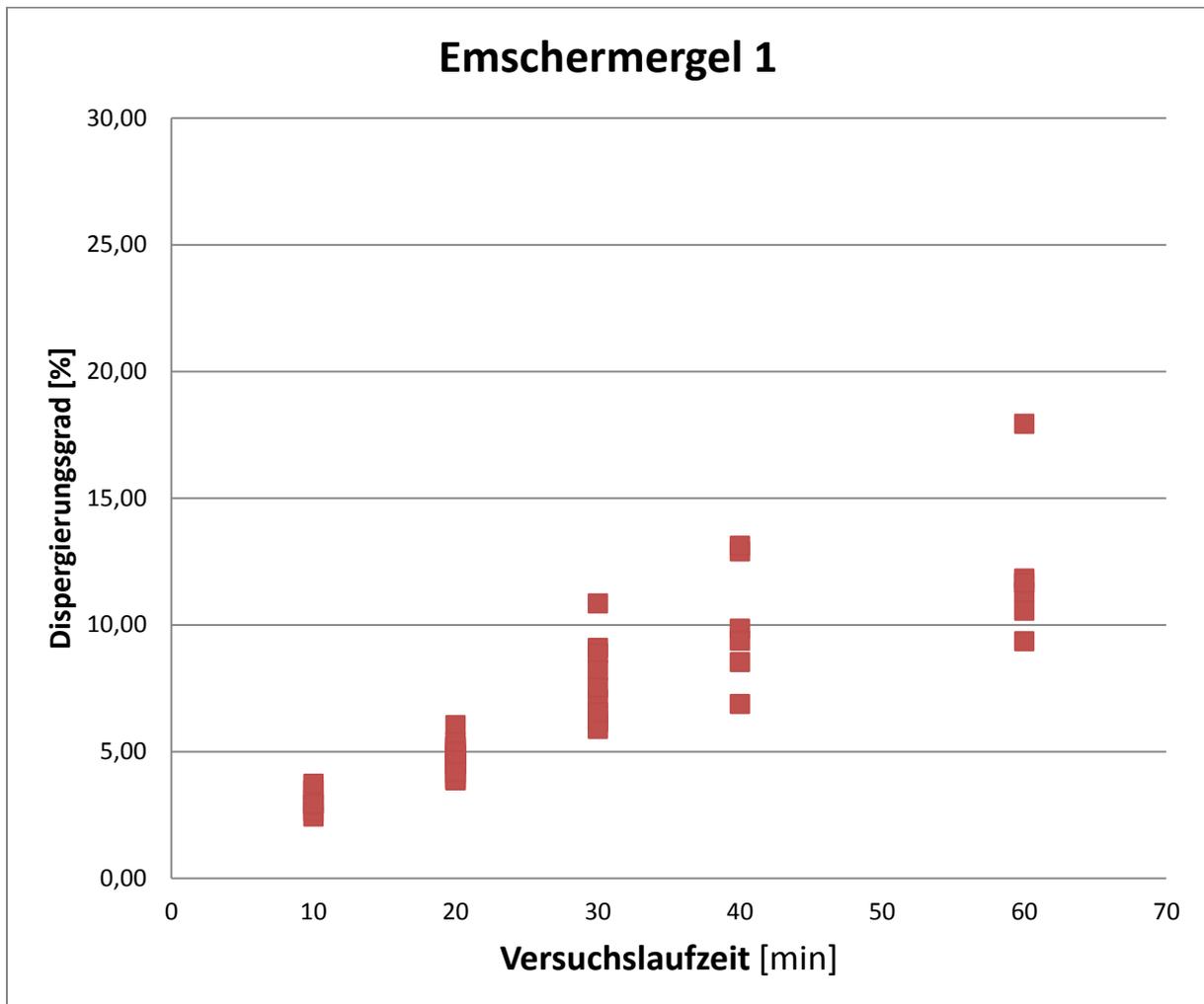


Abbildung 64: Ergebnisse Phase 2 Langzeitversuche (Einzelwerte)

Tabelle 17: Versuchsergebnisse Phase 2 – Langzeitversuche

Reguläre Dispergierungsversuche			Reguläre Dispergierungsversuche		
Einzelwerte			Einzelwerte		
Proben- nr.	Versuchs- dauer	Dispergie- rungsgrad	Proben- nr.	Versuchs- dauer	Dispergie- rungsgrad
	t	$\alpha_{disp}$		t	$\alpha_{disp}$
	[min]	[%]		[min]	[%]
EM003	10	2,43	EM013	30	6,26
EM005	10	3,47	EM014	30	6,14
EM007	10	2,63	EM026	30	9,08
EM030	10	3,06	EM027	30	10,83
EM031	10	3,72	EM029	30	8,87
EM069	10	2,92	EM032	30	8,20
EM070	10	2,91	EM065	30	7,05
EM008	20	4,56	EM066	30	7,51
EM011	20	4,87	EM073	30	5,88
EM017	20	4,90	EM074	30	6,55
EM067	20	6,03	EM037	40	6,87
EM068	20	5,23	EM038	40	9,84
EM071	20	5,11	EM047	40	12,89
EM072	20	4,85	EM048	40	13,11
EM075	20	5,20	EM059	40	8,52
EM076	20	4,43	EM060	40	9,36
EM077	20	3,85	EM035	60	11,81
EM078	20	4,53	EM036	60	10,54
EM079	20	3,94	EM039	60	11,27
EM080	20	4,59	EM040	60	11,65
EM081	20	4,50	EM057	60	17,92
EM082	20	4,54	EM058	60	9,35
EM083	20	5,37			
EM084	20	4,10			
EM085	20	4,99			
EM086	20	4,64			
EM087	20	3,86			
EM088	20	4,18			

Es wird die bisherige Beobachtung bestätigt, dass sich kein einfacher linearer Zusammenhang zwischen Dispergierungsgrad und der Versuchslaufzeit herstellen lässt.

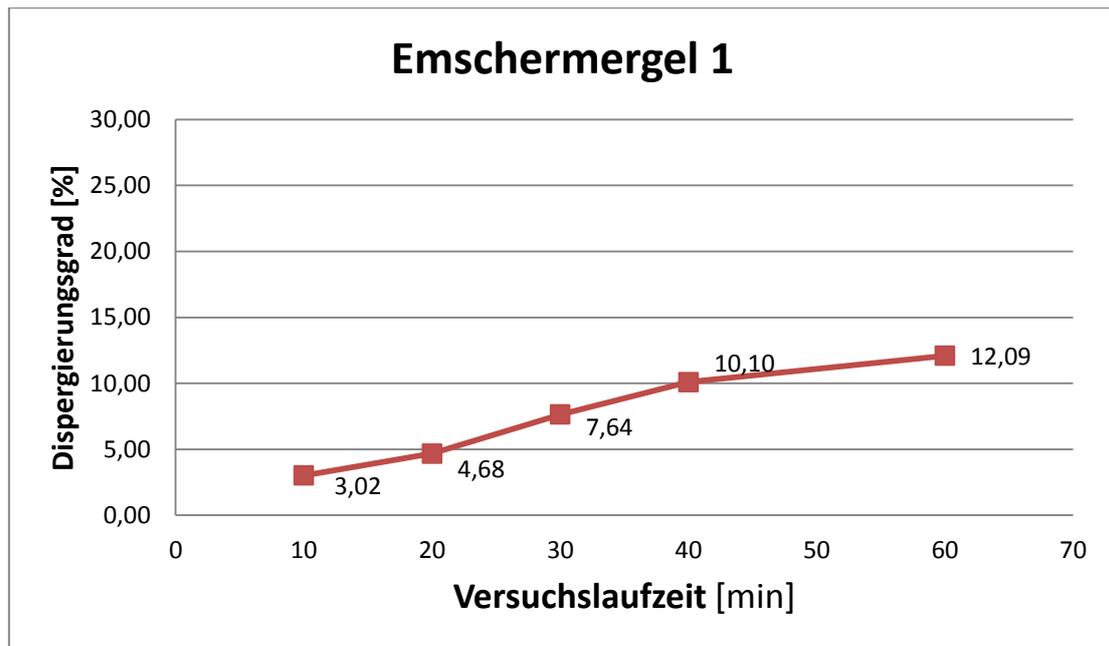


Abbildung 65: Ergebnisse Phase 2 Langzeitversuche (Mittelwerte)

Es ist allerdings zu beobachten, dass die Dispergierung mit zunehmender Versuchsdauer weniger stark zu steigen scheint.

In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die Ergebnisse der Versuche mit destilliertem Wasser im Vergleich zu den Ergebnissen mit Leitungswasser dargestellt.

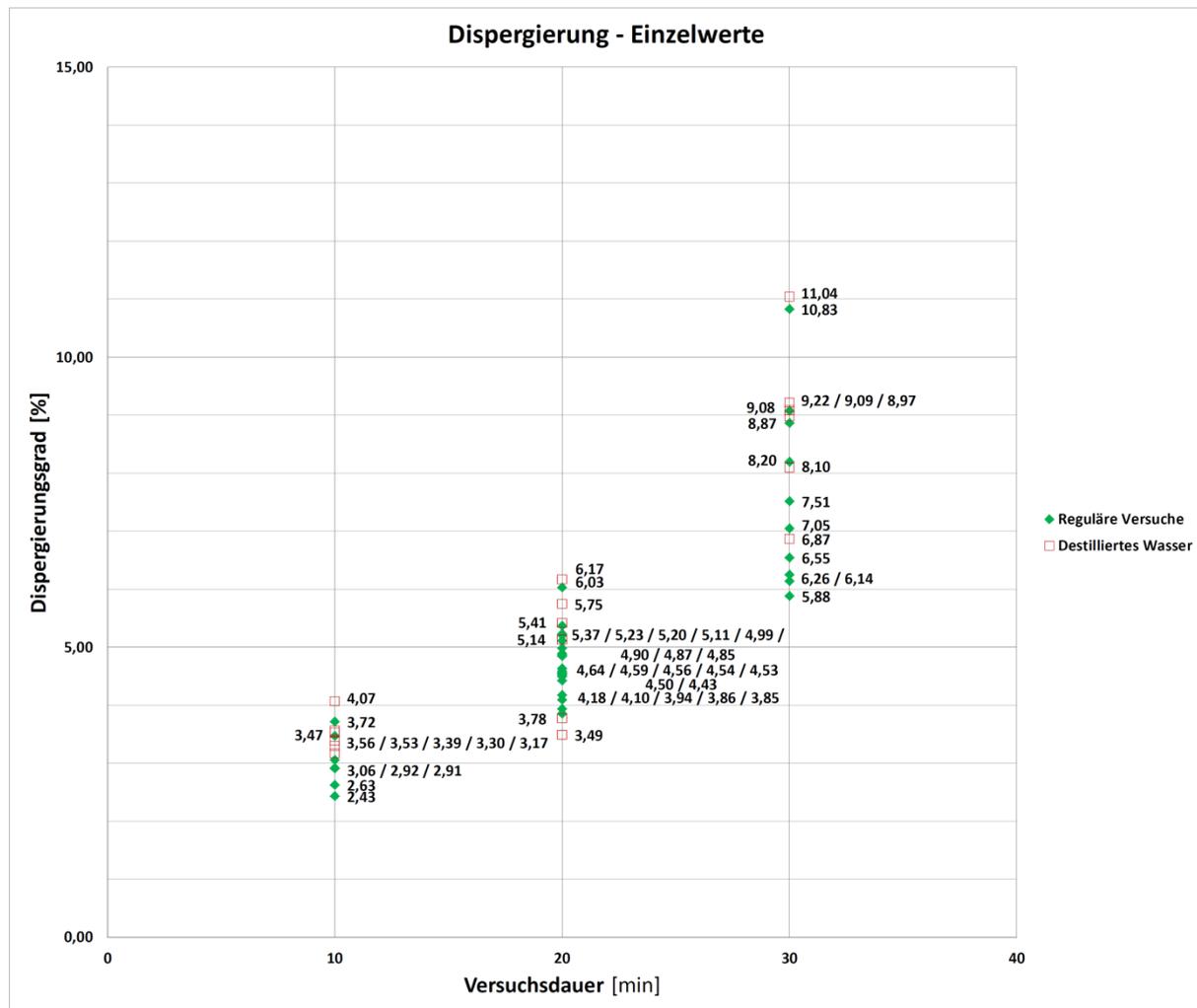


Abbildung 66: Versuchsergebnisse Phase 2 - destilliertes Wasser (Einzelwerte)

Insbesondere bei Betrachtung der Mittelwerte wird deutlich, dass die Werte relativ nah beieinander liegen. Die festgestellte Dispergierung liegt bei der Verwendung von destilliertem Wasser etwas über der Dispergierung bei Verwendung von Leitungswasser. Da sich aber die Einzelwerte mitunter sogar überlagern, lässt sich kein Rückschluss auf eventuelle systematische Einflüsse durch die Verwendung von Leitungswasser ziehen.

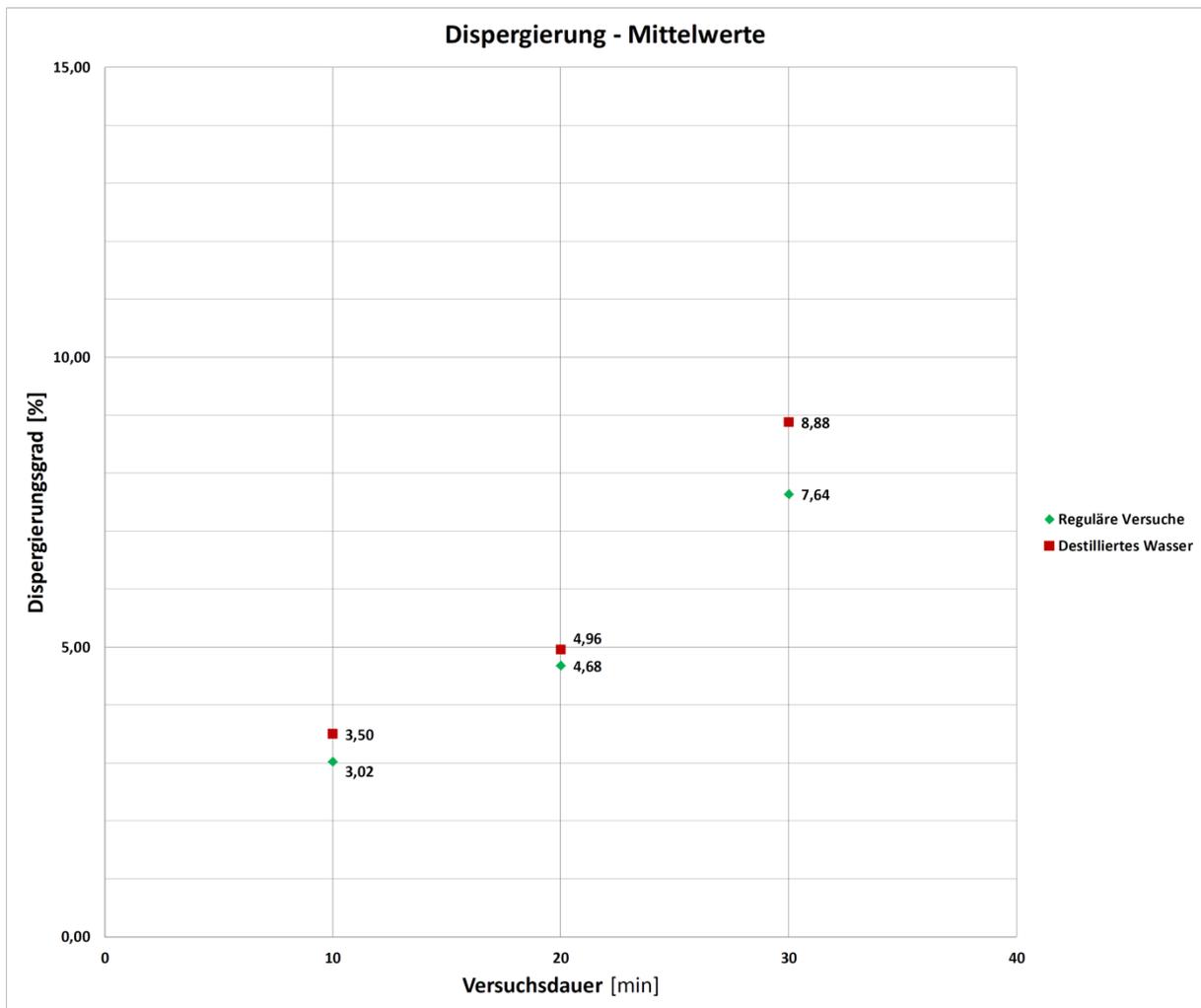


Abbildung 67: Versuchsergebnisse Phase 2 - destilliertes Wasser (Mittelwerte)

Die Ergebnisse der Versuche mit Zugabe von Stahlwürfeln (Einzelwerte siehe Abbildung 68 und zur besseren Lesbarkeit zusätzlich in Tabelle 18, Mittelwerte siehe Abbildung 69) erscheinen auf den ersten Blick unplausibel. Im Vergleich zu den ohne Stahlwürfel durchgeführten Versuchen wird deutlich, dass die Zugabe der Stahlwürfel offensichtlich nicht wie erwartet zu einer Erhöhung der mechanischen Einwirkung und damit zu einer Erhöhung der Dispergierung geführt hat. Das Gegenteil ist zu konstatieren, die Versuche ohne Stahlwürfel weisen bei allen Versuchsdauern die höheren Dispergierungsgrade auf.

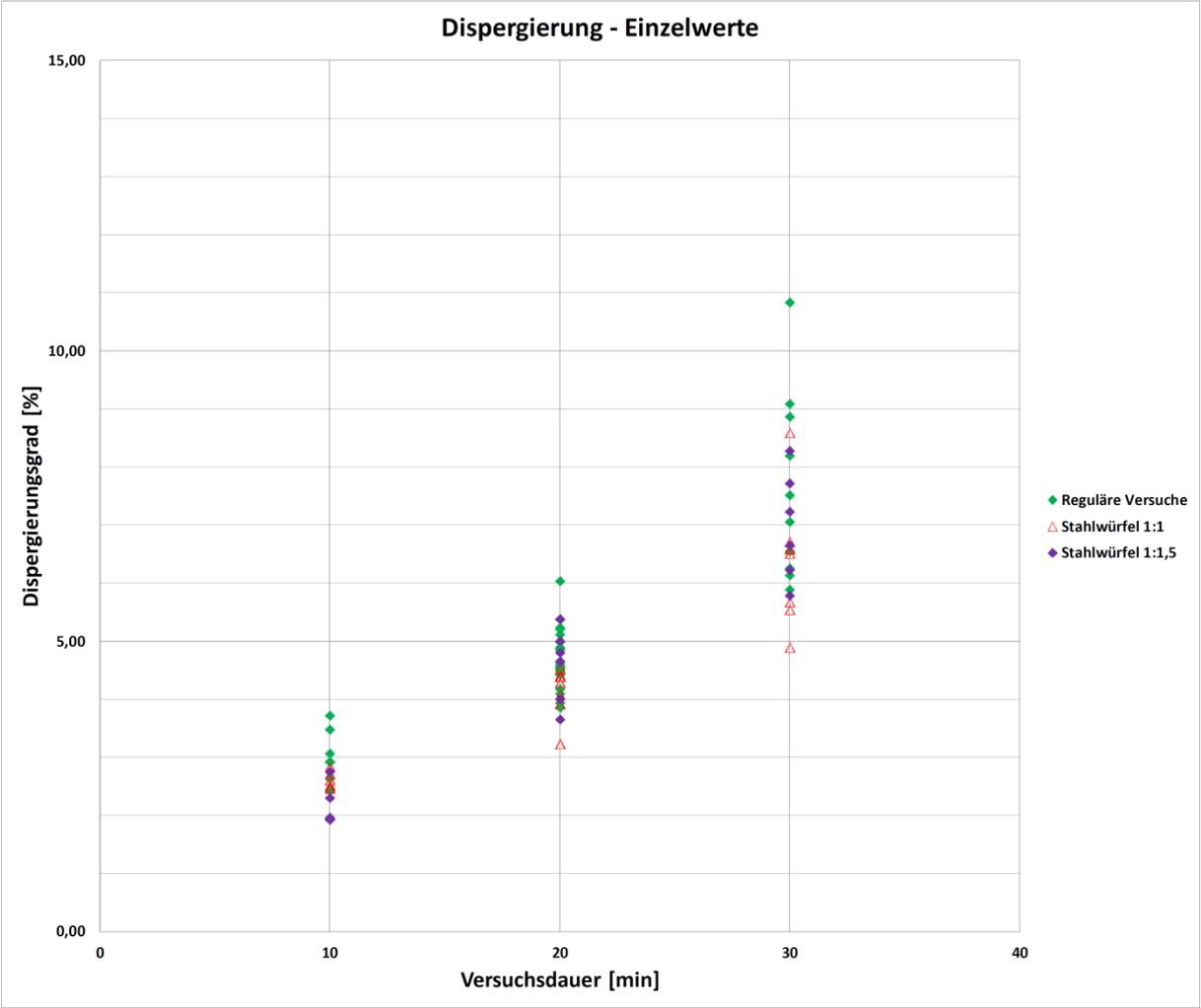


Abbildung 68: Versuchsergebnisse Phase 2 - Stahlwürfel (Einzelwerte)

Tabelle 18: Versuchsergebnisse Phase 2 – Stahlwürfel

Reguläre Dispergierungsversuche			Dispergierungsversuche mit Stahlwürfeln			
Einzelwerte			Einzelwerte			
Proben-nr.	Versuchsdauer	Dispergierungsgrad	Proben-nr.	Versuchsdauer	Dispergierungsgrad	Anzahl Stahlwürfel
	t	$\alpha_{disp}$		t	$\alpha_{disp}$	
	[min]	[%]		[min]	[%]	
EM003	10	2,43	EM - S007	10	2,47	1:1
EM005	10	3,47	EM - S008	10	2,51	1:1
EM007	10	2,63	EM - S011	10	2,48	1:1
EM030	10	3,06	EM - S012	10	2,84	1:1
EM031	10	3,72	EM - S017	10	2,61	1:1
EM069	10	2,92	EM - S018	10	2,71	1:1
EM070	10	2,91	EM - S003	20	4,29	1:1
EM008	20	4,56	EM - S004	20	3,23	1:1
EM011	20	4,87	EM - S009	20	3,92	1:1
EM017	20	4,90	EM - S010	20	4,39	1:1
EM067	20	6,03	EM - S015	20	4,42	1:1
EM068	20	5,23	EM - S016	20	4,07	1:1
EM071	20	5,11	EM - S021	20	4,52	1:1
EM072	20	4,85	EM - S021	20	4,52	1:1
EM075	20	5,20	EM - S022	20	4,39	1:1
EM076	20	4,43	EM - S001	30	8,59	1:1
EM077	20	3,85	EM - S002	30	6,60	1:1
EM078	20	4,53	EM - S005	30	6,58	1:1
EM079	20	3,94	EM - S006	30	4,89	1:1
EM080	20	4,59	EM - S013	30	5,68	1:1
EM081	20	4,50	EM - S014	30	5,55	1:1
EM082	20	4,54	EM - S019	30	6,51	1:1
EM083	20	5,37	EM - S020	30	6,72	1:1
EM084	20	4,10	EM - S027	10	2,30	1:1,5
EM085	20	4,99	EM - S028	10	2,75	1:1,5
EM086	20	4,64	EM - S037	10	1,96	1:1,5
EM087	20	3,86	EM - S038	10	1,95	1:1,5
EM088	20	4,18	EM - S039	10	1,93	1:1,5
EM013	30	6,26	EM - S040	10	1,94	1:1,5
EM014	30	6,14	EM - S025	20	4,00	1:1,5
EM026	30	9,08	EM - S026	20	4,80	1:1,5
EM027	30	10,83	EM - S029	20	5,01	1:1,5
EM029	30	8,87	EM - S030	20	5,38	1:1,5
EM032	30	8,20	EM - S035	20	3,66	1:1,5
EM065	30	7,05	EM - S036	20	4,65	1:1,5
EM066	30	7,51	EM - S023	30	7,72	1:1,5
EM073	30	5,88	EM - S024	30	7,23	1:1,5
EM074	30	6,55	EM - S031	30	6,65	1:1,5
			EM - S032	30	8,27	1:1,5
			EM - S033	30	5,78	1:1,5
			EM - S034	30	6,23	1:1,5

Zusätzlich ist bei Betrachtung der Einzelwerte festzuhalten, dass insbesondere bei einer Laufzeit von 30 Minuten eine große Streuung zu beobachten ist. Ebenfalls erscheint es auf den ersten Blick unplausibel zu sein, dass die Mittelwerte der Dispergierung bei der größten Stahlwürfelzugabe bei den 20- und 30-Minuten-Versuchen am niedrigsten ausfallen. Insbesondere die letztgenannte Beobachtung führt zu der Schlussfolgerung, dass durch die Zugabe von Stahlwürfeln und der damit verbundenen stärkeren Füllung der Trommel zu einem ruhigeren Verlauf des Versuches und eben nicht zu einer erhöhten mechanischen Einwirkung kommt.

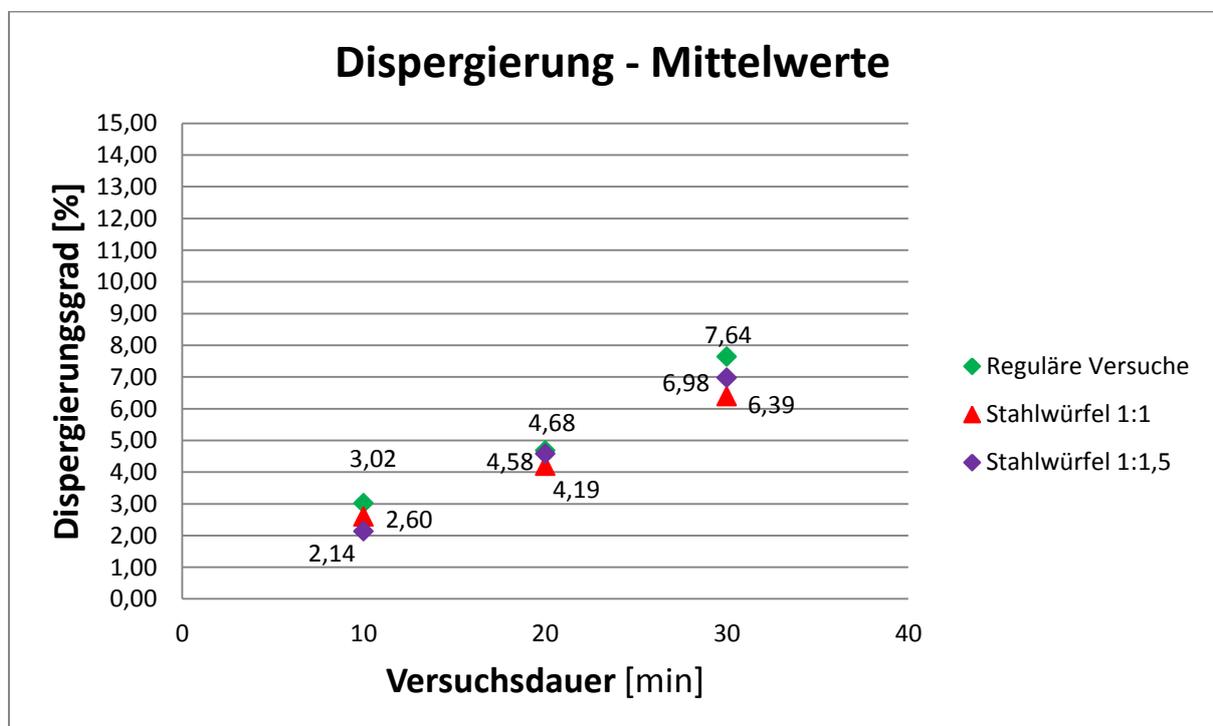


Abbildung 69: Versuchsergebnisse Phase 2 - Stahlwürfel (Mittelwerte)

Die Ergebnisse der 20 mit einem Kunstboden (Modellierton) durchgeführten Versuche (Abbildung 70) weisen zwar relativ geringe, allerdings doch deutlich größere Streuungen als die unter gleichen Bedingungen durchgeführten Versuche mit Emschermergel 1 (vgl. Abbildung 63) auf. Daher kann die Annahme, mit diesen Versuchen systematische Fehler bzw. den „Humanfaktor“ des Labormitarbeiters detektieren zu können, nicht bestätigt werden. Da auch Modellierton aus natürlichen Bestandteilen besteht, kann vor dem Hintergrund der Ergebnisse wohl auch bei dem Kunstboden von einem gewissen natürlichen Einfluss ausgegangen werden.

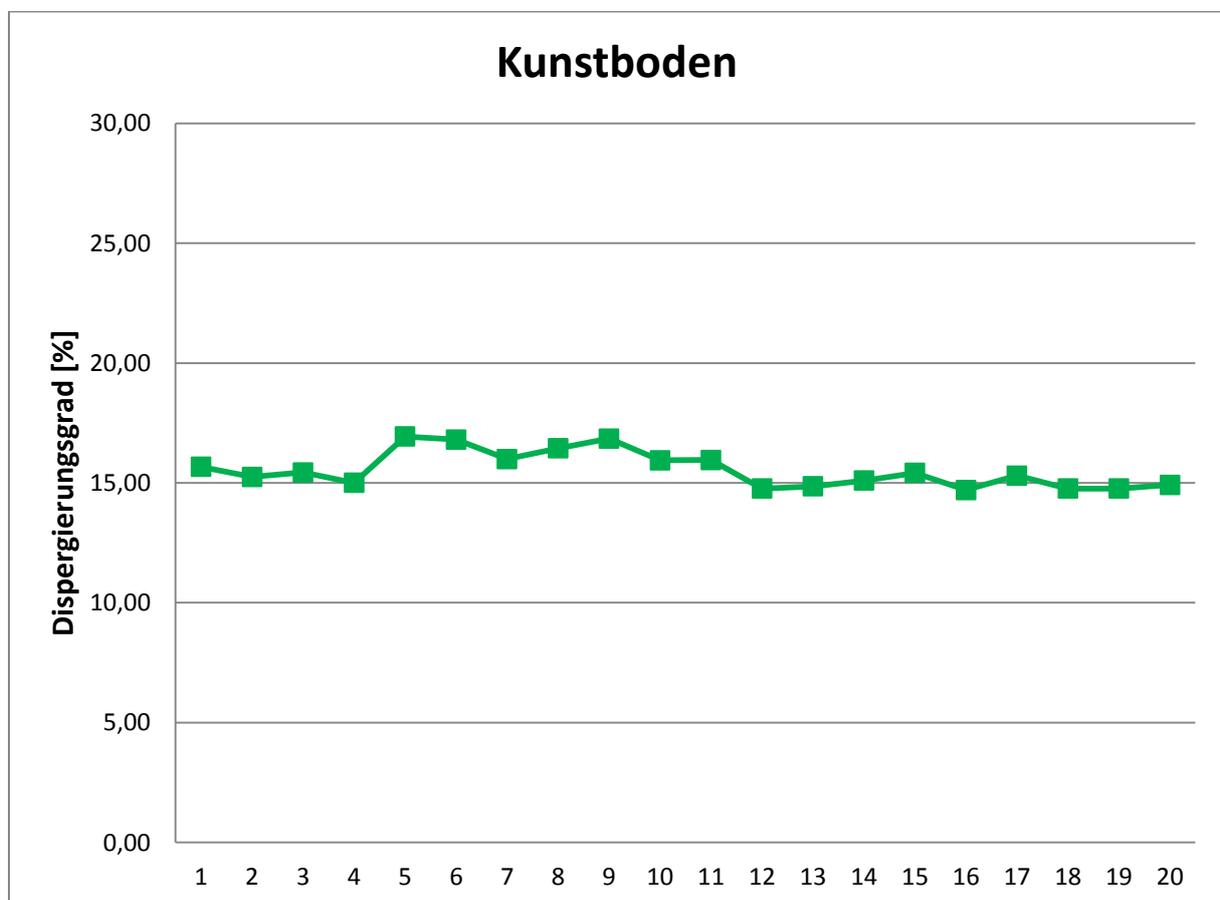


Abbildung 70: Versuchsergebnisse Phase 2 - Kunstboden

### **6.2.4.3 Datenanalyse – Schritt 3**

Um eine größtmögliche Belastbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen, erfolgt in einem dritten Schritt eine erweiterte statistische Auseinandersetzung mit den Daten. Die sich anschließenden Ausführungen basieren hauptsächlich auf einer unter Anleitung des Autors entstandenen Bachelorarbeit [41]. Jodehl identifiziert in dieser Arbeit die Darstellung der Ergebnisse in sogenannten Box-Plot-Diagrammen als am besten geeignet. Dies wird im Wesentlichen damit begründet, dass bei dieser Art der Darstellung sowohl der Median als auch die Streuung des jeweiligen Datensatzes beinhaltet ist. Außerdem gilt der Median gerade bei einer eher geringen Anzahl an Daten als robuster und aussagekräftiger als z.B. das arithmetische Mittel. Aufgrund der geringen Anzahl mit Glimmerton durchgeführter Versuche werden die mit diesem Boden erzielten Ergebnisse nicht weiter betrachtet.

#### Emschermergel 1

Insgesamt wurden mit dem Versuchsboden Emschermergel 1 41 Versuche durchgeführt – 8 mit einer Versuchslaufzeit von 10 Minuten, 23 mit einer Versuchslaufzeit von 20 Minuten und 10 mit einer Laufzeit von 30 Minuten. Die Aufbereitung der Ergebnisse dieser Versuche in Form eines Box-Plot-Diagramms ist der Abbildung 71 zu entnehmen. Der Median der 10min-Versuche berechnet sich zu  $\alpha_{\text{disp}} = 3,0\%$  im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert aus der ersten Versuchsreihe von  $\alpha_{\text{disp}} = 3,06\%$  (siehe Abbildung 62). Der Median der 20min-Versuche beläuft sich auf  $\alpha_{\text{disp}} = 4,6\%$  im Vergleich zum arithmetischen Mittel der ersten Versuchsreihe von  $\alpha_{\text{disp}} = 4,77\%$ . Bei den 30min-Versuchen ergibt sich ein Median von  $\alpha_{\text{disp}} = 7,3\%$  bei einem arithmetischen Mittel der ersten Versuchsreihe von  $\alpha_{\text{disp}} = 8,23\%$ .

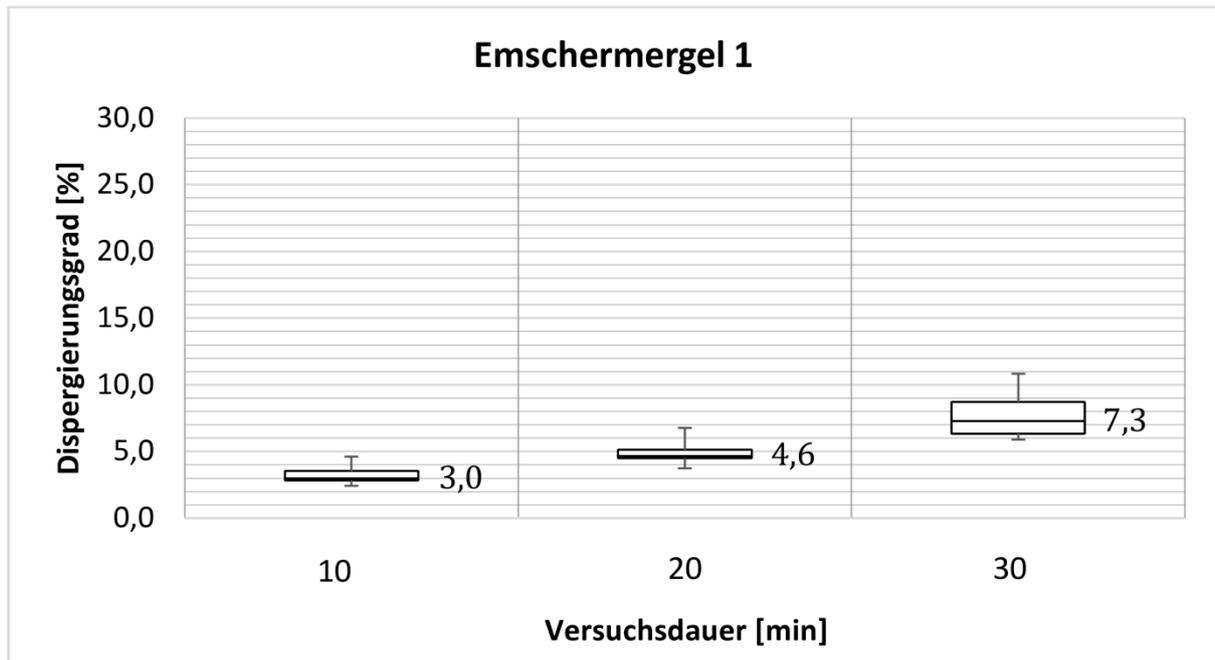


Abbildung 71: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Emschermergel 1

Sind die Unterschiede zwischen dem Median und den Mittelwerten bei den 10min- und 20min-Versuchen noch vernachlässigbar klein, so ist die Differenz bei den 30min-Versuchen schon signifikant. Dies spiegelt sich auch in der Ausdehnung des Bereiches zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil wider. Finden sich die Ergebnisse bei den 10min- und 20min-Versuchen innerhalb einer Ausdehnung von  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 1\%$ , so beläuft sich die Größenordnung bei den 30min-Versuchen auf  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 2,4\%$ , also mehr als das Doppelte. Das Gleiche gilt für die ebenfalls in dem Diagramm dargestellte Streuung, also die Differenz zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert. Diese beläuft sich bei den 10min-Versuchen auf etwa  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 2\%$ , bei den 20min-Versuchen auf ca.  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3\%$  und steigt bei den 30min-Versuchen auf ca.  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 5\%$ .

Die Schlussfolgerung dieser Beobachtungen ist, dass sich die Versuchsergebnisse der 10min- und 20min-Versuche als belastbar einstufen lassen, wohingegen die Ergebnisse der 30min-Versuche mit einer größeren Unsicherheit behaftet zu sein scheinen.

### Emschermergel 2

Mit Emschermergel 2 wurden die in Tabelle 15 aufgeführten 18 Versuche in Phase 1 durchgeführt, also jeweils 6 Versuche je Versuchslaufzeit. Das mit den Ergebnissen dieser Versuche erzeugte Box-Plot-Diagramm ist in Abbildung 72 zu finden.

Die Mediane betragen  $\alpha_{\text{disp}} = 15,7\%$  bei einer Versuchsdauer von 10 Minuten,  $\alpha_{\text{disp}} = 24,2\%$  bei einer Dauer von 20 Minuten und  $\alpha_{\text{disp}} = 28,6\%$  bei einer Laufzeit von 30 Minuten. Die Mittelwerte (Abbildung 62) belaufen sich auf  $\alpha_{\text{disp}} = 15,89\%$  (10min),  $\alpha_{\text{disp}} = 24,53\%$  (20min) und  $\alpha_{\text{disp}} = 28,19\%$  (30min).

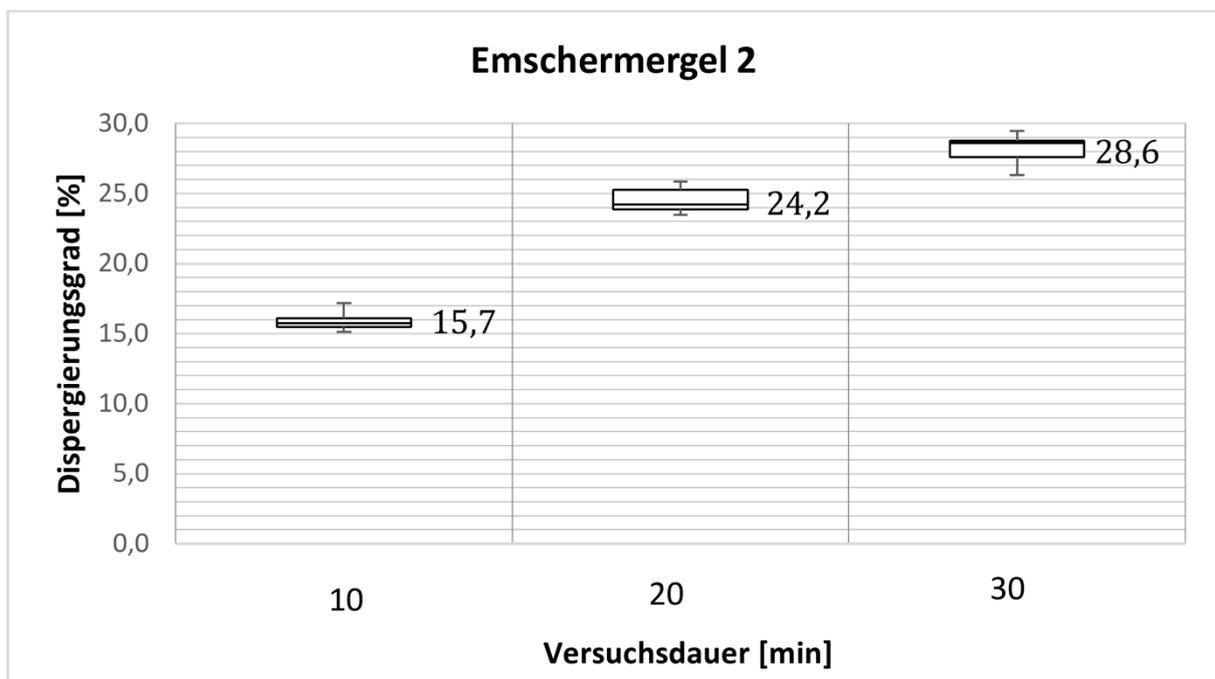


Abbildung 72: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Emschermergel 2

Die Abweichungen zwischen Median und Mittelwert sind als eher gering einzustufen. Dies gilt ebenfalls für die Differenzen zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil. Diese belaufen sich auf  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,6\%$  (10min),  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 1,4\%$  (20min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 1,2\%$  (30min). Auch die Streuung befindet sich bei allen drei Versuchsdauern mit Werten zwischen  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 2\%$  und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3\%$  in einem eher engen Rahmen.

Die Ergebnisse aus den Versuchen mit Emschermergel 2 können also vollumfänglich als belastbar angesehen werden.

### Berliner Mergel

Mit dem Berliner Mergel wurden die in Tabelle 15 aufgeführten 18 Versuche in Phase 1 durchgeführt, also wie beim Emschermergel 2 jeweils 6 Versuche je Versuchslaufzeit. Das aus den Ergebnissen resultierende Box-Plot-Diagramm ist in Abbildung 73 dargestellt.

Die Mediane betragen  $\alpha_{\text{disp}} = 8,8\%$  bei einer Versuchsdauer von 10 Minuten,  $\alpha_{\text{disp}} = 11,6\%$  bei einer Dauer von 20 Minuten und  $\alpha_{\text{disp}} = 14,3\%$  bei einer Laufzeit von 30 Minuten. Die Mittelwerte (Abbildung 62) belaufen sich auf  $\alpha_{\text{disp}} = 8,56\%$  (10min),  $\alpha_{\text{disp}} = 12,02\%$  (20min) und  $\alpha_{\text{disp}} = 13,58\%$  (30min).

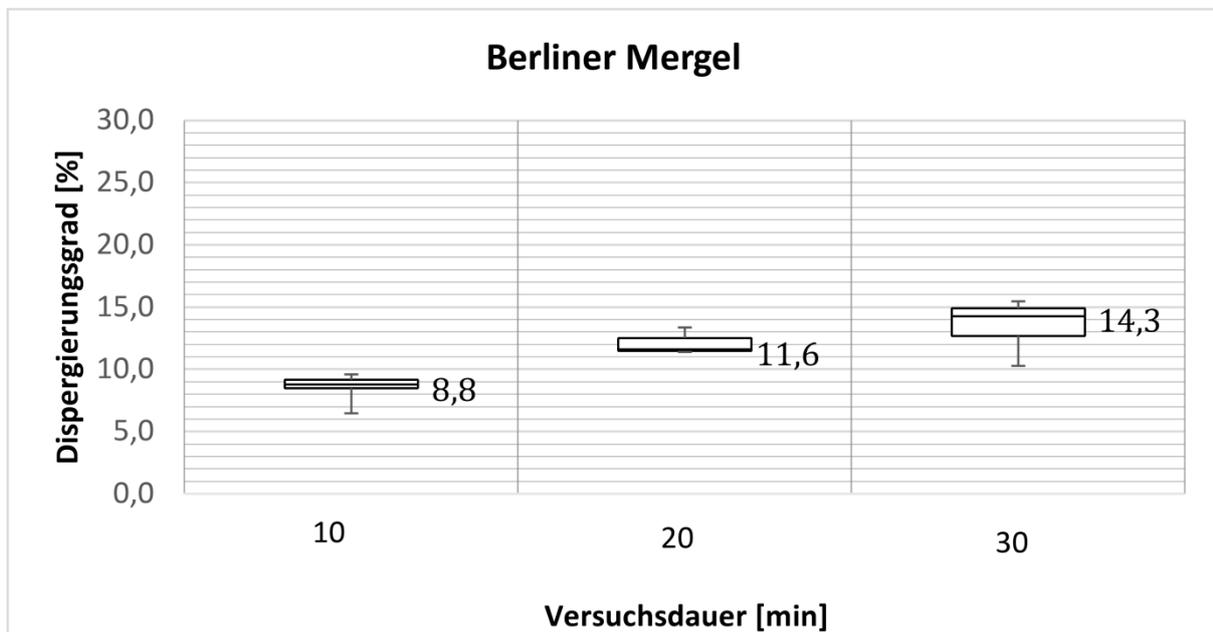


Abbildung 73: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse Berliner Mergel

Die Differenzen zwischen den Medianen und den Mittelwerten sind bei den 10min- und 20min-Versuchen noch verhältnismäßig gering, bei den 30min-Versuchen mit  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,72\%$  allerdings schon nicht mehr zu vernachlässigen.

Die Spannweiten zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil betragen  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,7\%$  (10min),  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 1,0\%$  (20min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 2,2\%$  (30min). Die Streuungen belaufen sich auf  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3,1\%$  (10min),  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 2,0\%$  (20min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 5,1\%$  (30min).

Die Belastbarkeit der Versuchsergebnisse ist also grundsätzlich gegeben, mit leichten Unsicherheiten insbesondere bei den 30min-Versuchen.

London Clay

Mit London Clay wurden insgesamt 6 Versuche durchgeführt (vgl. Tabelle 15). 3 Versuche sind mit einer Versuchsdauer von 10 Minuten, 2 mit einer Versuchsdauer von 20 Minuten und 1 Versuch mit einer Versuchsdauer von 30 Minuten gefahren worden. Das trotz dieser geringen Anzahl an Ergebnissen erstellte Box-Plot-Diagramm ist in Abbildung 74 zu finden.

Die Mediane betragen  $\alpha_{\text{disp}} = 8,2\%$  bei einer Versuchsdauer von 10 Minuten,  $\alpha_{\text{disp}} = 11,7\%$  bei einer Dauer von 20 Minuten und  $\alpha_{\text{disp}} = 13,0\%$  bei einer Laufzeit von 30 Minuten. Die Mittelwerte (Abbildung 62) belaufen sich auf  $\alpha_{\text{disp}} = 7,97\%$  (10min),  $\alpha_{\text{disp}} = 11,69\%$  (20min) und  $\alpha_{\text{disp}} = 13,01\%$  (30min).

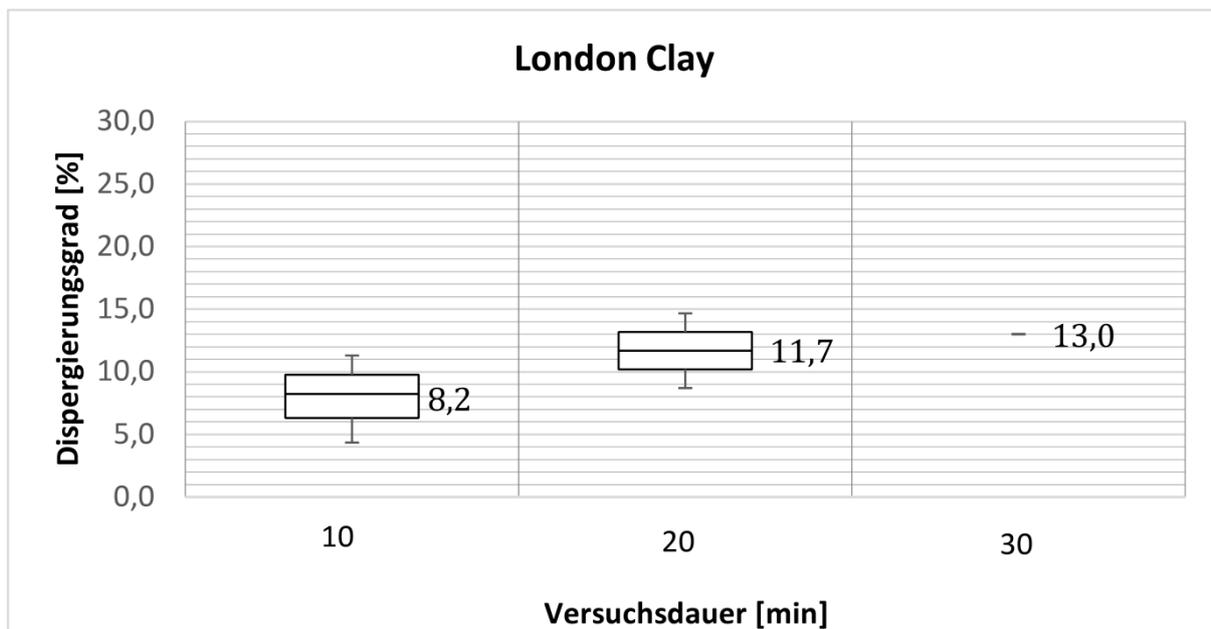


Abbildung 74: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse London Clay

Die geringe bzw. nicht existente Differenz zwischen den Medianen und den Mittelwerten ist auf die geringe Anzahl der Ergebnisse zurückzuführen und damit nicht besonders aussagekräftig.

Die Spannweiten zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil betragen  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3,5\%$  (10min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3,1\%$  (20min). Die Streuungen belaufen sich auf  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 7,0\%$  (10min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 6,0\%$  (20min). Die Ermittlung dieser Kennzahlen bezogen auf

lediglich 3 bzw. 2 Versuche ist eher theoretisch, bei nur einem Versuch mit einer Dauer von 30 Minuten ist eine derartige Analyse nicht möglich.

Daher ist die Schlussfolgerung in Bezug auf die Belastbarkeit der Ergebnisse der Versuche mit London Clay, dass aufgrund der sehr geringen Anzahl von einer relativ großen Unsicherheit auszugehen ist.

### London Chalk

Mit London Chalk wurden wie bei den Versuchsreihen mit Emschermergel 2 und Berliner Mergel 18 Versuche durchgeführt, aufgeteilt in jeweils 6 Versuche mit einer Versuchsdauer von 10, 20 und 30 Minuten (vgl. Tabelle 15). Das aus den Ergebnissen dieser Versuche generierte Box-Plot-Diagramm ist in Abbildung 75 dargestellt.

Die Mediane betragen  $\alpha_{\text{disp}} = 4,6\%$  bei einer Versuchsdauer von 10 Minuten,  $\alpha_{\text{disp}} = 8,3\%$  bei einer Dauer von 20 Minuten und  $\alpha_{\text{disp}} = 11,8\%$  bei einer Laufzeit von 30 Minuten. Die Mittelwerte (Abbildung 62) belaufen sich auf  $\alpha_{\text{disp}} = 4,66\%$  (10min),  $\alpha_{\text{disp}} = 8,22\%$  (20min) und  $\alpha_{\text{disp}} = 11,73\%$  (30min).

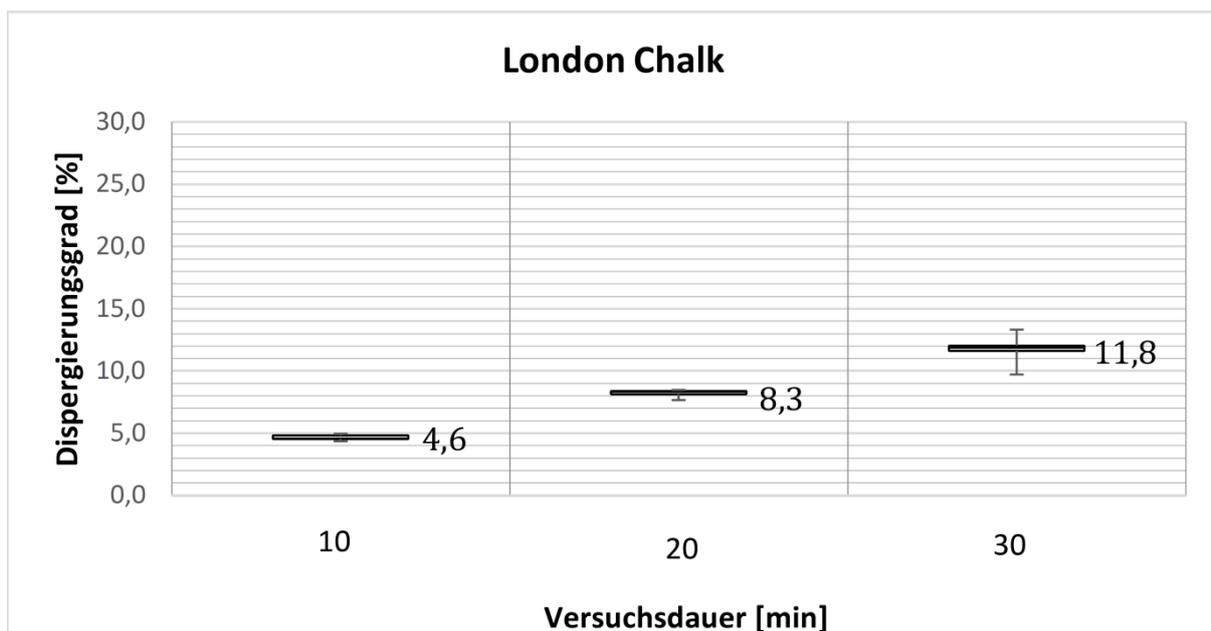


Abbildung 75: Box-Plot-Diagramm Versuchsergebnisse London Chalk

---

Die Differenzen zwischen den Medianen und den Mittelwerten sind bei allen Laufzeiten auffallend gering.

Die Spannweiten zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil liegen bei allen Laufzeiten unter  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,5\%$ . Die Streuungen belaufen sich auf  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,6\%$  (10min),  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 0,8\%$  (20min) und  $\Delta \alpha_{\text{disp}} = 3,6\%$  (30min).

Die Belastbarkeit der Versuchsergebnisse ist auf Basis dieser Kennwerte vollumfänglich gegeben.

#### 6.2.4.4 Datenanalyse – Schritt 4

In einem vierten und letzten Schritt werden die Ergebnisse der Versuche verschiedenen charakteristischen Bodenkennwerten gegenübergestellt, um potentielle Korrelationen identifizieren zu können. Bei den untersuchten Kennwerten handelt es sich um den Wassergehalt, die Feuchtdichte, die Fließgrenze, die Ausrollgrenze, die Plastizitätszahl und die Konsistenzzahl. Im Zuge einer zunächst durchgeführten univariaten Analyse hat Jodehl [41] herausgearbeitet, dass sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Dispergierungsgrad und diesen Kennwerten nachweisen lässt. Hierbei wurden zunächst die jeweiligen Korrelationskoeffizienten betrachtet (Tabelle 19).

Tabelle 19: Korrelationskoeffizienten [41]

	Korrelationskoeffizient					
	Wassergehalt	Feuchtdichte	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl
Dispergierungsgrad	0,12371	-0,2723	0,15131	-0,08384	0,19843	-0,36686

Mit den eher geringen Werten - also mit einer größeren Nähe zur 0 als zur 1 – deuten diese Korrelationskoeffizienten darauf hin, dass kein ausgeprägter, eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Dispergierungsgrad und den bodenmechanischen Kennwerten existiert.

Weiterhin wurden Streudiagramme – auch Scatterplots genannt – erstellt, beginnend mit dem Ansatz, einen eventuell vorhandenen linearen Zusammenhang aufzeigen zu können (Abbildung 76 bis Abbildung 78).

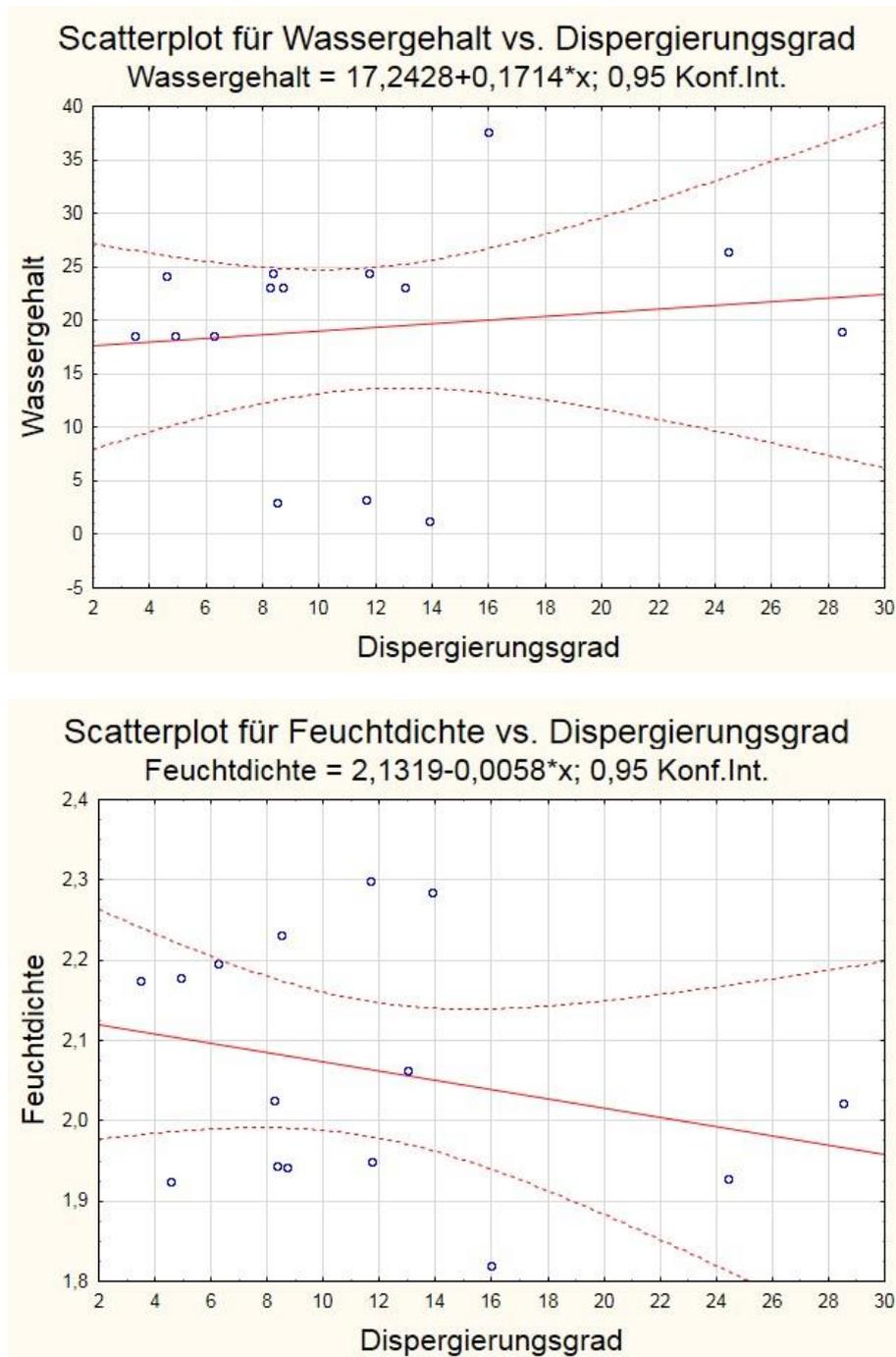


Abbildung 76: Scatterplots mit Regressionsgraden [41]

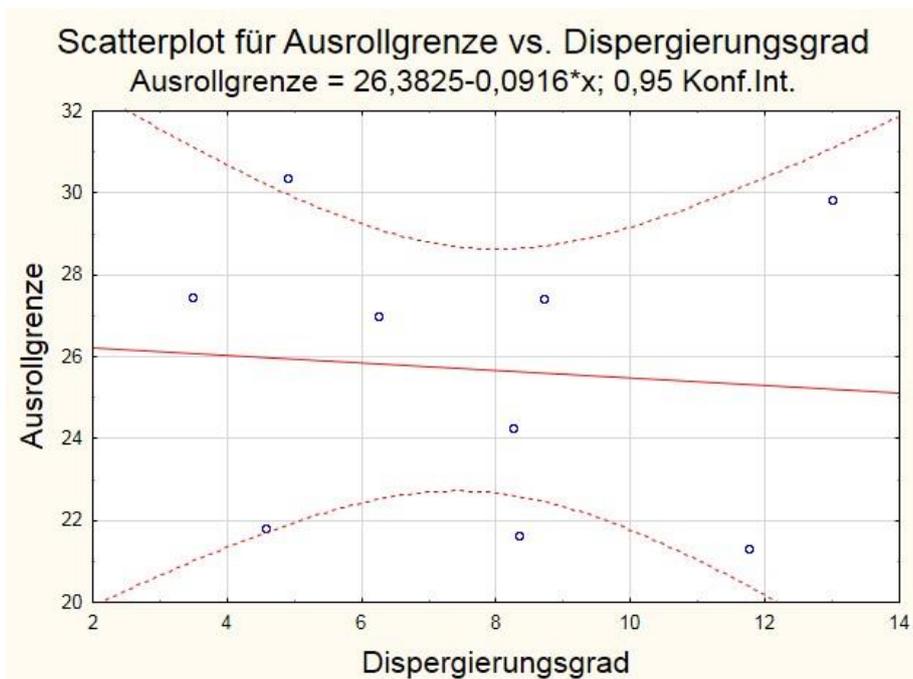
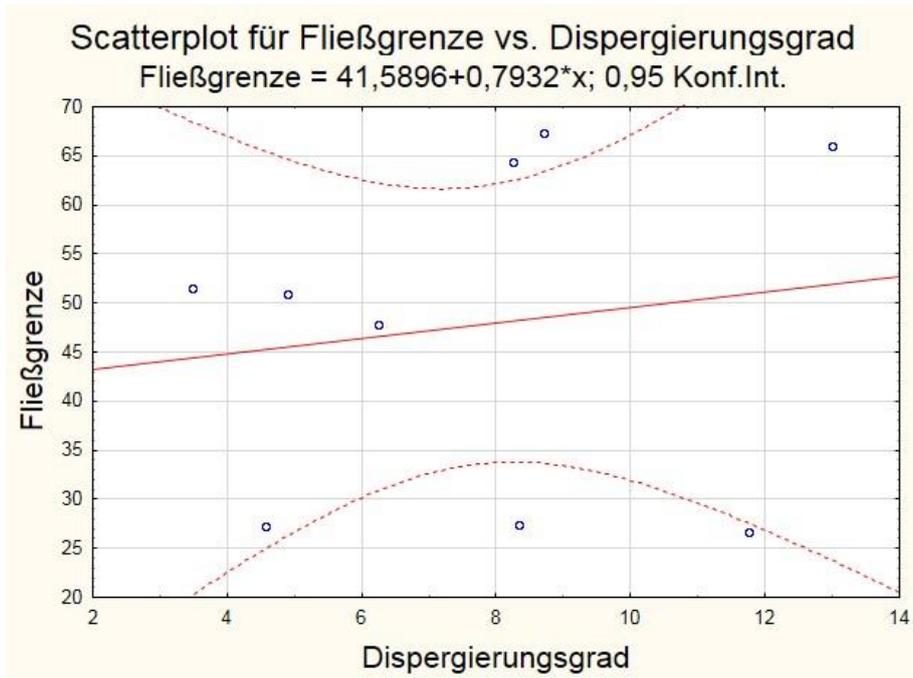


Abbildung 77: 1. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionsgraden [41]

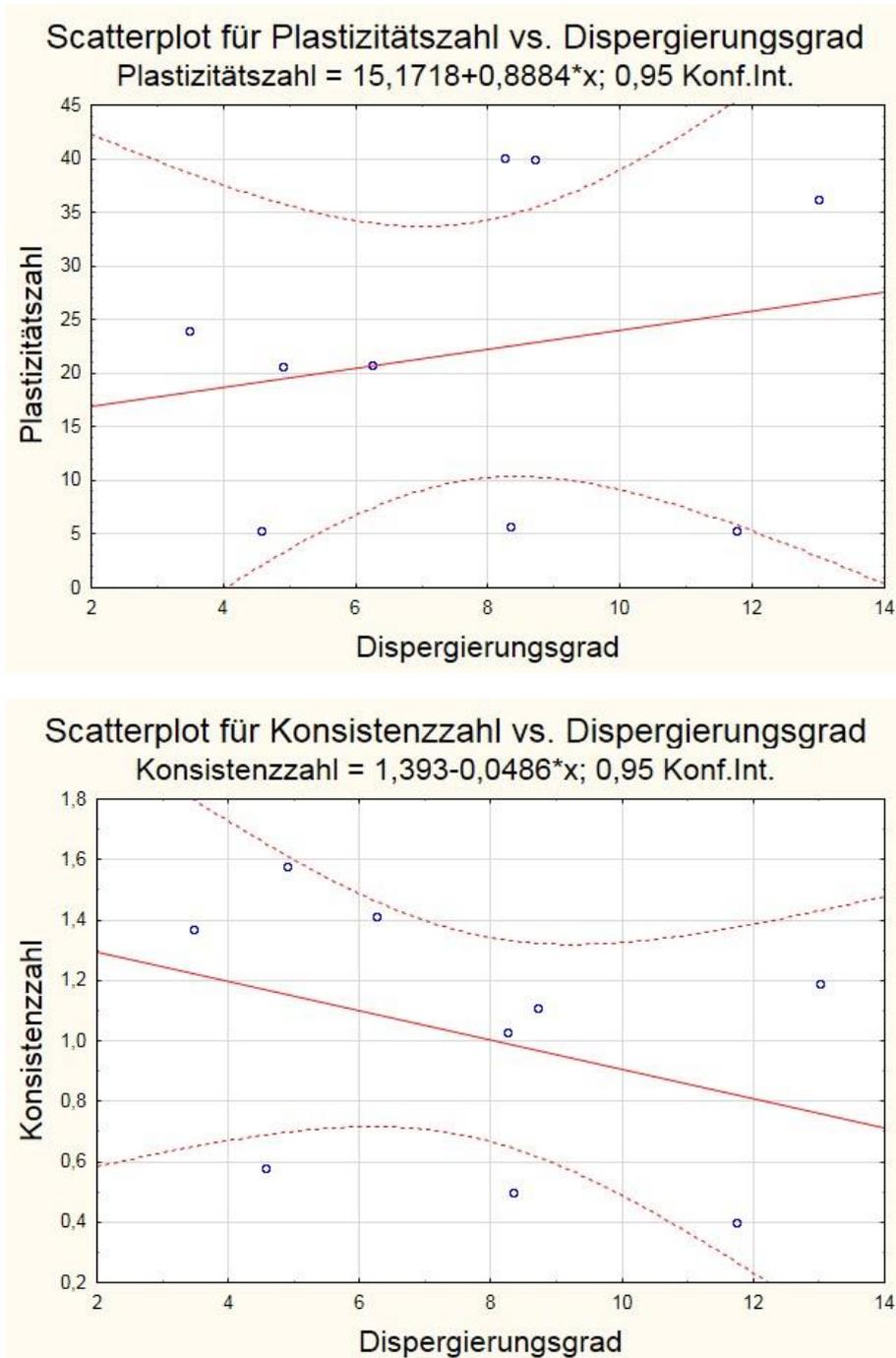


Abbildung 78: 2. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionsgraden [41]

Bei Betrachtung dieser Diagramme wird die Aussage, die sich bereits aus den ermittelten Korrelationskoeffizienten ergeben hat, unterstrichen. Es ist bei den dargestellten Abständen der Wertepaare von der Regressionsgeraden kein linearer Zusammenhang ableitbar. Diese Schlussfolgerung führt zu der Überlegung, ob sich eventuell ein nicht-linearer, also funktionaler Zusammenhang aufzeigen lässt.

Hierzu hat Jodehl die in Abbildung 79 bis Abbildung 81 dargestellten Streudiagramme mit Regressionspolynomen erstellt.

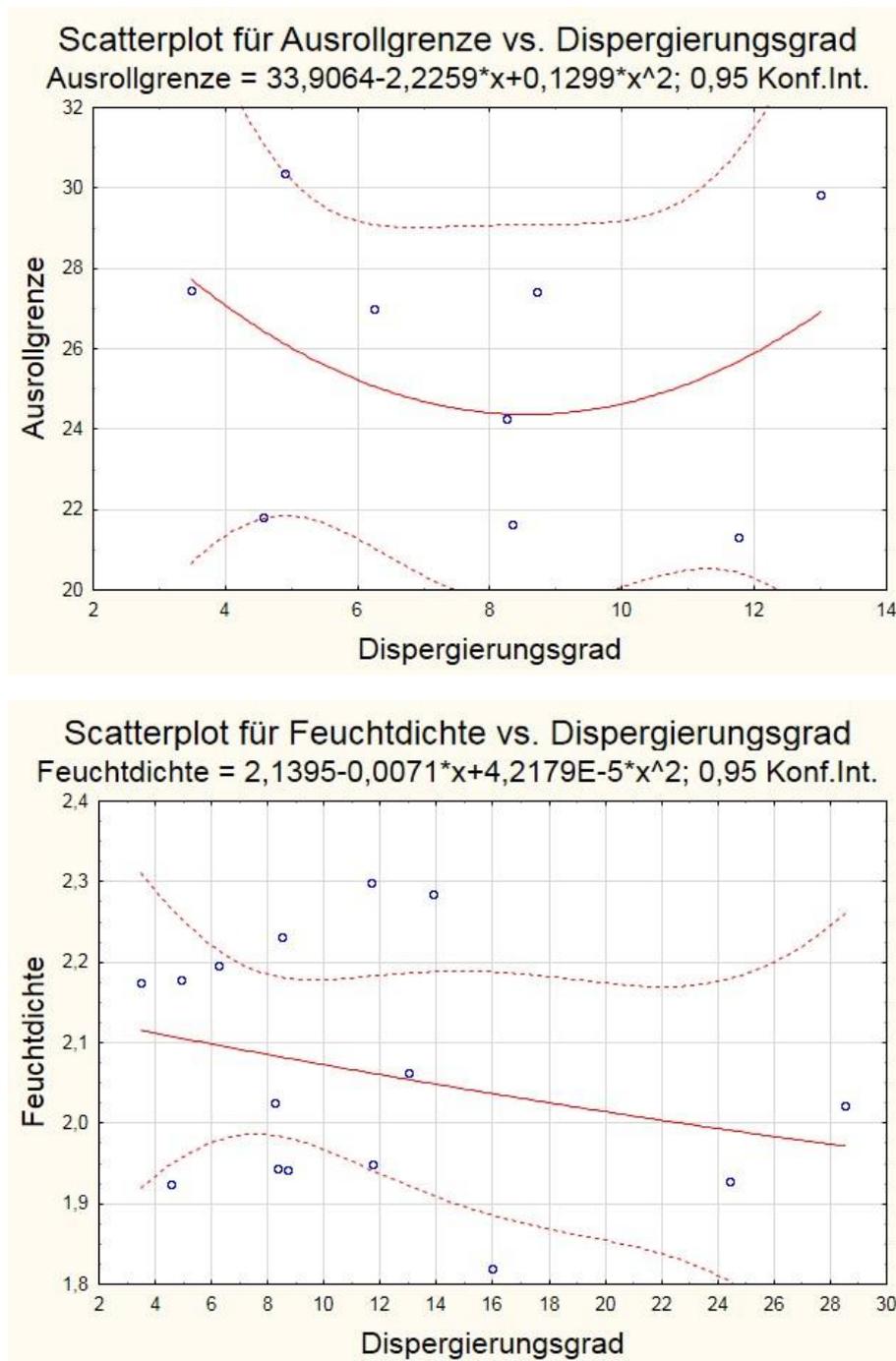


Abbildung 79: Scatterplots mit Regressionspolynom [41]

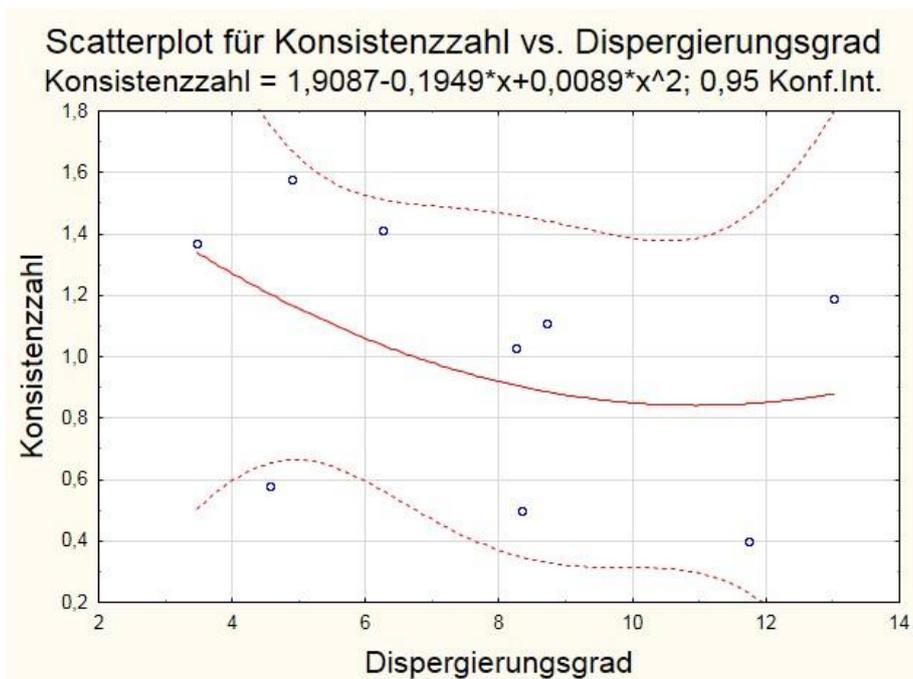
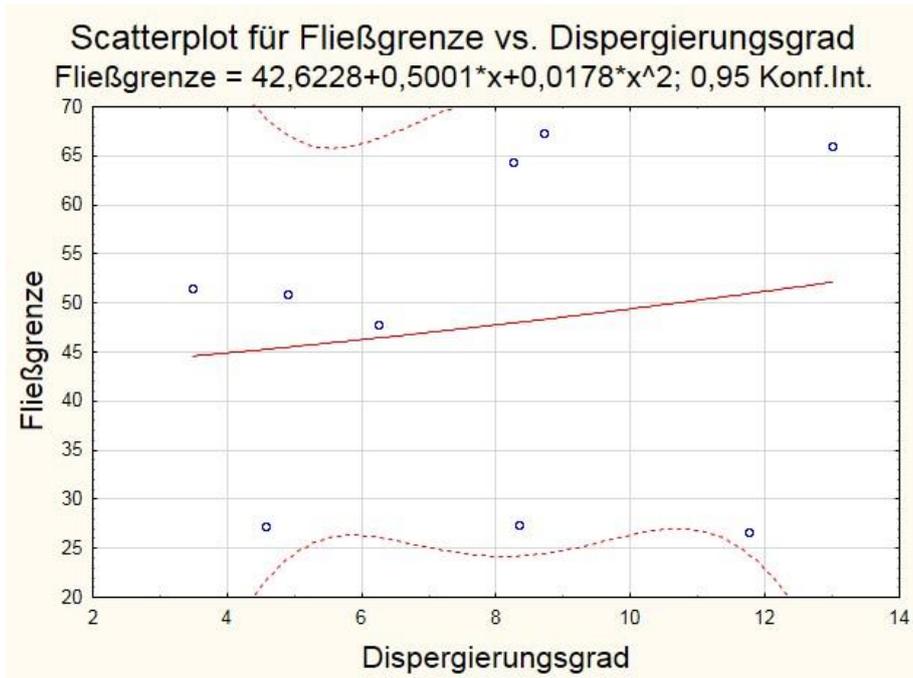


Abbildung 80: 1. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionspolynom [41]

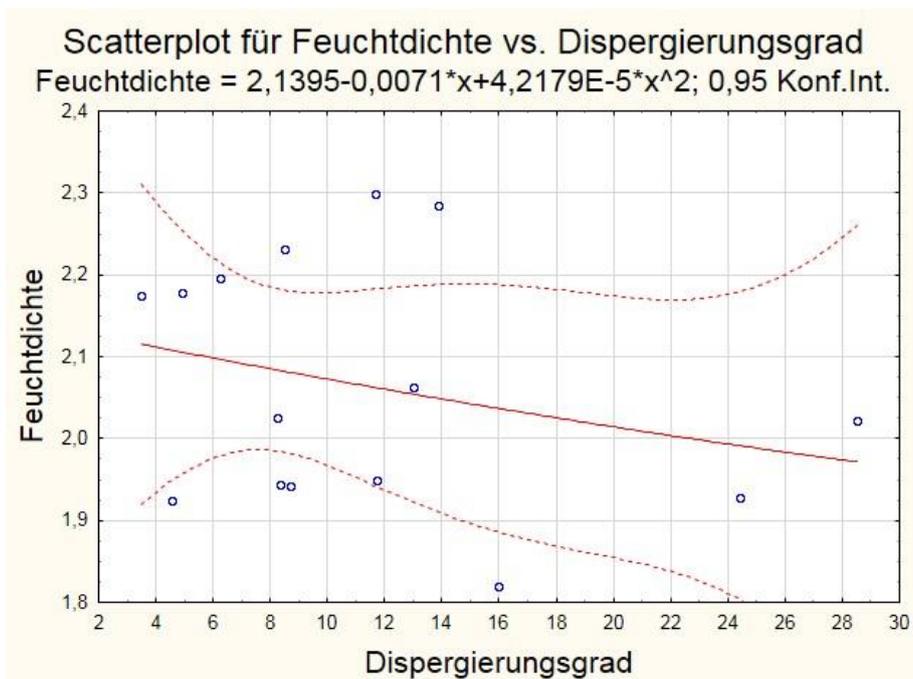
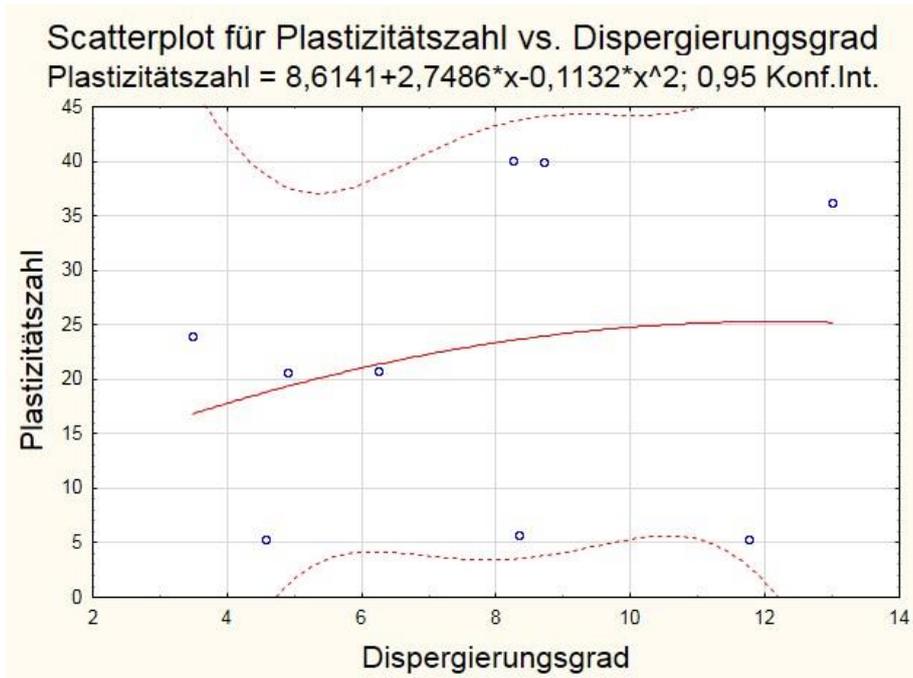


Abbildung 81: 2. Fortsetzung Scatterplots mit Regressionspolynom [41]

Auch die Betrachtung dieser Diagramme erlaubt keine Identifizierung eines eindeutigen Zusammenhangs des Dispergierungsgrades zu den charakteristischen Bodenkenwerten.

Jodehl stellt richtigerweise heraus, dass die von ihr durchgeführten Untersuchungen auf einer relativ geringen Anzahl an Wertepaaren beruhen und regt an, die Datenbasis mit weiteren Versuchsreihen zu vergrößern. Diese Anregung sollte in folgenden, weitergehenden Forschungsvorhaben aufgegriffen werden.

Außerdem kommt Jodehl zu der Schlussfolgerung, dass es eventuell auch einen Zusammenhang des Dispergierungsgrades nicht nur zu einem, sondern zu mehreren Kennwerten gleichzeitig geben könnte. Um dies zu ergründen wird eine multivariate Analyse der Variablen empfohlen. Da es auch bei der Dispergierung in ihren Grundzügen recht artverwandten Verklebung durch Thewes und Hollmann [40] nachgewiesene Abhängigkeiten sowohl von der Plastizität als auch von der Konsistenz gibt, wurde dieser Ansatz aufgegriffen. Folgt man der Logik, die sich in dem in Abbildung 82 dargestellten Diagramm widerspiegelt, würde sich für die Dispergierung die These aufstellen lassen, dass sie umso höher ist, je geringer die Plastizitätszahl und insbesondere je geringer die Konsistenzzahl ist.

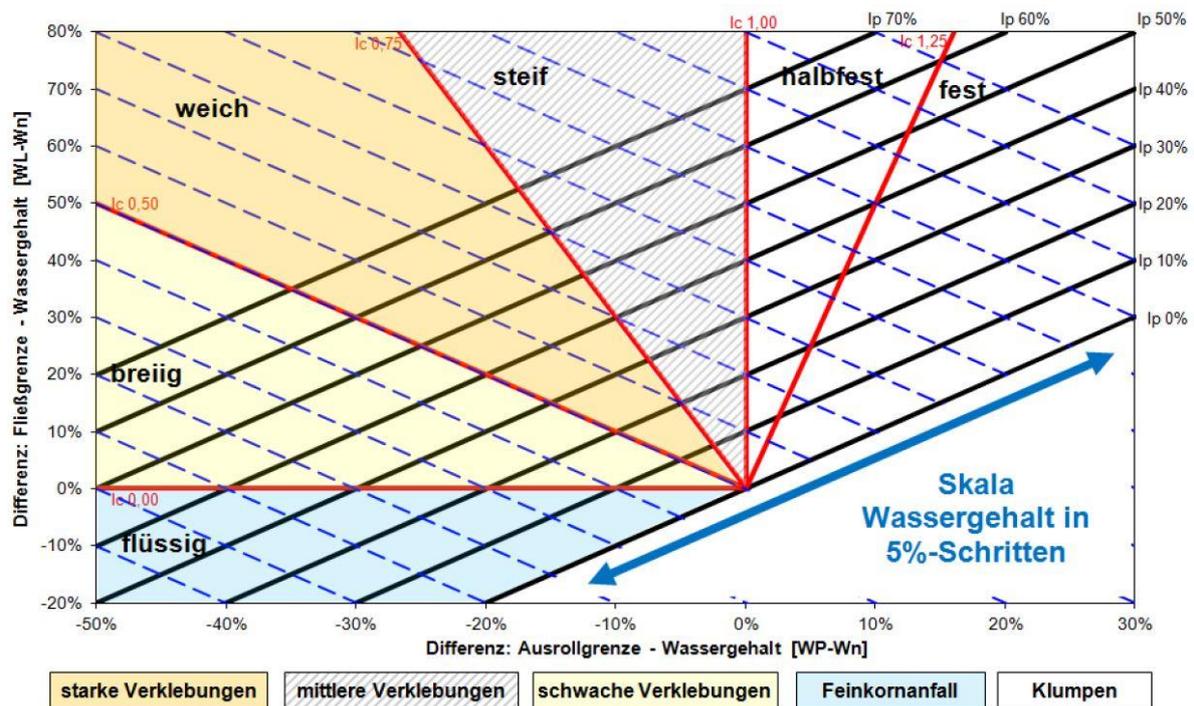


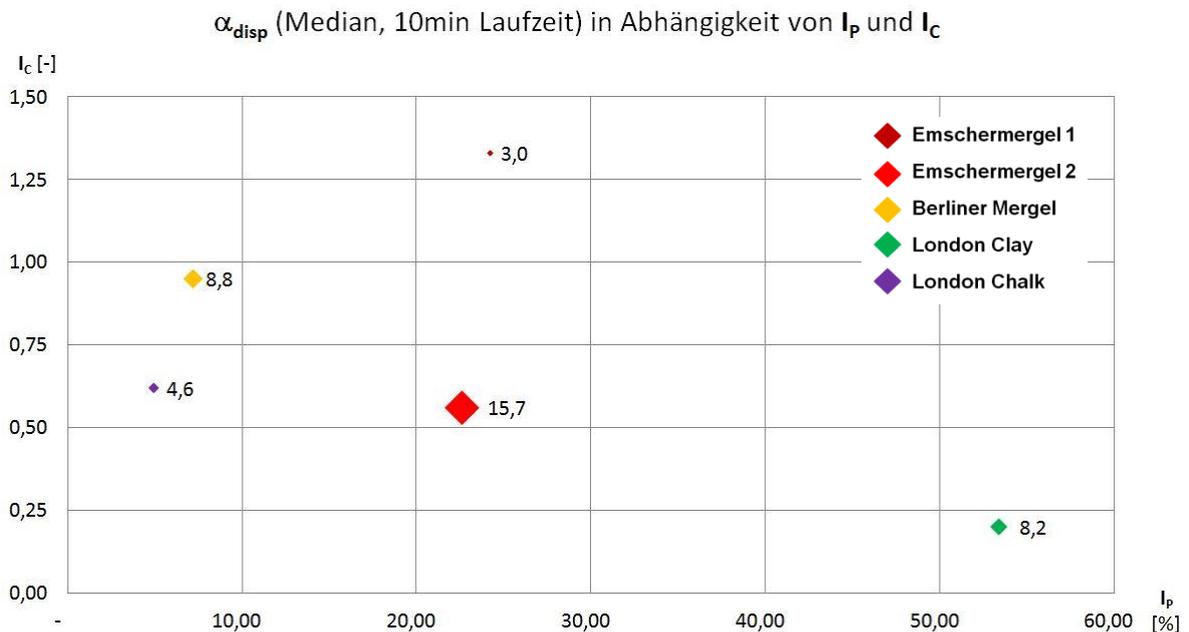
Abbildung 82: Verklebungsdiagramm nach Hollmann und Thewes [40]

Die Ausgangsdaten für die Überprüfung einer Abhängigkeit der Dispergierung von der Plastizität und der Konsistenz sowie für die Validierung der These sind in der folgenden Tabelle 20 zusammengestellt.

Tabelle 20: Praxisböden Ausgangsdaten multivariate Analyse

Boden	$I_p$ [%]	$I_c$ [-]	$\alpha_{disp}$ (Median) [%]		
			10min	20min	30min
Emschermergel 1	24,23	1,33	3,0	4,6	7,3
Emschermergel 2	22,61	0,56	15,7	24,2	28,6
Berliner Mergel	7,19	0,95	8,8	11,6	14,3
London Clay	53,40	0,20	8,2	11,7	13,0
London Chalk	4,93	0,62	4,6	8,3	11,8

Bei Überführung dieser Daten in eine Diagrammform ergibt sich für die Ergebnisse der 10min-Versuche das in der folgenden Abbildung 83 dargestellte Bild. Die Dispergierungsneigung ist zum einen als Zahlenwert an den jeweiligen Datenpunkten vermerkt, zum anderen wird sie optisch durch die Größe des Datenpunktes verdeutlicht.

Abbildung 83:  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$  (10min-Versuche)

Für die Ergebnisse der 20min-Versuche ergibt sich das folgende Bild (Abbildung 84).

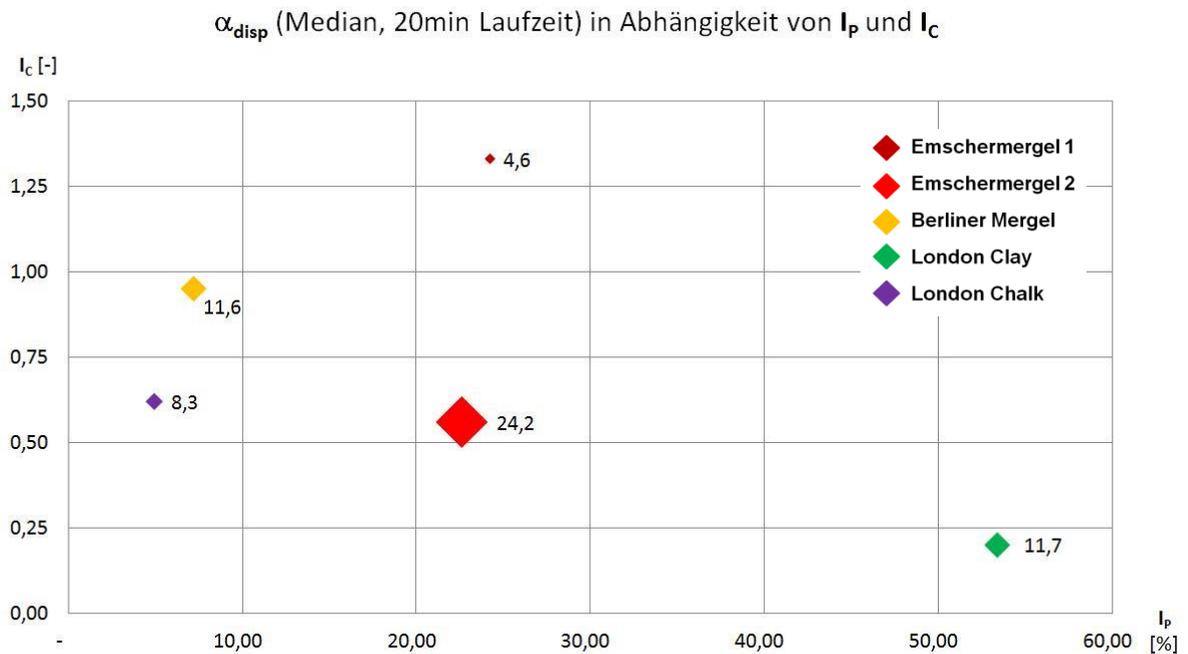


Abbildung 84:  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$  (20min-Versuche)

Die Ergebnisse der 30min-Versuche sind dem folgenden Diagramm (Abbildung 85) zu entnehmen.

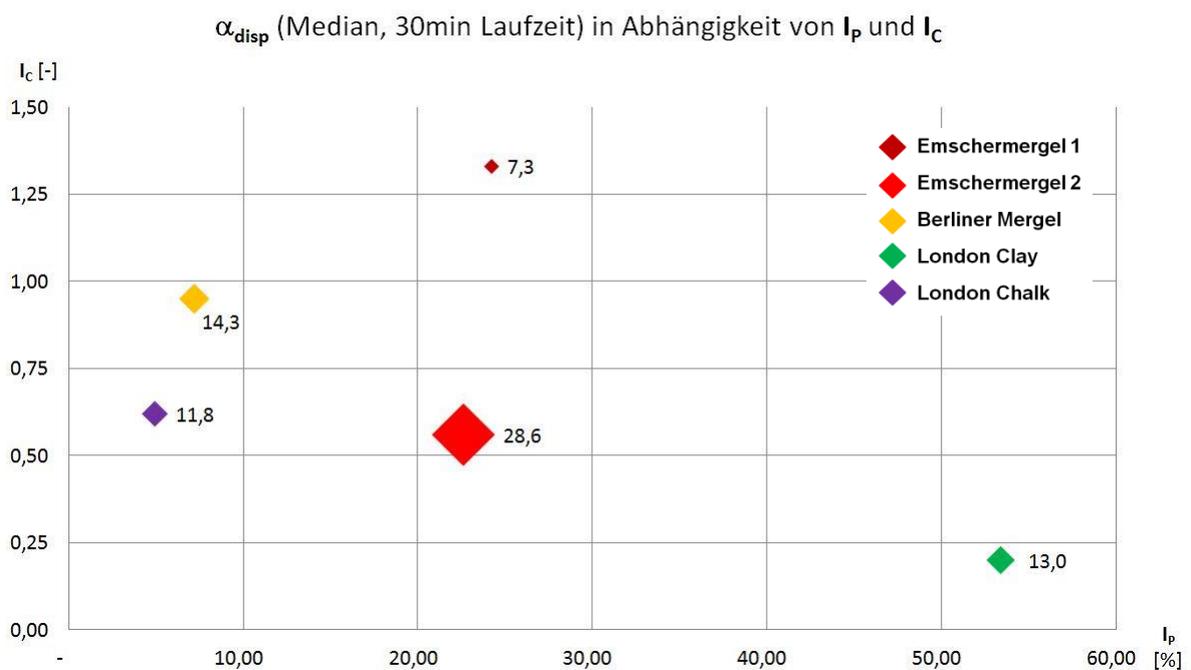


Abbildung 85:  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$  (30min-Versuche)

Bei Betrachtung der Diagramme lässt sich ein leichter Trend erkennen, der für eine Verifizierung der These spricht, vorausgesetzt, die Ergebnisse des Bodens London Chalk werden außer Acht gelassen. Wie bereits bei der Vorstellung der Versuchsböden angedeutet, wirken bei der Kreide im Gegensatz zu den Ton- und Mergelböden auch eher felsmechanische Mechanismen wie z.B. die Kornbindung. Werden also die Datenpunkte London Chalk gedanklich ausgeblendet, lässt sich bei allen drei Diagrammen erkennen, dass die Dispergierung zunimmt, je geringer  $I_p$  und  $I_c$  sind. Um die Validität dieser Aussage zu erhöhen wurde eine weitere Versuchskampagne durchgeführt.

Im Zuge der Kampagne wurde versucht, verschiedene Industrieböden auszuwählen, die den jeweiligen Plastizitätsbereichen zuzuordnen sind und bei denen sich die Konsistenzen so einstellen lassen, dass sie sich in die normativ definierten Konsistenzbereiche einordnen lassen. Somit sollte eine erhöhte Anzahl an Wertepaaren generiert werden, die möglichst viele Abschnitte der Diagramme der multivariaten Analyse abdecken. Von den 10 in diesem Sinne untersuchten Böden haben drei die formulierten Anforderungen erfüllt. Hierbei handelt es sich um drei Tone, einen aus der Region Westerwald von der Firma Sibelco (Ton A), einen aus Bayern von der Firma Meyer (Ton B) und einen aus dem Gebiet der Stadt Bottrop von der Firma Stremmer (Ton C).

Sowohl die Bestimmung der notwendigen charakteristischen Kennwerte der drei Tone als auch die Einstellung der Konsistenzen wurden im Erdbaulaboratorium Essen durchgeführt.

Die Korngrößenverteilung von Ton A ist der Abbildung 86 zu entnehmen. Die Bodenart wird als „Ton, stark schluffig, schwach feinsandig“ angegeben. Mit einer Fließgrenze von 44,6% und einer Plastizitätszahl von 24,0% befindet sich der Boden oberhalb der A-Linie und kann als mittelplastisch klassifiziert werden.

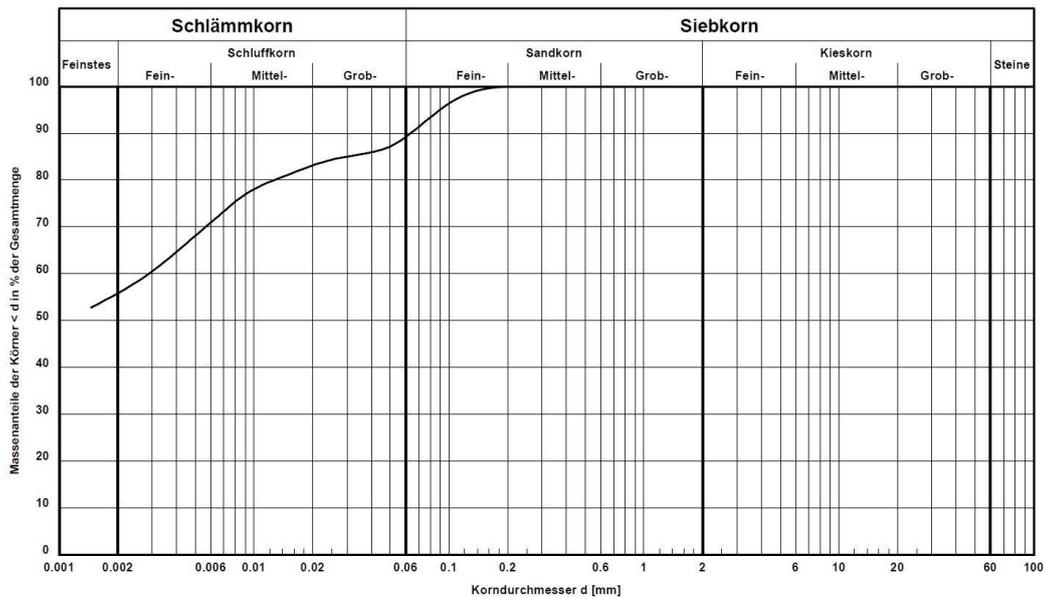


Abbildung 86: Korngrößenverteilung Ton A

Die Korngrößenverteilung von Ton B ist der Abbildung 87 zu entnehmen. Die Bodenart wird ebenfalls als „Ton, stark schluffig, schwach feinsandig“ angegeben. Mit einer Fließgrenze von 60,2% und einer Plastizitätszahl von 34,2% kann der Boden als ausgeprägt plastisch klassifiziert werden. Mit der „natürlichen“ Konsistenzzahl  $I_c$  von 1,12 kann der Zustand des Bodens als halbfest charakterisiert werden.

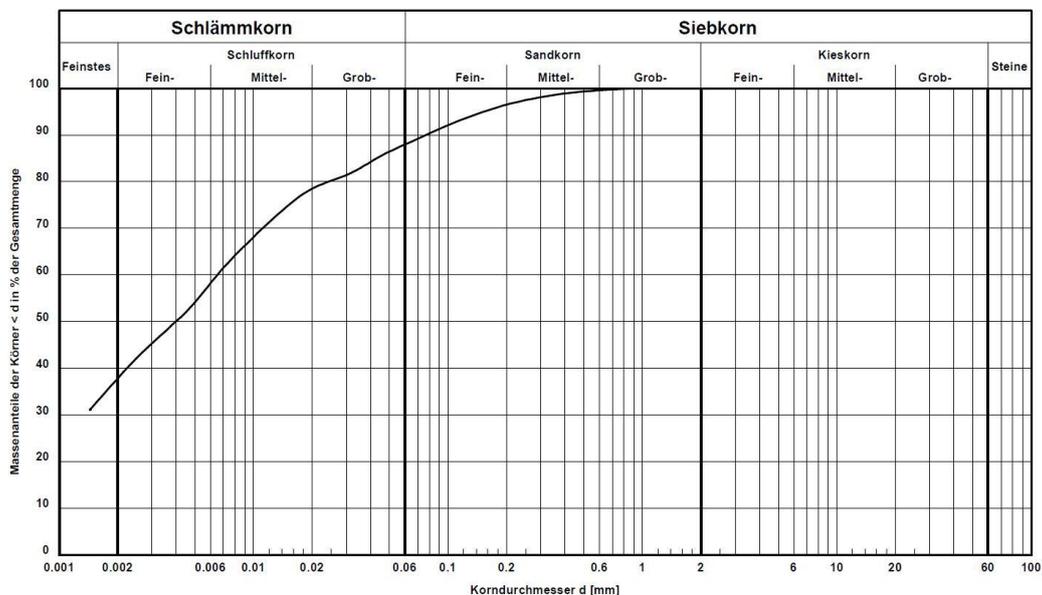


Abbildung 87: Korngrößenverteilung Ton B

Die Korngrößenverteilung von Ton C ist der Abbildung 88 zu entnehmen. Auch hier wird die Bodenart als „Ton, stark schluffig, schwach feinsandig“ angegeben. Mit einer Fließgrenze von 76,8% und einer Plastizitätszahl von 47,3% ist der Boden als ausgeprägt plastisch zu klassifizieren. Mit der „natürlichen“ Konsistenzzahl  $I_c$  von 0,92 lässt der Zustand des Bodens als steif charakterisieren.

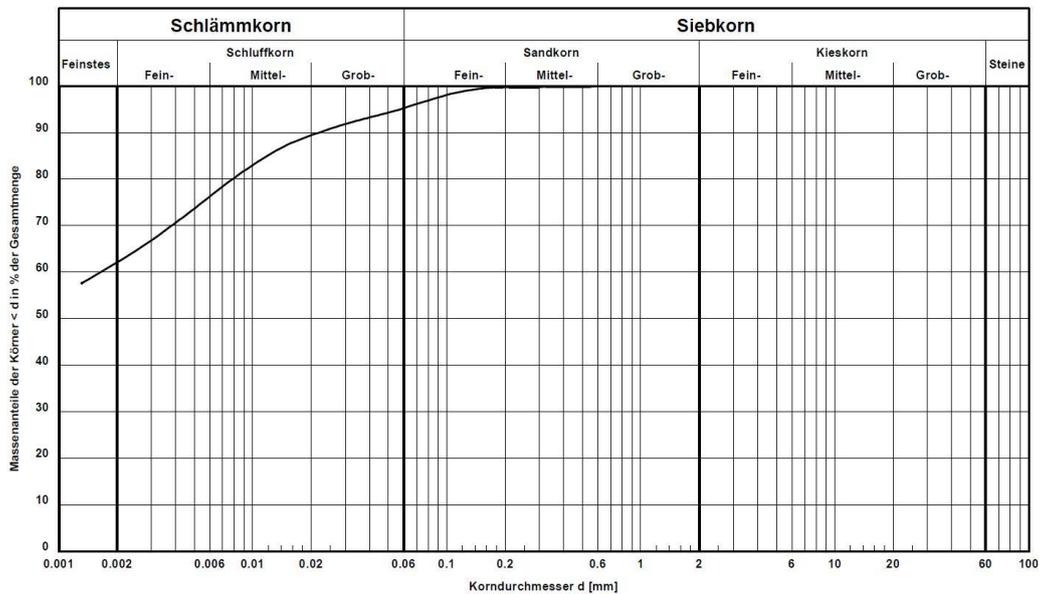


Abbildung 88: Korngrößenverteilung Ton C

Das Bodenmaterial wurde so aufbereitet, dass für jeden der drei Tone fünf Konsistenzbereiche definiert werden konnten. So lag für die Dispergierungsversuche jeweils Probenmaterial mit breiiger ( $I_c = 0,375$ ), weicher ( $I_c = 0,625$ ), steifer ( $I_c = 0,875$ ), halbfester ( $I_c = 1,1$ ) und fester ( $I_c = 1,3$ ) Konsistenz vor. Leider ließen sich aus den Proben der Tone B und C mit breiiger Konsistenz keine Würfel gemäß der Erfordernisse des Dispergierungsversuches formen. Ebenso konnten aus dem Material des Tones B mit fester Konsistenz keine Probekörper hergestellt werden, da das Material bei dem Versuch in Stücke zersprang. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen konnte letztendlich das in der folgenden Tabelle 21 zusammengestellte Versuchsprogramm absolviert werden. Alle Versuche wurden mit einer Laufzeit von 20 Minuten durchgeführt.

Tabelle 21: Versuchsprogramm Industrieböden

Boden	$I_c$	Konsistenz	Anzahl Versuche [Stk]
Ton A ( $I_p = 24,0\%$ )	0,375	breiig	2
	0,625	weich	2
	0,875	steif	2
	1,1	halbfest	2
	1,3	fest	2
Ton B ( $I_p = 34,2\%$ )	0,625	weich	2
	0,875	steif	2
	1,1	halbfest	2
Ton C ( $I_p = 47,3\%$ )	0,625	weich	2
	0,875	steif	2
	1,1	halbfest	2
	1,3	fest	2
<b>Gesamtanzahl Versuche</b>			<b>24 Stück</b>

Die für die weitere Datenanalyse erforderlichen Ergebnisse dieser Versuche sind in der folgenden Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Industrieböden Ausgangsdaten multivariate Analyse

Boden	$I_p$ [%]	$I_c$ [-]	$\alpha_{disp, 20min}$ [%]
Ton A	24,0	0,375	20,74
		0,625	12,18
		0,875	15,05
		1,1	8,52
		1,3	6,53
Ton B	34,2	0,625	10,65
		0,875	11,05
		1,1	9,09
Ton C	47,3	0,625	10,88
		0,875	6,99
		1,1	5,55
		1,3	6,26

Diese Ergebnisse lassen sich analog zum Vorgehen bei den Praxisböden wie folgt (Abbildung 89) in Diagrammform darstellen:

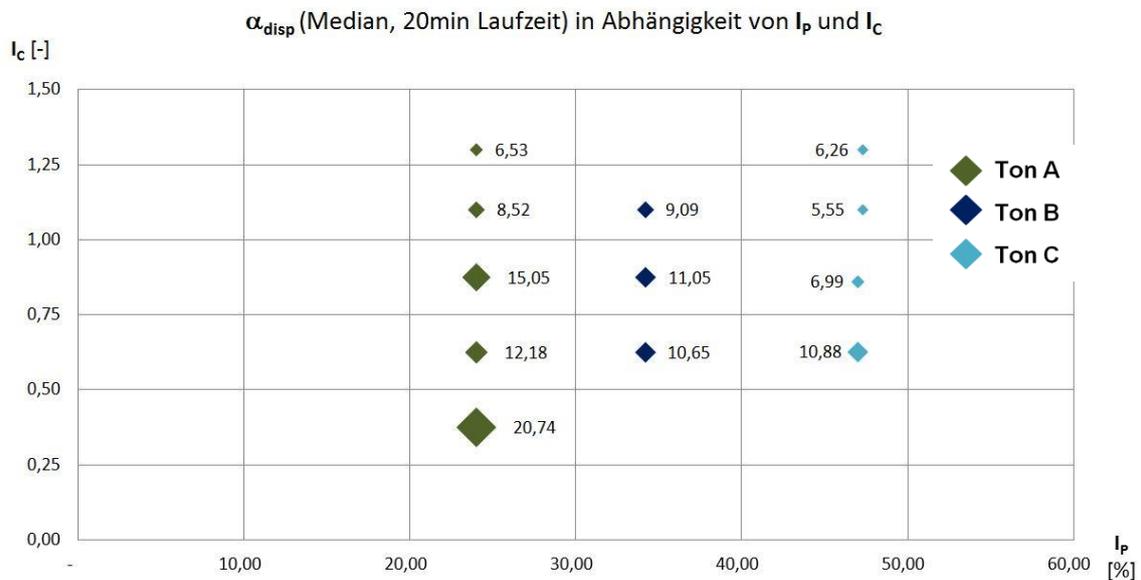


Abbildung 89:  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$  (Industrieböden, 20min)

Die Ergebnisse legen die Schlussfolgerung nahe, dass die Dispergierung tatsächlich steigt, je geringer die Plastizitätszahl und je geringer die Konsistenzzahl ist und unterstreichen damit die formulierte These. Bei Zusammenführung dieser Ergebnisse mit denen der Praxisböden wird dies wie in der folgenden Abbildung 90 zu erkennen noch etwas deutlicher.

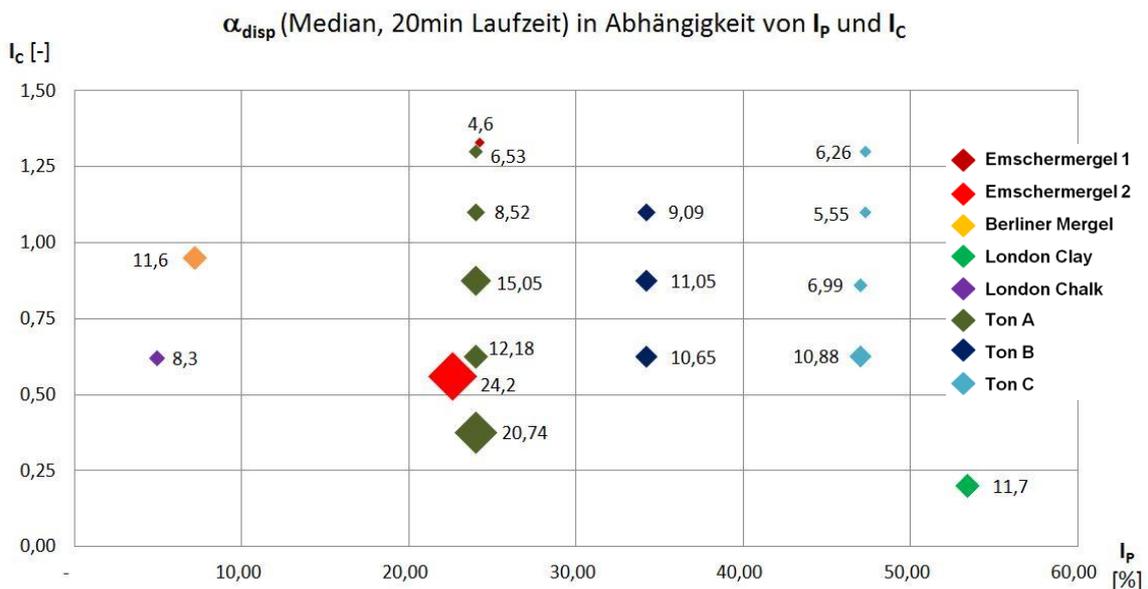


Abbildung 90:  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$  (gesamt, 20min)

#### 6.2.4.5 Beurteilung

Die im Rahmen des **ersten Schritts** der Analyse dargestellten Ergebnisse der in Phase 1 durchgeführten Versuche lassen die Schlussfolgerung zu, dass ein wichtiges Ziel der Laboruntersuchungen erreicht wurde. Besonders in der zusammenfassenden Darstellung der Mittelwerte der Dispergierungsgrade (Abbildung 62) wird deutlich, dass sich mit dem Versuch unterschiedliche Dispergierungsneigungen von verschiedenen Böden detektieren lassen. Erstmals kann die Dispergierung quantitativ auf Basis eines nachvollziehbaren und reproduzierbaren Simulationsversuchs beurteilt werden.

Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit des Dispergierungsversuches, die in Phase 2 der Untersuchungen eruiert werden sollten, lassen sich bei Betrachtung der Ergebnisse des **zweiten Schritts** der Analyse als akzeptabel einstufen. Ein systematischer Fehler infolge der Durchführung ggf. unterschiedlicher Labormitarbeiter (Humanfaktor) kann nicht identifiziert werden. Dies lässt sich gut aus der vergleichenden Betrachtung der zusätzlichen Versuche mit Emschermergel 1 (Abbildung 63) und mit Kunstboden (Abbildung 70) ablesen. Aus diesem Vergleich lässt sich zudem ableiten, dass sich die Streuung der Ergebnisse insbesondere für einen Versuch mit einem natürlichen Produkt in einem vertretbaren Rahmen bewegt. Die Verwendung von Leitungswasser als Versuchsflüssigkeit anstelle von destilliertem Wasser gemäß ASTM verursacht keine erkennbaren Abweichungen (vgl. Abbildung 66 und Abbildung 67) und kann damit als geeignet eingestuft werden. Weder die Genauigkeit noch die Zuverlässigkeit des Dispergierungsversuches leidet unter einer weiteren Erhöhung der Versuchsdauer, ein eindeutig mathematisch bestimmbarer Zusammenhang zwischen der Dispergierung und der Laufzeit lässt sich allerdings nicht herleiten (vgl. Abbildung 64 und Abbildung 65 ).

Die sich bereits aus den Ergebnissen der in der ersten Phase durchgeführten Versuche sowie durch die Ergebnisse der in der zweiten Phase durchgeführten Versuche verstärkend ergebende Erkenntnis, dass die absoluten Werte der Laborversuche nicht mit den Erwartungshaltungen und Schätzwerten aus der Tunnelbaupraxis übereinstimmen, sondern deutlich niedriger sind, lässt sich auch durch die versuchsweise Hinzugabe von Stahlwürfeln nicht verändern. Es tritt sogar der gegenteilige Effekt auf – die Dispergierungsgrade der Versuche mit Stahlwürfeln sind niedriger als die Ergebnisse ohne Hinzugabe von Stahlwürfeln (vgl. Abbildung

68 und Abbildung 69). Über andere Möglichkeiten zur Erhöhung der mechanischen Beanspruchung der Bodenproben und damit zur Annäherung der Labor-Dispergierungsgrade an die Praxis-Dispergierungsneigung sollte in weitergehenden Forschungsvorhaben nachgedacht werden. Momentan können die Labor-Dispergierungsgrade nicht unmittelbar für die Ermittlung des Separierungsaufwandes herangezogen werden. Allerdings lassen sich eine qualitative Bewertung und damit eine Prognose der Dispergierungsneigung herleiten. Ein Vorschlag hierzu ist der folgenden Tabelle 23 zu entnehmen.

*Tabelle 23: Qualitative Bewertung der Dispergierungsneigung*

Labor- Dispergierungsgrad	Dispergierungsneigung in der Praxis in Abhängigkeit von der Versuchsdauer		
	10 min	20 min	30 min
$\alpha_{\text{disp}}$ [%]			
0 - 5	Niedrig	Niedrig	Niedrig
5 - 10	Mittel	Niedrig	Niedrig
10 – 15	Mittel	Mittel	Mittel
15 – 20	Hoch	Mittel	Mittel
20 – 25	Hoch	Hoch	Mittel
25 – 30	Hoch	Hoch	Hoch
> 30	Hoch	Hoch	Hoch

Die in dieser Tabelle dargestellte qualitative Bewertung der in der Praxis zu erwartenden Dispergierungsneigung ist unterteilt in drei Bereiche, die sich aus der Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von der Versuchsdauer ergeben. So wird beispielsweise die Dispergierungsneigung des jeweiligen Bodens in der Praxis bereits als hoch eingeschätzt, wenn der Labor-Dispergierungsgrad bei einer Versuchsdauer von 10 Minuten mehr als 15% beträgt. Bei einer Versuchsdauer von 20 Minuten wird die Dispergierungsneigung in der Praxis allerdings erst als hoch eingeschätzt, wenn der Labor-Dispergierungsgrad mehr als 20% beträgt.

Da diese Art der Darstellung missverstanden werden kann sowie das Handling umständlich ist, wird in der folgenden Tabelle 24 eine vereinfachte Möglichkeit zur Prognose der in der Tunnelbaupraxis zu erwartenden Dispergierungsneigung angeboten. Diese Tabelle sowie ein kurzer Abriss zur Herleitung und zum

Dispergierungsversuch an sich wurden der Fachwelt bereits vorgestellt [64], [65]. Außerdem haben sowohl der Versuch als auch die Tabelle Eingang gefunden in das „Diskussionspapier zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau“ [16] des DAUB.

*Tabelle 24: Qualitative Prognose der Dispergierungsneigung*

Labor-Dispergierungsgrad $\alpha_{disp}$ [%] (Versuchsdauer 20 min)	Dispergierungsneigung in der Praxis
0 – 10	Niedrig
10 – 20	Mittel
> 20	Hoch

Die Labor-Dispergierungsgrade beziehen sich hierbei auf Versuche mit einer Laufzeit von 20 Minuten, die Bereiche „Niedrig, Mittel, Hoch“ werden in einer größeren, aus Tabelle 23 abgeleiteten Zusammenfassung dargestellt.

Die im **dritten Schritt** der Datenanalyse durchgeführte erweiterte statistische Auseinandersetzung mit den Versuchsergebnissen lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Daten überwiegend belastbar sind. Die Ergebnisse der Versuche mit Emschermergel 2 und London Chalk lassen sich als vollumfänglich belastbar identifizieren, bei den Ergebnissen der Versuche mit Emschermergel 1 und Berliner Mergel sind leichte Unsicherheiten insbesondere bei einer Laufzeit von 30 Minuten zu detektieren. Die Ergebnisse der mit London Clay durchgeführten Versuche sind mit der größten Unsicherheit behaftet, was im Wesentlichen auf die eher geringe Anzahl der Versuche zurückzuführen ist. Grundsätzlich gilt wenig überraschend, dass die Belastbarkeit der Ergebnisse umso höher ist, desto mehr Versuche durchgeführt wurden. Dementsprechend ist eine zentrale Erkenntnis, dass im Rahmen weitergehender Forschungsvorhaben oder auch im Vorfeld oder während der Ausführung von zur Thematik passenden Tunnelbauprojekten eine möglichst große Anzahl an Versuchen durchgeführt werden sollte.

Bei der im **vierten Schritt** der Datenanalyse unternommenen Suche nach Korrelationen des Dispergierungsgrades zu etablierten charakteristischen Bodenkennwerten haben sich sehr interessante und vielversprechende Erkenntnisse

ergeben. Zunächst lässt sich aus den Ergebnissen der durchgeführten univariaten Analyse schlussfolgern, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Dispergierungsneigung und dem Wassergehalt, der Feuchtdichte, der Fließgrenze, der Ausrollgrenze, der Plastizitätszahl und der Konsistenzzahl herleiten lässt. Aus den Ergebnissen der multivariaten Analyse (siehe insbesondere Abbildung 90) lässt sich ablesen, dass es einen Zusammenhang zwischen der Dispergierungsneigung und der Plastizität und Konsistenz gibt. Je geringer die Plastizitätszahl und je geringer die Konsistenzzahl ist, desto größer ist die Dispergierungsneigung. Werden nun die in Abbildung 90 dargestellten Ergebnisse mit den in Tabelle 24 aufgeführten Bereichen zur Prognose der Dispergierungsneigung überlagert, lässt sich die folgende Abbildung 91 erstellen.

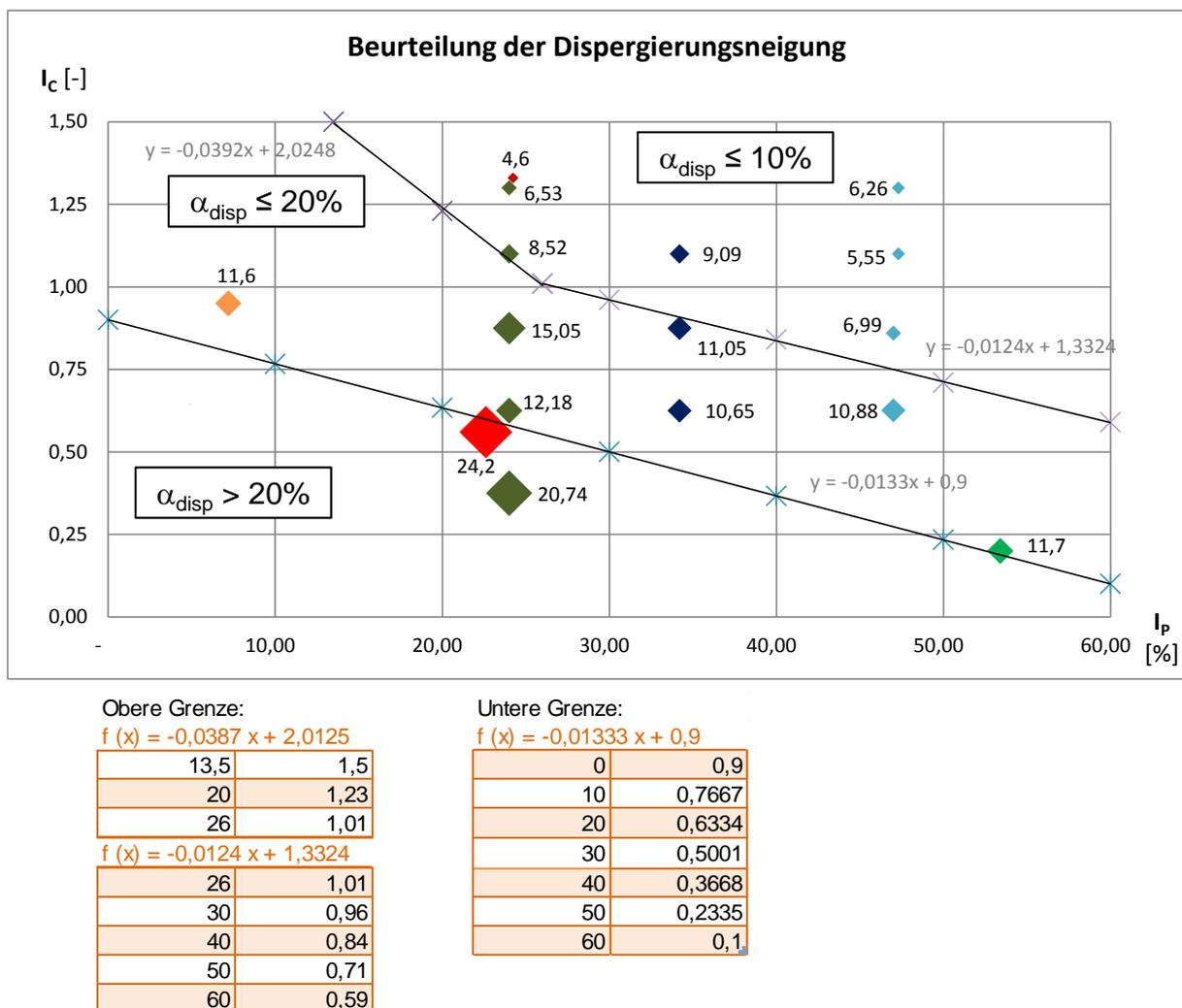


Abbildung 91: Herleitung der Beurteilung von  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_P$  und  $I_C$

Die Formeln für die Kurvenverläufe lassen sich mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms ermitteln mit der Maßgabe, dass gemäß der in Tabelle 24 zusammengefassten Werte alle Dispergierungsgrade kleiner 10% oberhalb der oberen Kurve zu liegen kommen und alle Dispergierungsgrade größer 20% unterhalb der unteren Kurve. Werden die sich so ergebenden Bereiche des Diagramms in den wie in der Tabelle 24 verwendeten Farben umrandet, ergibt sich die Darstellung in der folgenden Abbildung 92.

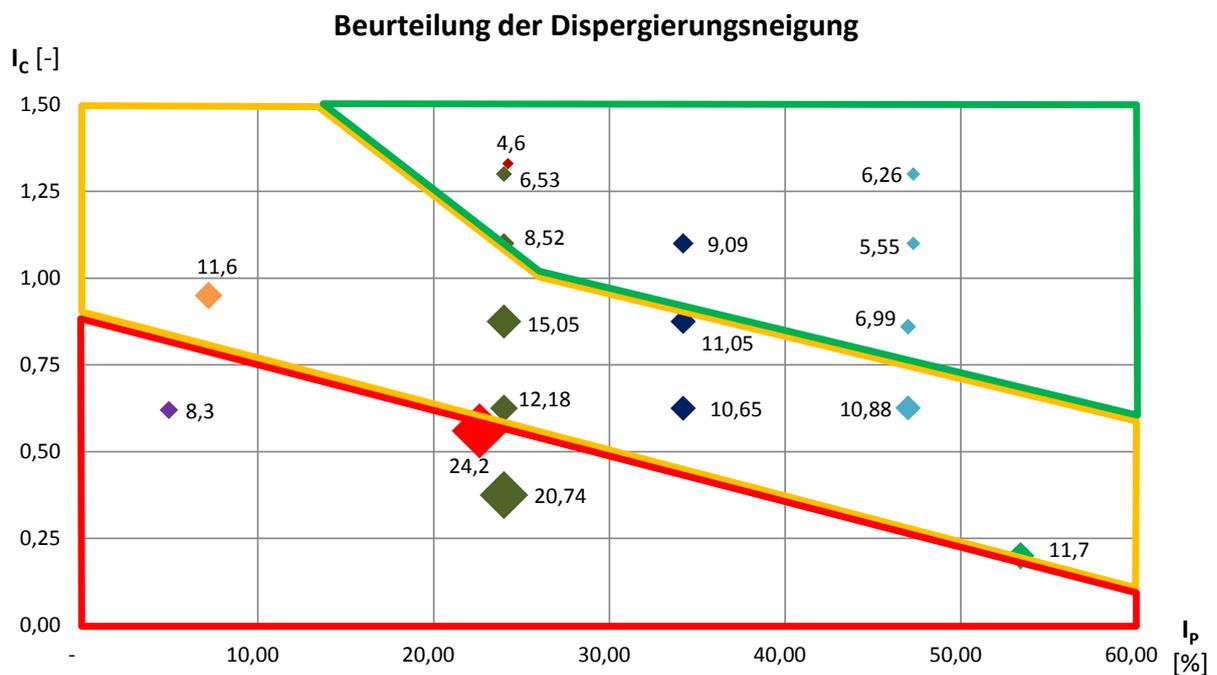


Abbildung 92: Beurteilung von  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_P$  und  $I_C$

Es ist zu erkennen, dass die Werte von  $\alpha_{disp}$  in dem grün umrandeten Bereich alle unter 10% betragen, was auf eine geringe Dispergierungsneigung schließen lässt. Die Werte von  $\alpha_{disp}$  in dem gelb umrandeten Bereich liegen alle zwischen 10 und 20%, was die Prognose einer mittleren Dispergierungsneigung erlaubt. Die Werte von  $\alpha_{disp}$  in dem rot umrandeten Bereich liegen über 20% und führen zu einer Einschätzung, dass mit einer hohen Dispergierungsneigung zu rechnen ist.

Aus dieser Herleitung lässt sich nun abschließend die folgende plakative Abbildung 93 konzipieren. Mit dieser Abbildung lässt sich bei Kenntnis der etablierten charakteristischen Bodenkennwerte  $I_P$  und  $I_C$  die zu erwartende Dispergierungsneigung qualitativ beurteilen.

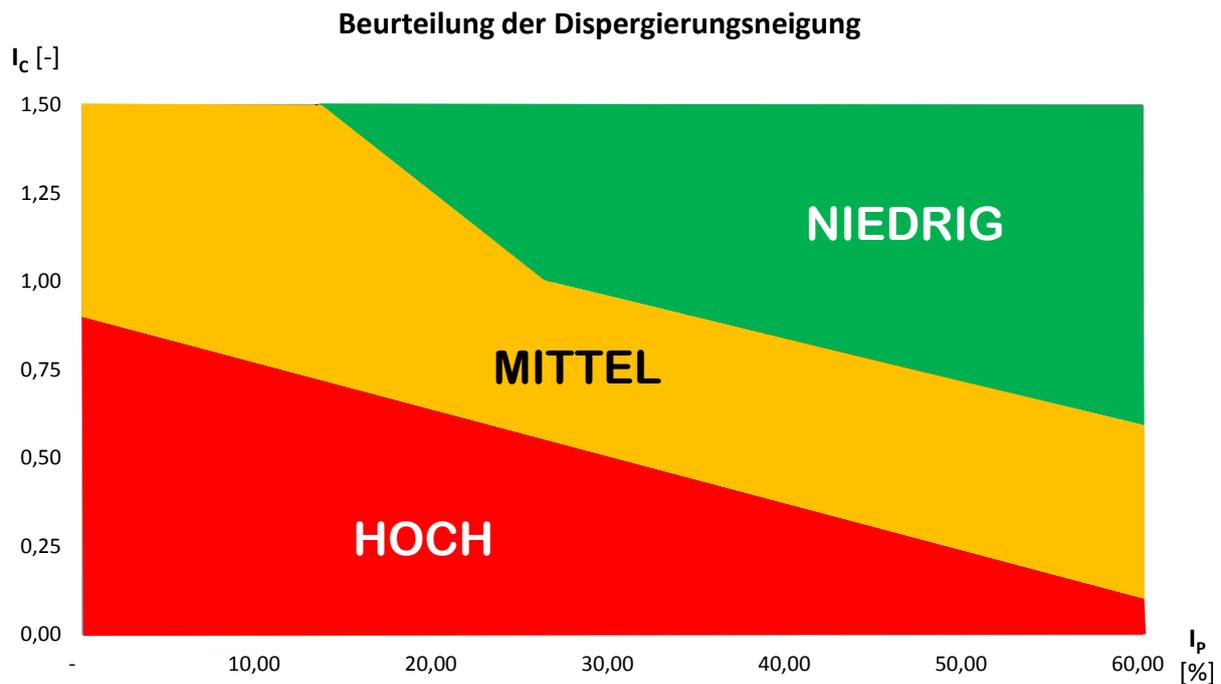


Abbildung 93: Qualitative Beurteilung von  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$

Obwohl diese finale Einschätzung auf einer nicht unerheblichen Anzahl an Versuchen basiert, ist eine weitere Auseinandersetzung mit der Thematik der Dispergierung in zukünftigen Forschungsvorhaben sowie in der Praxis zu empfehlen. So könnten z.B. durch zusätzliche Versuchsreihen die Übergänge der Bereiche „Niedrig, Mittel, Hoch“ schärfer abgegrenzt werden oder sogar eine mathematische Herleitung für diese Grenzen gelingen.

### 6.3 Fazit

Der neue Dispergierungsversuch erlaubt die Detektion der Dispergierungsneigung unterschiedlicher Böden und veränderlicher Festgesteine. Erstmals kann somit eine qualitative Beurteilung und damit Prognose der in der Tunnelbaupraxis zu erwartenden Dispergierung basierend auf nachvollziehbar und reproduzierbar ermittelten Versuchsergebnissen erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Einschätzung der Dispergierungsneigung auf Basis der in der Regel ohnehin im Vorfeld eines Tunnelbauprojektes zu ermittelnden charakteristischen Kennwerte für die Plastizität und die Konsistenz möglich. Durch beide Herangehensweisen lässt sich der große Interpretationsspielraum der bisherigen willkürlichen Vorgehensweise unter Verwendung von rein subjektiven Schätzwerten bereits ein Stück weit verringern.

---

Die Versuchsanordnung entspricht grundsätzlich der des etablierten Siebtrommelversuchs. Der Hauptunterschied besteht darin, dass der Fokus auf der Veränderung der Versuchsflüssigkeit und nicht auf der Veränderung des Trommelrückstands liegt. Bodenmechanische Labore, die mit einer Siebtrommelapparatur ausgestattet sind, können den Dispergierungsversuch ohne weiteres ausführen.

Insgesamt wurden 270 Versuche zzgl. der Durchläufe zur Festlegung der Stellgrößen durchgeführt. Somit lässt sich von einer durchaus belastbaren Grundlage für die Datenanalyse und die daraus generierten Schlussfolgerungen sprechen. Auch die Untersuchungen zur Genauigkeit und Belastbarkeit der Versuchsergebnisse können als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Nichtsdestotrotz sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben und in der Tunnelbaupraxis weitere Versuchsreihen gefahren werden, um die Datensicherheit weiter zu erhöhen und um die erkennbare Korrelation zwischen der Dispergierung und den etablierten charakteristischen Kennwerten Konsistenz und Plastizität enger einzugrenzen.

Von besonderem Interesse für die Tunnelbaupraxis wird außerdem sein, eine Art Übersetzungs- oder Translationsfaktor zu ermitteln, mit dessen Hilfe von dem Labor-Dispergierungsgrad auf den Praxis-Dispergierungsgrad geschlossen werden kann. Hierzu sollten weitergehende Untersuchungen zu den vielfältigen Einflussfaktoren erfolgen. Als Ausgangspunkt könnte das in der folgenden Abbildung 94 dargestellte Modell dienen, dass sich aus den Erkenntnissen dieser Arbeit entwickeln lässt.

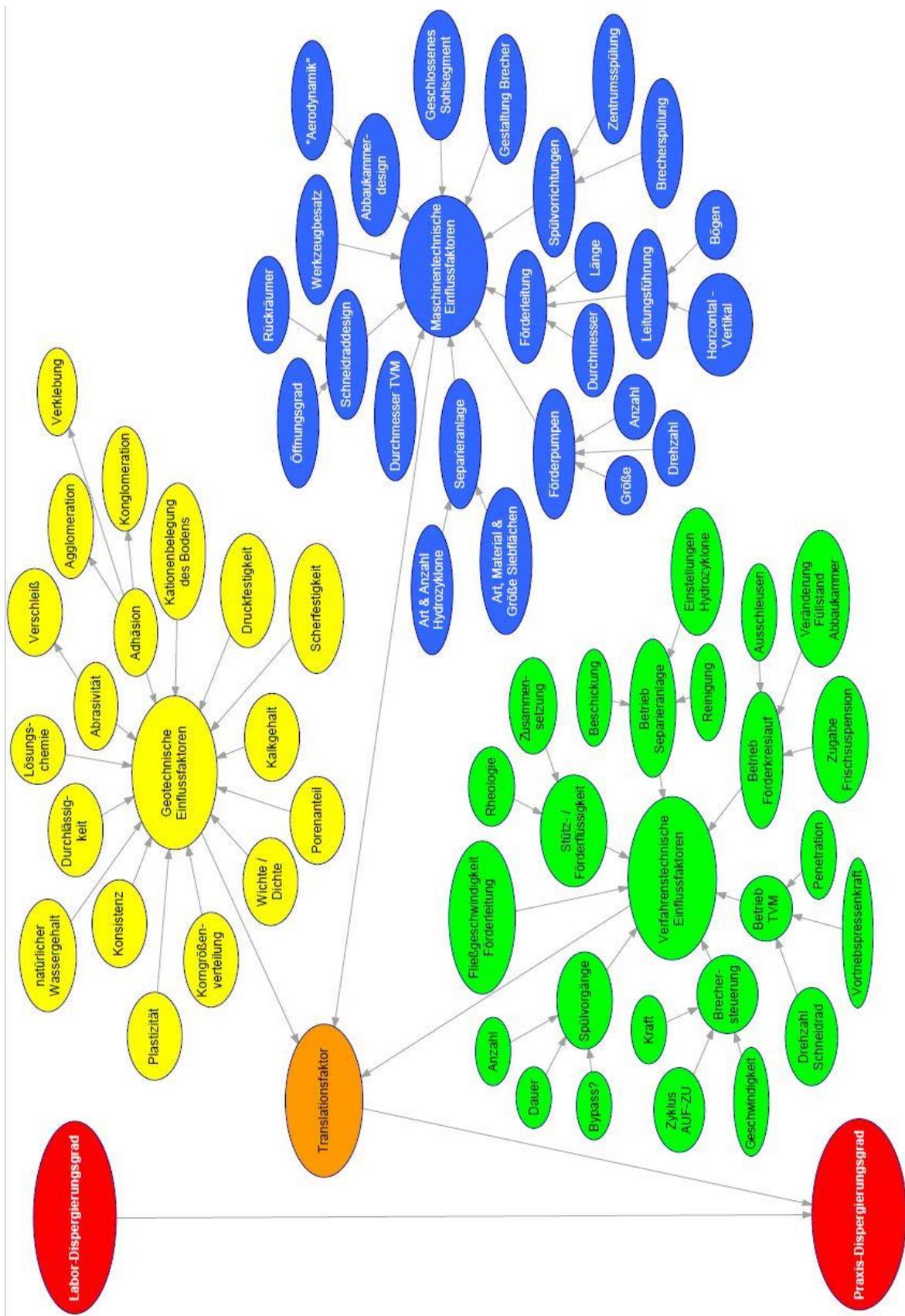


Abbildung 94: Einflüsse auf die Dispergierung in der Tunnelbaupraxis [66]

Aufgrund der Komplexität der Thematik und der vielen Unbekannten bietet sich die Darstellung in Form eines Bayesischen Netzwerkes an. Bei diesem probabilistischen Ansatz ist es möglich, Zusammenhänge auch bei unsicherer Informations- und Datenlage aufzuzeigen und mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten zu hinterlegen. Diese Wahrscheinlichkeiten wiederum können auf empirischen Untersuchungen basieren, sie können aber genauso gut ingenieurmäßige Annäherungen oder Expertenmeinungen ausdrücken. Das Anwendungsfeld von Bayesischen Netzwerken ist weit – vielfache Verwendung findet sich im Bereich der Risikoanalysen, zunehmend werden aber auch ingenieurtechnische Fragestellungen unter Zuhilfenahme der mit der Theorie einhergehenden Software-Entwicklungen untersucht. Im Tunnelbau wurden Bayes-Netze in letzter Zeit z.B. im Zusammenhang mit der Vorhersage von Tunnelbau-induzierten Setzungen [38] oder mit dem Abplatzverhalten von Innenschalen bei Brandlasten [17] eingesetzt. In den entsprechenden Arbeiten von Hahn [38] und Dietz [17] sind auch weitere Hintergründe zur Theorie von Bayes zu finden.

Als Anfangspunkt für das Modell lässt sich noch der folgende deterministische Ansatz bestimmen:

$$\alpha_{disp,Praxis} = k_{trans} * \alpha_{disp,Labor} [\%]$$

mit

$$\alpha_{disp,Praxis} = \text{Dispergierungsneigung in der Praxis} [\%]$$

$$k_{trans} = \text{Translations- (Übersetzungs-) Faktor [-]}$$

$$\alpha_{disp,Labor} = \text{Dispergierungsneigung aus dem Dispergierungsversuch} [\%]$$

Bei der weiteren Aufschlüsselung des Translationsfaktors stößt dieser Ansatz allerdings schnell an seine Grenzen, da sämtliche in der Abbildung 94 dargestellten Inhalte der Knoten Berücksichtigung finden müssen. Daher der Anstoß an dieser Stelle, zukünftige Untersuchungen ausgehend von dem probabilistischen Modell durchzuführen.

Dass weitergehende Untersuchungen sinnvoll und notwendig sind, lässt sich gut anhand der folgenden Abbildung 95 verdeutlichen. Hier sind in dem hergeleiteten Diagramm zur Beurteilung der in der Praxis zu erwartenden Dispergierungsneigung bei Kenntnis von  $I_P$  und  $I_C$  plakativ die in der Tunnelbaupraxis erwarteten Dispergierungsgrade der unterschiedlichen Böden eingetragen. Insbesondere beim Emschermergel wird deutlich, dass die Praxis-Schätzwerte durchaus erhebliche Fehleinschätzungen sein können. Außerdem ist bei Betrachtung der Diskrepanz der Werte von London Chalk kritisch anzumerken, dass auch bei der Untersuchungsmethodik sicherlich noch Weiterentwicklungspotential besteht.

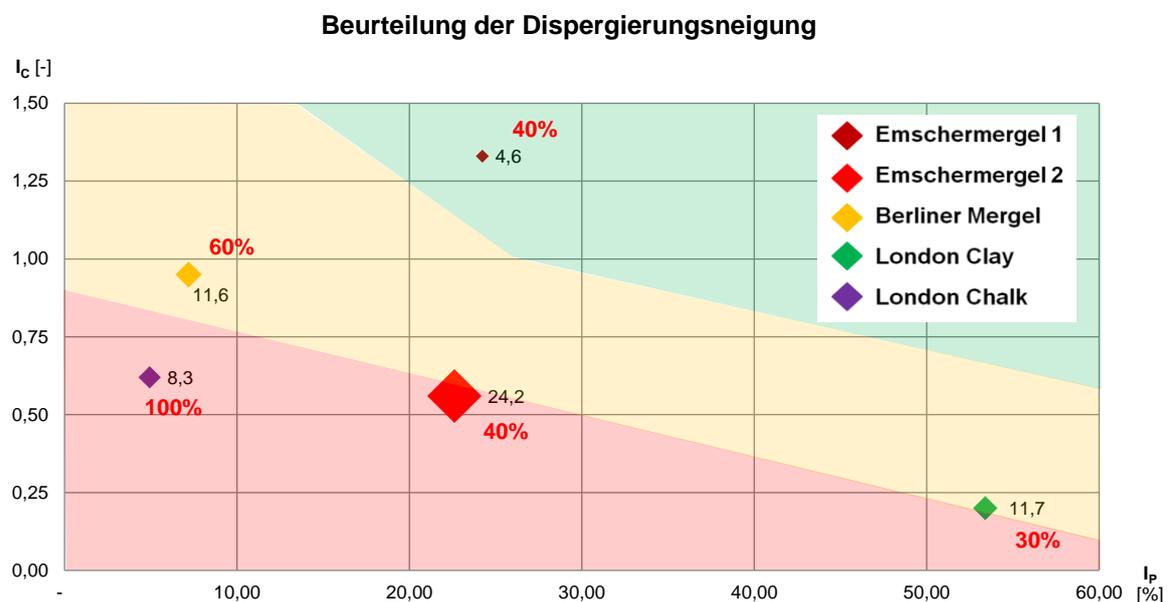


Abbildung 95: Vergleich Labor- und Praxis-Dispergierungsgrad

## 7 Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis

An verschiedenen Stellen dieser Ausarbeitung ist erkennbar, dass es sich um Untersuchungen aus der Praxis für die Praxis handelt. Daher werden im Folgenden konkrete Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis formuliert, die sich aus den Recherchen, Datenauswertungen und durchgeführten Versuchen ergeben haben bzw. ableiten lassen. Hierbei ist eine Kategorisierung in Empfehlungen zu den geotechnischen Voruntersuchungen, zur spezifischen Verfahrenstechnik und zu vertraglichen Regelungen bei Tunnelbauvorhaben mit Einsatz eines flüssigkeitsgestützten Schildvortriebes in feinkörnigen Böden möglich.

### 7.1 Empfehlungen zu geotechnischen Voruntersuchungen

Im Zuge der geotechnischen Voruntersuchungen sollte möglichst in mehreren Versuchsreihen die Dispergierneigung der zu durchörternden feinkörnigen Böden mit Hilfe des neu entwickelten Dispergierungsversuches (Ablauf siehe Abbildung 96) bestimmt werden.

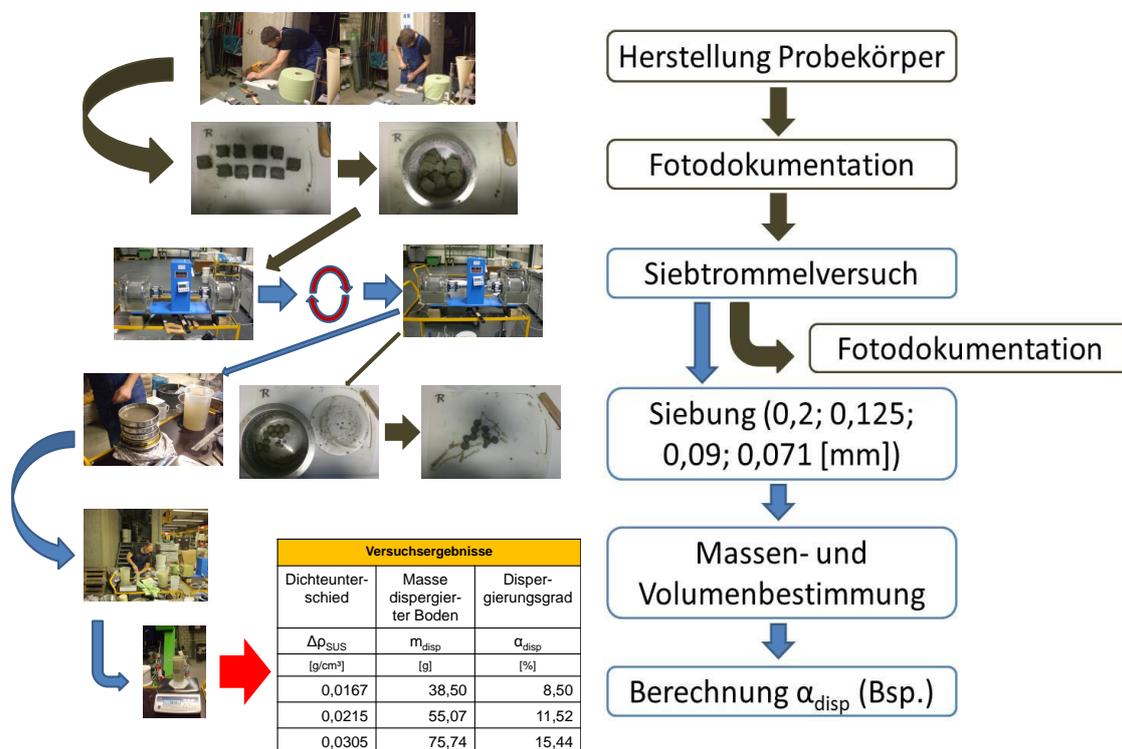


Abbildung 96: Ablaufschema des Dispergierungsversuches

Je nach Länge des zu erstellenden Tunnels und der identifizierten Homogenbereiche bzw. Abschnitte mit gleichbleibenden für den Schildvortrieb relevanten Eigenschaften sollte ein Versuchsprogramm mit unterschiedlichen Laufzeiten entwickelt werden. Um die Ergebnisse dieser Ausarbeitung zur Orientierung hinzuziehen zu können, würde sich auf jeden Fall eine Versuchsreihe mit einer Laufzeit von 20 Minuten anbieten. In diesem Fall kann eine qualitative Prognose der zu erwartenden Dispergierungsneigung in Abhängigkeit des mit dem Versuch ermittelten Dispergierungsgrades  $\alpha_{disp}$  unter Zuhilfenahme der Tabelle 25 erfolgen.

Tabelle 25: Qualitative Prognose der Dispergierungsneigung

Labor-Dispergierungsgrad $\alpha_{disp}$ [%] (Versuchsdauer 20 min)	Dispergierungsneigung in der Praxis
0 – 10	Niedrig
10 – 20	Mittel
> 20	Hoch

Ergänzend sollte die Einschätzung der Dispergierungsneigung auf Basis der Kennwerte für die Plastizität und Konsistenz mit Hilfe des in Abbildung 97 dargestellten Diagramms erfolgen.

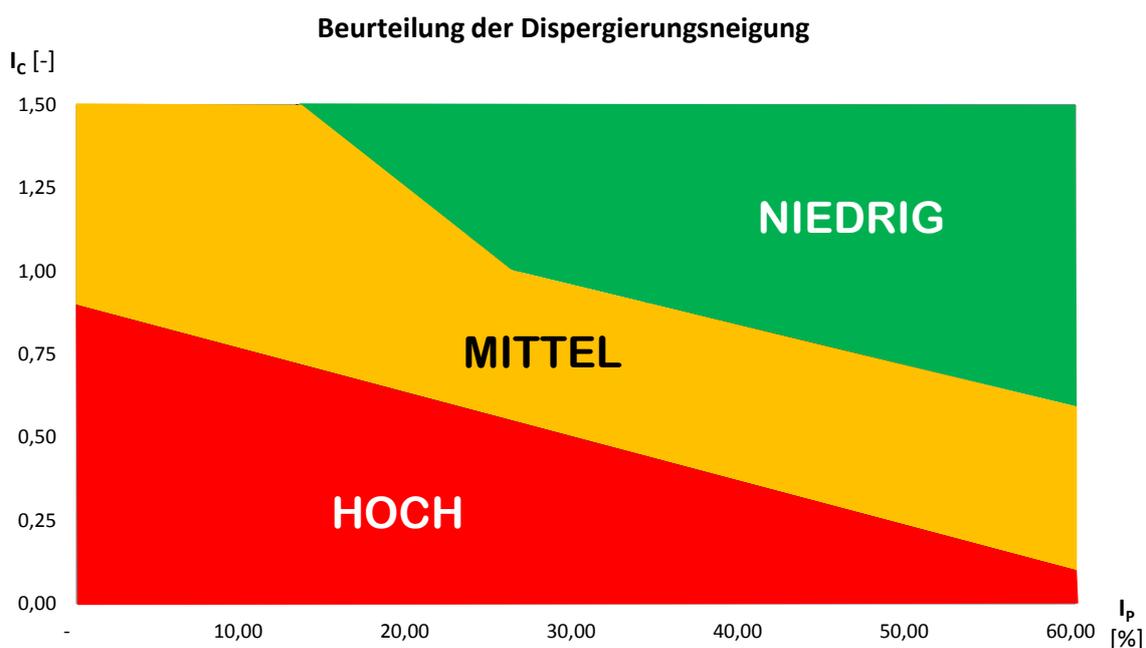


Abbildung 97: Qualitative Beurteilung von  $\alpha_{disp}$  in Abhängigkeit von  $I_p$  und  $I_c$

## **7.2 Empfehlungen zur spezifischen Verfahrenstechnik**

Die spezifische Verfahrenstechnik sollte zur Verbesserung der Datenqualität und der Datenquantität als Grundlage für die notwendige, weitergehende Untersuchung des Gesamtzusammenhangs zwischen dem theoretisch ermittelbaren Bodenaushub und dem tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage zielgerichtet adaptiert werden. Im Zuge der hier durchgeführten Untersuchungen wurde herausgearbeitet, dass erste konkrete und auch mit dem für Tunnelbaustellen erforderlichen Pragmatismus vereinbare Schritte empfohlen werden können. Diese lassen sich einteilen in Aspekte bzgl. der eigentlichen Messtechnik, bzgl. der Vorgehensweise zur Datenerfassung und bzgl. einer optimierten Datenauswertung.

### **7.2.1 Redundanz der messtechnischen Erfassung**

Die wichtigste Empfehlung zur Messtechnik ist die Schaffung nach Möglichkeit mehrfacher Redundanzen in Kombination mit einer systematischen, zielgerichteten Anordnung der für die messtechnische Erfassung der für den Bodenaushub verantwortlichen Gerätschaften.

So sollten die nach aktuellem Stand der Technik eingesetzten Messinstrumente – Durchflussmesser, Dichtemesser und Förderbandwaagen – konsequent mehrfach vorgesehen werden. Bei den Dichte- und Durchflussmessern wäre die Anordnung der ersten Messinstrumente möglichst noch auf der Schildmaschine ideal, um die auftretenden, die Messergebnisse verfälschenden Einflüsse aus der Zuführung von z.B. Reinigungswasser oder Pumpensperrwasser im besten Fall ausschließen, zumindest aber überhaupt erst einmal erfassen zu können. Ob dies umsetzbar ist, wäre im Zuge der Konzeption der Maschine mit dem Hersteller zu eruieren. Die Anordnung der zweiten Messinstrumente als Redundanz wäre dann jeweils an Steigleitungen vorzusehen, z.B. in einem evtl. vorhandenen Startschacht oder in den Zuführungsleitungen zur Separieranlage, bei denen in der Regel ein gewisser Höhenunterschied zu überwinden ist. Bei den Förderbandwaagen wäre neben der mehrfachen Anordnung der Instrumente für die Datenqualität hilfreich, wenn die unterschiedlichen Fraktionen über unterschiedliche Förderbänder abgeführt würden. Dies würde z.B. ermöglichen, die Agglomerate und Konglomerate separat erfassen und analysieren zu können, um letztendlich auf die Größenordnung der Feinanteile schließen zu können, die bereits über das Grobsieb abgeschieden werden.

Darüber hinaus ist zu empfehlen, weitere Wiegevorrichtungen wie z.B. LKW-Waagen konsequent zu nutzen, hierbei falls noch pragmatisch umsetzbar ebenfalls die verschiedenen Fraktionen getrennt voneinander zu erfassen sowie eine große Sorgfalt und hohe Disziplin bei der Dokumentation der Messwerte umzusetzen.

Auch sollten weitere Messtechniken, wie z.B. die radiometrische Massenstrombestimmung an Förderbändern oder die Mikrowellen-Feuchtemessung in Baustellen-Experimenten und in diese Richtung weitergehenden Forschungsvorhaben untersucht werden.

### **7.2.2 Vorgehensweise zur Datenerfassung**

Neben der mit der Redundanz der Messinstrumente einhergehenden Erhöhung der automatisiert erfassten Daten lassen sich weitere Quellen zur Generierung und damit Erfassung von Daten insbesondere zum Feststoffaustrag der Separieranlage schaffen und dann nutzen. Gerade in Kombination mit einem getrennten Austrag der verschiedenen Fraktionen ist eine systematische Probennahme und –analyse zu empfehlen. Hierbei wäre z.B. das Auffangen des jeweiligen Austrags mit einer Box denkbar, um dann insbesondere die Kornverteilung, die Dichte und den Wassergehalt bestimmen zu können. Auch die systematische Probennahme von den Grob- und Entwässerungssieben würde zu einer Erhöhung der miteinander zu vergleichenden Daten führen und letztendlich Schlussfolgerungen auf die tatsächliche Verteilung der verschiedenen Kornfraktionen ermöglichen.

### **7.2.3 Mögliche Auswertungssystematik**

Als Basis für eine zielgerichtete Auswertungssystematik mit Soll-Ist-Gegenüberstellung wird die unter Anleitung des Autors in verschiedenen Bachelor- und Masterarbeiten entwickelte Vorgehensweise empfohlen.

Hierbei sind zunächst Homogenbereiche zu definieren. Mit diesen Homogenbereichen sind Abschnitte mit gleichbleibenden geologischen und hydrologischen Randbedingungen gemeint.

Für diese Homogenbereiche können dann Schwerpunkte für die Datenauswertung festgelegt werden, abhängig von der zur Verfügung stehenden Datenquantität und Datenqualität. Wird der aktuelle Stand der Technik vorausgesetzt, lassen sich die Schwerpunkte „Geotechnisches Gutachten, Annahmen Kalkulation, Rohdaten Vortrieb, Rohdaten Förderbandwaage (FBW) und Abfuhr oder Transportdaten“

bilden. Bei den Schwerpunkten „Geotechnisches Gutachten und Annahmen Kalkulation“ handelt es sich eher um SOLL-Werte, die sich aus theoretischen Ermittlungen bzw. Berechnungen ergeben. Mit den übrigen Schwerpunkten werden IST-Werte, also tatsächliche Messwerte behandelt.

Finales Ergebnis ist eine zusammenfassende Auswertungstabelle (Tabelle 26), aus der die Relationen zwischen den Soll- und den Ist-Werten ablesbar sind.

Tabelle 26: Ergebnisse Datenauswertung 1. Untersuchungsphase [68]

Datenauswertung										
Auswertungsbereich					Auswertungsergebnisse					
Bodenart	Kennung	Gleis	Homogenbereich	Anzahl der Ringe	Angaben	Geotechn. Gutachten	Annahmen Kalkulation	Rohdaten Vortrieb	Förderband waagen	Abfuhr
GM	qe+qs	1	1.2	80	Gesamtmassen [to]	9175,33	11193,14	15719,09	12111,96	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	171,32%	132,01%	
GM	qe+qs	1	1.3	65	Gesamtmassen [to]	7471,35	9114,43	10226,16	10392,16	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	136,87%	139,09%	
GM	qe+qs	1	1.5	77	Gesamtmassen [to]	8521,55	10395,60	6966,30	16899,46	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	81,75%	198,31%	
GM	qe+qs	2	2.1	135	Gesamtmassen [to]	15544,52	18963,03	24075,02	20365,69	4467,99
					Relationswerte	100,00%	121,99%	154,88%	131,02%	28,74%
GM	qe+qs	2	2.2	45	Gesamtmassen [to]	5153,46	6286,79	8505,01	6159,99	2553,80
					Relationswerte	100,00%	121,99%	165,04%	119,53%	49,56%
GM	qe+qs	2	2.4	113	Gesamtmassen [to]	13047,07	15916,35	17113,51	14084,33	
					Relationswerte	100,00%	121,99%	131,17%	107,95%	
GTU	tmi	1	1.1	60	Gesamtmassen [to]	6628,24	7980,46	15594,78	8921,36	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	235,28%	134,60%	
GTU	tmi	1	1.4	854	Gesamtmassen [to]	92970,90	111937,70	92255,38	129079,54	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	99,23%	138,84%	
GTU	tmi	2	2.3	863	Gesamtmassen [to]	94583,94	113879,82	86316,93	126794,98	
					Relationswerte	100,00%	120,40%	91,26%	134,06%	

Hinter jeder Zahl stehen umfangreiche Berechnungen bzw. Datenauswertungen, für die jeweils eigene Tabellenblätter entwickelt worden sind. Viele Details hierzu sind den Ausarbeitungen von Wieland [68] und Uhlig [61] zu entnehmen. Werden die Datenqualität und die Datenquantität z.B. durch die Umsetzung der Empfehlungen zur Messtechnik und zur Vorgehensweise bei der Datenerfassung verbessert, so sind die entwickelten Excel-Auswertungsdateien geeignet, retrospektiv – also nach Durchörterung des jeweiligen Homogenbereiches – belastbare Daten für den tatsächlichen Bodenaushub und den tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage zu liefern. Außerdem können durch die Betrachtung der Relationswerte im Sinne eines SOLL-IST-Vergleiches Rückschlüsse auf das Zutreffen der Prognosen gezogen werden. Für einen Echtzeit-Soll-Ist-Vergleich ist die Systematik nicht geeignet, was im Wesentlichen an den weiterhin nicht gelösten Ungenauigkeiten bei den Soll-Werten liegt.

### 7.3 Empfehlungen zu vertraglichen Regelungen

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, die Abrechnungsmodalitäten durchgängig zu gestalten. Das bedeutet für den Zusammenhang zwischen dem Bodenaushub und dem Feststoffaustrag der Separieranlage sowie damit der Abfuhrmasse, dass die Abrechnung in der Regel in €/to erfolgen sollte. Um nun das bei den bisher üblichen vertraglichen Regelungen mit einer solchen Festlegung einhergehende Risiko nicht einseitig dem Auftraggeber zu überantworten, sollte ein sachlicher, fairer Mechanismus eingeführt werden, der nicht nur für das hier untersuchte Themengebiet geeignet ist. Neben der grundsätzlichen, durchgängigen Abrechnungsmodalität könnte ein solcher Mechanismus wie folgt gestaltet werden:

Im Zuge der geotechnischen Voruntersuchungen und Erstellung der resultierenden Gutachten sind für möglichst alle bekannten potentiell konfliktverursachenden Aspekte durch z.B. Simulationsversuche fixe Kennwerte zu ermitteln. So wäre hier beispielsweise zwingend ein Wert zur Dispergierung anzugeben. Mit Hilfe dieser Kennwerte sind anschließend zwingende Vorgaben für die Angebotsbearbeitung zu formulieren. Aus diesen Vorgaben ergibt sich dann im Zuge der Angebotsbearbeitung beispielsweise eine technisch nachvollziehbare Auslegung der Separieranlage. Die Möglichkeiten einer spekulativen Herangehensweise werden stark eingeschränkt.

Der entscheidende Mechanismus, der eine spekulative Herangehensweise im Übrigen ohnehin sinnlos werden lässt, spielt sich dann im Zuge der Projektabwicklung ab. Es ist von Beginn an eine unabhängige von allen Projektpartnern akzeptierte Sachverständigen-Kommission einzusetzen, die den jeweiligen Tunnelvortrieb begleitet. In regelmäßigen Abständen sowie unter Berücksichtigung von Homogenbereichen bzw. einer weiteren Unterteilung in Verfahrensbereiche wird der Vortrieb gemeinsam unter Führung der Sachverständigen analysiert. Das Zutreffen oder Nicht-Zutreffen der im Vorfeld ermittelten und als Kalkulationsbasis festgelegten Kennwerte ist als Bestandteil der Expertenbegleitung durch kontinuierliche Wiederholung der durchgeführten Simulationsversuche mit in situ genommenen Bodenproben zu überprüfen. Abweichungen können so auf einer sachlichen Grundlage festgestellt, die Folgen kurzfristig ermittelt werden. Kompensationsmöglichkeiten bei Abweichungen in alle

---

Richtungen auf Basis des Angebotes sind bereits jetzt Bestandteil der vertraglichen bzw. rechtlichen Randbedingungen für Tunnelbauprojekte.

Als Arbeitsmittel, an dem sich alle Projektbeteiligten sachlich orientieren können, sollte ein umfassendes Baugrundmodell geschaffen und stetig gepflegt und weiterentwickelt werden. Dieses Baugrundmodell spielt auch in dem „Diskussionspapier zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau“ [16] des DAUB eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich gehen die in dem Diskussionspapier formulierten Empfehlungen in die gleiche Richtung wie der hier vorgeschlagene Mechanismus zur Abrechnung des Bodenaushubs beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der Tunnelbaupraxis kommt dem Bodenmassenmanagement vor dem Hintergrund zunehmender ökologischer Anforderungen und abnehmender ökonomischer Gestaltungsspielräume eine wachsende Bedeutung zu. Dies trifft in besonderem Maße beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in feinkörnigem Baugrund zu, da durch die vielfältigen mechanischen und hydraulischen Einwirkungen auf den Bodenaushub der Umgang mit der Materie verhältnismäßig komplex ist.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit erstmalig der Prozess des Bodenmassenmanagements in einem ganzheitlichen Ansatz beschrieben, systematisiert und kategorisiert. In den Kapiteln 2 bis 5 werden die einzelnen Prozessschritte in chronologischer Reihenfolge erläutert. Zunächst wird auf die Prognose des Bodenaushubs eingegangen, wobei diese sich in die Kategorien „Geotechnische Voruntersuchungen“, „Ermittlung des theoretischen Bodenaushubs“ und „Vorhersage des Feststoffaustrags der Separieranlage“ einteilen lässt. Anschließend werden die verfahrenstechnischen Vorgehensweisen bei der Auslegung und dem Betrieb der Schildmaschine und der Separieranlage erläutert, die die eigentliche Separation des Bodenaushubs maßgeblich beeinflussen. Dann werden die Mechanismen zur Erfassung des Bodenaushubs aufgeführt, wobei zum einen mit den Erläuterungen zur automatisierten Volumenkontrolle und zur Messung des Feststoffaustrags mittels Förderbandwaagen auf die eigentliche Messtechnik eingegangen wird, zum anderen geht es um den Umgang mit den gemessenen Werten bei der Aufstellung der üblicherweise erforderlichen Bilanzierung des Bodenaushubs. Anhand der Ergebnisse durchgeführter Datenauswertungen wird aufgezeigt, dass die Qualität der derzeit aufstellbaren Volumen- oder Massenbilanz beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in feinkörnigem Baugrund den üblicherweise formulierten Anforderungen z.B. zur Beurteilung von Setzungserscheinungen nicht gerecht werden kann. Den Abschluss findet das Bodenmassenmanagement in der Tunnelbaupraxis in der meist problematischen Abrechnung. Hier werden neben den Grundlagen aus Gesetzen, Normen, Richtlinien und Empfehlungen übliche projektspezifische vertragliche Regelungen aufgeführt.

In all diesen Prozessschritten werden die maßgeblichen Schwachpunkte und Einflussfaktoren auf den Zusammenhang zwischen dem theoretischen Ausbruch der Schildmaschine und dem tatsächlichen Feststoffaustrag der Separieranlage

herausgearbeitet. Zu Beginn des Kapitels 6 werden die identifizierten Einflussfaktoren zusammengestellt und entweder einer geotechnischen, maschinentechnischen oder verfahrenstechnischen Kategorie zugeordnet, um die komplexe Materie übersichtlicher und handhabbarer zu gestalten. Es wird herausgearbeitet, dass die Dispergierung eine besondere Rolle in verschiedenen Prozessschritten des Bodenmassenmanagements spielt. Daher wird die Dispergierung im Folgenden vollumfänglich untersucht. Nach der Darstellung der relevanten Grundlagen und einer für den Tunnelbau geeigneten Definition wird die Entwicklung und Durchführung eines neuen Versuches zur Feststellung der Dispergierungsneigung verschiedener Böden und Gesteine erläutert. Die Ergebnisse von über 270 Versuchen werden vorgestellt und analysiert. Eine erste wesentliche Schlussfolgerung hieraus ist, dass der Dispergierungsversuch grundsätzlich zur Detektion der Dispergierungsneigung verschiedener feinkörniger Böden und Gesteine geeignet ist. Erstmals kann somit eine qualitative Beurteilung und damit Prognose der in der Tunnelbaupraxis zu erwartenden Dispergierung basierend auf nachvollziehbar und reproduzierbar ermittelten Versuchsergebnissen erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Einschätzung der Dispergierungsneigung auf Basis der in der Regel ohnehin im Vorfeld eines Tunnelbauprojektes zu ermittelnden charakteristischen Kennwerte für die Plastizität und die Konsistenz möglich.

In Kapitel 7 werden basierend auf den Ergebnissen dieser Ausarbeitung Empfehlungen für die Tunnelbaupraxis formuliert. In Bezug auf die geotechnischen Voruntersuchungen wird empfohlen, bei Tunnelbauprojekten mit den passenden Randbedingungen sowohl den neuen Dispergierungsversuch systematisch durchzuführen als auch auf die Prognosemöglichkeit anhand des aufgezeigten Zusammenhangs zwischen der Dispergierung und der Plastizität sowie Konsistenz zurückzugreifen. Bzgl. der spezifischen Verfahrenstechnik wird empfohlen, die messtechnische Erfassung nach Möglichkeit mehrfach redundant auszubilden. Hierauf aufbauend werden dann auch eine Vorgehensweise zur Datenerfassung und eine Auswertungssystematik angeboten. Zuletzt folgen Empfehlungen zu vertraglichen Regelungen im Hinblick auf eine sachliche, faire Abrechnung des Bodenaushubs beim flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in feinkörnigem Baugrund.

Bei der in dieser Ausarbeitung behandelten Problematik handelt es sich um einen Themenkomplex aus der Praxis, die Untersuchungen und insbesondere die

---

Empfehlungen sind daher konsequenterweise direkt an die Tunnelbaupraxis gerichtet. Inwieweit sich die verschiedenen Verbesserungsvorschläge tatsächlich umsetzen lassen und zu der angestrebten Verbesserung führen, kann nur durch konsequente Umsetzung eruiert werden. Auch die Schärfung und Weiterentwicklung des Dispergierungsversuches sollten in Wissenschaft und Praxis weiter vorangetrieben werden. Während sich die neu entwickelten oder neu zusammengestellten technischen Aspekte erst nach und nach etablieren lassen, so wäre die Umsetzung der vertraglichen Empfehlungen auch kurzfristig möglich und im Sinne einer Verbesserung der Kultur des Bauens wünschenswert.

---

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] ASTM (2017): *Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer*. Designation: D 4221 – 17
- [2] ASTM (2016): *Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks*. Designation: D 4644 – 16
- [3] ASTM (2013): *Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*. Designation: D 4647/4647M – 13
- [4] ASTM (2013): *Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test*. Designation: D 6572 – 13
- [5] Baumgärtel, T.; Fillibeck, J.; Vogt, N. (2012): *Zerfall von festen Tonen und Tonsteinen bei hydraulischer und mechanischer Beanspruchung*, Geomechanics and Tunneling 5 (2012), S. 567 – 573, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [6] Becker, T. (2006): *Tunnel U4 HafenCity Hamburg – Ermittlung der Abfuhrmassen - Angebotsbearbeitung*, Unveröffentlichte firmeninterne Ausarbeitung aus der Angebotsbearbeitungsphase des Projektes
- [7] Bell, F. G.; Maud, R. R. (1994): *Dispersive Soils: a review from a South African perspective*, Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, S. 195 – 210, The Geological Society, London
- [8] Bell, F. G.; Walker, D. J. H. (2000): *A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa*, Quarterly Journal of Engineering Geology, 33, S. 187 – 199, The Geological Society, London
- [9] Brehm; Bienert (2006): *U4 HafenCity, Ausfädelung Jungfernstieg, 1. Bericht, Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten sowie Schadstoffbeurteilung*, Hamburg, unveröffentlicht

- 
- [10] Bundesanstalt für Straßenwesen - BaSt (2014): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5 Tunnelbau*
- [11] Bundeskanzleramt Rechtsinformationssystem (2016): *Bundesgesetz über die Vergabe von Aufträgen (BVerG) 2006, Fassung vom 21.12.2016*
- [12] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2016): *Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkung (GWB)*
- [13] Deutsche Bahn (DB) (2005): *Richtlinie 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten.*
- [14] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) (1993): *Empfehlungen für die Planung, Ausschreibung und Vergabe von schildgestützten Tunnelvortrieben.* Tunnel 2/93, S.91-96
- [15] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) (2010): *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen.* Tunnelbau-Taschenbuch 2011
- [16] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) (2014): *Diskussionspapier zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau.* <http://www.daub-ita.de/publikationen/empfehlungen/>
- [17] Dietz, K. (2014): *Development of a probabilistic model for evaluation and quantification of spalling processes at concrete surfaces in tunnels under fire loads.* Bochum, unveröffentlichte Masterarbeit
- [18] DIN 1319-3, Ausgabe Mai 1996. *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße; Meßunsicherheit.* Berlin: Beuth Verlag.
- [19] DIN 1960, Ausgabe September 2012. *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen.* Berlin: Beuth Verlag.

- 
- [20] DIN 18122-01, Ausgabe: 1997-07. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze*. Berlin: Beuth Verlag.
- [21] DIN 18122-02, Ausgabe 2000-09. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze*. Berlin: Beuth Verlag
- [22] DIN 18123, Ausgabe 2011-04. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [23] DIN 18125-1, Ausgabe Juli 2010. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Laborversuche*. Berlin: Beuth Verlag.
- [24] DIN 18125-2, Ausgabe März 2011. *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche*. Berlin: Beuth Verlag.
- [25] DIN 18196, Ausgabe: 2011-05. *Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*. Berlin: Beuth Verlag.
- [26] DIN 18299, Ausgabe September 2012. *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art*. Berlin: Beuth Verlag.
- [27] DIN 18312, Ausgabe August 2015. *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [28] DIN 55607, Ausgabe: 2007-06. *Pigmente und Füllstoffe – Dispergierung von Pigmenten in Pulverlacken und deren farbmessige Beurteilung nach der Applikation*. Berlin: Beuth Verlag.
- [29] DIN EN 1997-2, Ausgabe: 2010-10. *Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*. Berlin: Beuth Verlag.

- 
- [30] DIN EN 22475-1, Ausgabe: 2007-01. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [31] DIN EN 60051-1, Ausgabe: 1999-10. *Direkt wirkende anzeigende elektrische Meßgeräte und ihr Zubehör, Messgeräte mit Skalenanzeige*. Berlin: Beuth Verlag.
- [32] Feinendegen, M.; Stanjek, H.; Spagnoli, G. (2009): *Gutachterliche Stellungnahme zur Dispergierungsneigung*, Aachen, unveröffentlicht
- [33] Feinendegen, M.; Ziegler, M.; Weh, M.; Spagnoli, G. (2011): *Verklebung beim EPB-Vortrieb: Einflüsse, Klassifikation und neue Manipulationsverfahren*, Forschung + Praxis: STUVA-Tagung 2011
- [34] Fischdick, M. (2014): *Erweiterung des Siebtrommelversuches zur Bestimmung der Dispergierungsneigung feinkörniger Böden*. Bochum, unveröffentlichte Masterarbeit
- [35] Franklin, J.; Chandra, R. (1972): *The Slake Durability Test*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. S. 325-341
- [36] Girmscheid, G. (2010): *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- [37] Gundelach, V.; Litz, L. (1999): *Moderne Prozeßmeßtechnik*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg
- [38] Hahn, N. (2016): *Numerical evaluation and quantification of a probabilistic model for settlement predictions*. Bochum, unveröffentlichte Masterarbeit
- [39] Herzel, P. (2002): *Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Zerfallsbeständigkeit von Gestein - Siebtrommelversuch*. Bautechnik, Band 79, Heft 2, S. 101-105

- 
- [40] Hollmann, F. (2015): *Bewertung von Boden und Fels auf Verklebungen und Feinkornfreisetzung beim maschinellen Tunnelvortrieb*. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2015-01, Shaker Verlag, Aachen  
Dissertation
- [41] Jodehl, A. (2015): *Untersuchung der Dispergierungsneigung verschiedener feinkörniger Böden unter Verwendung eines modifizierten Siebtrommelversuches*. Bochum, unveröffentlichte Masterarbeit
- [42] König, D. (2014): *Bericht zur Bodenklassifizierung von Versuchsböden*. Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, unveröffentlicht
- [43] Leshchinsky, D.; Richter, S. D.; Fowler, J. (1992): *Clay Lumps under Simulated Hydraulic Transport Conditions*, Geotechnical Testing Journal 15 (1992), No. 4, pp. 393-398
- [44] Lipka, K. (2009): *Untersuchung zur Dimensionierung von Separieranlagen im Tunnelbau*, Bochum, unveröffentlichte Diplomarbeit
- [45] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; et al (2011): *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. Ernst & Sohn Verlag
- [46] Möbius, C. (1977): *Bentonit Suspensionen - Eigenschaften, Herstellung und Prüfung*, Österreichische Ingenieurzeitschrift, Nr. 20, S. 73-82
- [47] MS (2011): *HMJV Crossrail C310 Sizing of FP section*, unveröffentlichte firmeninterne Präsentation aus der ECI-Phase des Projektes
- [48] Nickmann, M. (2009): *Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten*. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen 12. Reihe B, Ingenieurgeologie Hydrogeologie Geothermie, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, Dissertation
- [49] Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2013): *ÖNORM B 2110 – Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen - Werkvertragsnorm*. Wien

- 
- [50] Österreichisches Normungsinstitut (ON) (2005): *ÖNORM B 2203-2 – Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Wien
- [51] Pipe 9 JV (2016): *Spoil Treatment and Arisings Management Plan*, Unveröffentlichte firmeninterne Ausarbeitung aus der ECI-Phase des Projektes "Humber Crossing"
- [52] Placzek, D. (2010): *Anforderungen an die Baugrunderkundung für Schildvortriebe*, Geomechanics and Tunneling, No. 3, S. 308 - 317
- [53] Prinz, H., Strauß, R. (2006): *Abriss der Ingenieurgeologie*. 4. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- [54] RWTH (2012): *Kennwerte London Clay*. RWTH Aachen, Institut für Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, unveröffentlicht
- [55] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein - SIA (2013): *SIA Norm 118 Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten*. Zürich
- [56] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein - SIA (2004): *SIA Norm 198 Untertagbau*. Zürich
- [57] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein - SIA (2015): *SIA Norm 199 Erfassen des Gebirges im Untertagbau*. Zürich
- [58] Stieß, M. (2009): *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*, Springer Verlag, Berlin
- [59] Thewes, M. (1999): *Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden*, Berichte aus Bodenmechanik und Grundbau der Bergischen Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bd. 21, Shaker Verlag, Aachen, Dissertation
- [60] Uden, T. (2010): *Bodenmassenmanagement bei flüssigkeitsgestütztem Schildvortrieb bei der U-Bahnanbindung der HafenCity in Hamburg*, Oldenburg, unveröffentlichte Masterarbeit

- 
- [61] Uhlig, M. (2013): *Zusammenhang zwischen theoretischen Ausbruchmassen und tatsächlichen Abfuhrmassen bei flüssigkeitsgestützten Schildvortrieben in bindigen Böden*, Biberach, unveröffentlichte Masterarbeit
- [62] Wehrmeyer, G. (2000): *Zur Kontrolle der geförderten Aushubmassen beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden*, Bochum, Dissertation
- [63] Wehrmeyer, G.: (2006) *Förderkreisläufe beim maschinellen Tunnelvortrieb*. Taschenbuch für den Tunnelbau, Essen, VGE Verlag, S. 208-236
- [64] Weiner, T.; Thewes, M. (2015): *Prediction of the dispersion of soil in slurry shield tunneling*. SEE Tunnel – Promoting Tunnelling in SEE Region – Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2015, Dubrovnik, Verlag: HUBITG, S. 378 - 379
- [65] Weiner, T. (2015): *Untersuchung und Prognose der Dispergierung feinkörniger Böden bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust im Schildvortrieb*. Forschung + Praxis 46 – Vorträge der STUVA-Tagung 2015, S. 125 - 130
- [66] Weiner, T.; Thewes, M. (2017): *Neue Methode zur Prognose der Dispergierung von Feinstkorn in einer Stützflüssigkeit beim maschinellen Tunnelbau*. Forschung + Praxis 49 – Vorträge der STUVA-Tagung 2017, S. 163 – 167
- [67] Weiz, M. (2013): *Erweiterung des Siebtrommelversuches im Hinblick auf die Prognose von Verklebungen und Feinkornanfall bei maschinellen Schildvortrieben im Tunnelbau*. Bochum, unveröffentlichte Masterarbeit
- [68] Wieland, J. (2012): *Zusammenhang zwischen theoretischen Ausbruchmassen und tatsächlichen Abfuhrmassen bei einem flüssigkeitsgestützten Schildvortrieb in Hamburg*, Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit