

Strukturbedingte geotechnische Eigenschaften von
Controlled Low Strength Material
für Dichtungen in Deichen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Friedemann Sandig
(Großenhain/Sachsen)

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt, Weimar
2. Prof. Dr. techn. D. Adam, Wien
3. Prof. Dr.-Ing. R. Thiele, Leipzig

Tag der Disputaion: 7. November 2014

Vorwort des Herausgebers

Zur Nutzung und Schonung natürlicher Ressourcen werden im Erd- und Grundbau die Eigenschaften natürlicher Böden und bodenähnlicher Rezyklate gezielt manipuliert. Die Verbesserung von Boden und Baugrund ist zu einem lohnenswerten Experimentier- und Forschungsfeld der Geotechnik geworden. Eine Linie geht dabei sehr erfolgreich in Richtung der Geokunststoffe, in die Nutzung der Verbundeigenschaften aus Boden und Kunststoffbewehrung. Eine andere Richtung nutzt Bindemittel, die dem Boden zur gezielten Steuerung der mechanischen Eigenschaften beigemischt werden.

Eine Anwendung ist die Aufbereitung eines Boden-Bindemittel-Gemisches zu einer Art Mörtel, der mit dem Abbinden gezielt eine nur geringe Festigkeit entwickelt und eine gewisse Plastizität beibehält. Dies hat sich für Anwendungen bewährt, bei denen man nicht verdichten kann oder will. Erdbeton, Flüssigboden, Bodenmörtel sind deutsche Begriffe oder Patente auf diesem Gebiet. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen hat hierfür den sperrigen Begriff Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe aus Böden und Baustoffen (ZSFV) eingeführt.

Herr Sandig hat im Rahmen seiner Doktorarbeit die Grundlagen zu solchen Materialien experimentell und theoretisch untersucht. Sein Anwendungsfeld ist die mineralische Abdichtung im Deichbau. In seiner Dissertation hat er den in der angelsächsischen Literatur verwendeten Begriff Controlled Low Strength Material (CLSM) verwendet, aus dem zumindest hervorgeht, dass eine geringe Festigkeit der mechanische Wesenskern dieser Bodenverbesserung ist.

An verschiedenen Materialien hat er umfangreiche geotechnische Labor- und Feldversuche durchgeführt. Ziel war, das mechanische Verhalten solcher Gemische von der Frischsuspension bis zum erhärteten Material zu verstehen, zu begreifen, zu erklären, zu beschreiben, um mit dieser Kenntnis optimale Rezepturen in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften und Materialanforderungen zu entwerfen. Der Überbegriff lautet Designboden, von der Verflüssigung und dem Einsatz von herkömmlichen Bindemitteln kommend, die mit der Hydratation die gewünschte Festigkeit bewirken.

In der Literatur und in Projektakten der Praxis gibt es bereits viele Untersuchungen zu derartigen Materialien. Es handelt sich meist um objektspezifische Eignungsprüfungen, die keine allgemeingültigen Erkenntnisse liefern und nicht dem wissenschaftlichen Anspruch genügen. Herr Sandig ist das Thema sehr grundlegend angegangen. Das Neue und Besondere an dieser Arbeit ist, dass systematisch und nahezu erschöpfend mit präzisen bodenmechanischen Standardversuchen der Zusammenhang zwischen der Struktur des Materials und seinem mechanischen Verhalten aufgezeigt wird, vom Ausgangszu-

stand des Bodens über die Verflüssigung durch suspendiertes Bindemittel bis zur Aushärtung. Ohne die bodenmechanische Brille abzulegen bringt Herr Sandig viele Aspekte Bementechnologie erkenntnisbringend ein.

Die Arbeit ist an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, HTWK, entstanden. Dort wurde sie von Prof. Ralf Thiele in Zusammenhang mit einem Forschungsprojekt initiiert, dort wurden die umfangreichen und präzisen Versuche durchgeführt. Ich durfte Herrn Sandig als externen Doktoranden mit betreuen. Hier das Ergebnis, das uns im Verständnis des Materialverhaltens von Boden-Bindemittel-Gemischen und bei der Suche nach technisch wirtschaftlich optimierten Rezepturen einen großen Schritt weiterbringt.

Weimar, Januar 2015

Karl Josef Witt

Vorwort des Verfassers

Innerhalb dieser Arbeit wird am Beispiel des Flussdeichbaus dargestellt, dass die aktuellen technologischen Grundprinzipien einer strukturellen Aufmischung von Bestandmaterial nur für die Herstellung vertikaler Dichtwände den Stand der Technik abbilden. Für die optimalere Lösung des Einbaus geneigter, innenliegender Dichtungen kann eine technologische Methode aus dem Bereich des Rohrgrabenbaus angewendet werden. Diese zielt auf die vorübergehende Bodenverflüssigung und definierte Verbesserung der Bodeneigenschaften. Die herkömmlichen und als Controlled Low Strength Material bezeichneten Gemische sind jedoch für den Einsatz als Flussdeichdichtung in bestimmten Eigenschaften gezielt zu verändern.

Dabei wird deutlich, dass die für natürliche Mineralbaustoffe formulierten Anforderungen für diese Materialien nicht genügen oder nicht anwendbar sind. Diese Dissertation behandelt die Erfassung und Beschreibung der mechanischen Eigenschaften einer Deichdichtung aus Controlled Low Strength Material und die systematischen Ansätze der Kennwertbeeinflussung. Es werden stoffliche und mechanische Eigenschaften definiert sowie eine neue Methode der zweidimensionalen, strukturellen Bewertbarkeit vorgestellt.

Der Schwerpunkt der Experimente liegt auf dem verfestigten Material und orientiert sich an klassischen bodenmechanischen Methoden. Zusätzlich werden mehrere - für den Bereich der Bodenprüfung nicht übliche - Modelle, Verfahrens- und Sichtweisen genutzt. Für dieses dann in seinen Eigenschaften definierte Stoffgemisch wird abschließend eine Bewertung der praktischen Eignung als geneigte Innendichtung anhand von Freilandversuchen an einem Versuchsdeich vorgenommen.

Ich danke allen Mitarbeitern der G² Gruppe Geotechnik am Institut für Grundbau und Verkehrsbau sowie den zahlreichen Studenten der HTWK Leipzig für deren Unterstützung, gedankliche Mitarbeit und persönlichen Einsatz innerhalb dieser Forschungsthematik.

Für die überaus großzügigen Hilfeleistungen neben dem aktuellen Tagesgeschäft möchte ich allen Beteiligten für die nicht nur kräftezehrenden Hilfeleistungen an der Versuchsanlage danken, ganz besonders Herrn Fohgrub, Strabag Niederlassung Leipzig, für seinen persönlichen Einsatz. Für die Herstellung der Dichtungsmischungen danke ich den Mitarbeitern der Parcoplan GmbH. Innerhalb dieser Arbeit konnten ein Algorithmus zur ebenen Partikelsimulation und ein Messsystem für Untersuchungen zum kapillaren Unterdruck genutzt werden. Für die Bereitstellung und die kleinen begleitenden Diskussionen bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Slowik, HTWK Leipzig, sowie Herrn M. Schmidt, Ph.D., Hochschule Darmstadt. Die Möglichkeit der Ultraschallmessungen verdanke ich Frau Dr. A. Damaschke, MFPA Weimar.

Meinem Mentor, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt, danke ich besonders für die anregenden Gespräche zur Thematik und weit darüber hinaus. Ebenso möchte ich mich sehr bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. D. Adam, TU Wien, für seine Offenheit und präzisen Hinweise während der Erstellung der Arbeit bedanken. Besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Thiele, HTWK Leipzig, für seine für mich wegweisende Begleitung und sein tiefes Vertrauen sowie seine freundschaftliche Hilfe. Meinen Eltern danke ich für alle Formen der ständigen Unterstützung, meinem Vater für die mühevollen Korrekturarbeit.

Ein ganz besonderer und liebevoller Dank gilt meiner lieben Nora und meinen Kindern.

Leipzig, Dezember 2014

Friedemann Sandig

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	I
Vorwort des Verfassers.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Symbole und Abkürzungen	IX
Kapitel 1 - Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Wissenschaftliche Fragestellungen und Ziel der Arbeit	4
1.3 Strategie und Methoden	6
Kapitel 2 - Grundlagen	8
2.1 Oberflächendichtungen in Deichen.....	8
2.1.1 Begriffliche Abgrenzung	8
2.1.2 Dichtungsbaustoffe im Deichbau.....	9
2.1.3 Anforderungen, Einbau und Prüfung von Oberflächendichtungen	11
2.1.4 Aktueller Kenntnisstand	14
2.1.5 Einordnung in aktuelles Regelwerk	19
2.2 Bodenstabilisierung durch nasse Bodenmischverfahren	20
2.2.1 Begriffliche Abgrenzung	20
2.2.2 Historische Entwicklung.....	22
2.2.3 Anwendungsbereiche.....	24
2.2.4 Aktueller Kenntnisstand	25
2.2.5 Einordnung in aktuelles Regelwerk	32

2.3	Bodenverbesserung durch Controlled Low Strength Materials.....	33
2.3.1	Begriffliche Abgrenzung.....	33
2.3.2	Historische Entwicklung.....	34
2.3.3	Anwendungsbereiche.....	37
2.3.4	Aktueller Kenntnisstand.....	37
2.3.5	Einordnung in aktuelles Regelwerk.....	44
2.3.6	Abgrenzung und Verwandtschaften zu anderen Baustoffen.....	45
2.4	Zusammenfassende Bemerkungen.....	46
Kapitel 3 - Definition und Beschreibung von Controlled Low Strength Material		47
3.1	Vorbemerkungen.....	47
3.2	Strukturmerkmale.....	47
3.2.1	Die Betrachtungsebenen.....	47
3.2.2	Kornform und Grenzflächenkorrekturbeiwert.....	53
3.3	Charakteristische Merkmale.....	56
3.3.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe.....	56
3.3.1.1	Basismaterial.....	56
3.3.1.2	Zement.....	58
3.3.1.3	Bentonit.....	59
3.3.1.4	Mischwasser.....	61
3.3.2	Charakterisierung der Mischungen.....	61
3.3.3	Grundlegende Besonderheiten.....	66
3.3.4	Zur begrifflichen Abgrenzung der Materialalter.....	67
3.3.5	Rheologisches Stoffverhalten des frischen Materials.....	70
3.3.6	Grundverhalten des verfestigten Materials unter Lasteinwirkung.....	73
3.4	Die Modellierung von Packungsdichten.....	77
3.4.1	Vorbemerkungen.....	77
3.4.2	Grundlagen der Modellierung von Einkorn- und Mehrkornpackungen.....	77
3.4.3	Zufallsbedingte 2D-Modellierung des Einzelkornanteils von CLSM.....	82
3.4.4	Zur Schnittkreis- und Partikelgrößenverteilung.....	84
3.4.5	Anwendung des ebenen Packungsdichtemodells.....	85
3.5	Zusammenfassende Bemerkungen.....	90

Kapitel 4 - Eigene Untersuchungen an CLSM	91
4.1 Vorbemerkungen	91
4.1.1 Untersuchungsumfang	91
4.1.2 Bemerkungen zum Umgang mit dem Prüfmaterial	92
4.2 Experimente an frischen CLSM.....	93
4.2.1 Wassergehalts- und Dichtebestimmungen.....	93
4.2.2 Versuche zur Entmischungsneigung.....	94
4.2.3 Konsistenzuntersuchungen	95
4.3 Experimente an jungen CLSM.....	97
4.3.1 Versuche zur Ermittlung Kapillardrücken	97
4.3.2 Kornabstandsmessungen an Materialschnitten	100
4.4 Experimente an verfestigten CLSM.....	105
4.4.1 Einaxiale Druckfestigkeitsversuche.....	105
4.4.1.1 Zum Korrelationswert der einaxialen Druckfestigkeit	105
4.4.1.2 Festigkeitsbereiche und zeitliche Entwicklung	106
4.4.1.3 Einfluss der Prüfkörpergeometrie.....	109
4.4.1.4 Einfluss des Einzelkorns	111
4.4.1.5 Beschreibung des Bruchverhaltens.....	112
4.4.1.6 Festlegung und Eingrenzung des E_u -Moduls.....	113
4.4.1.7 Ultraschallgeschwindigkeiten.....	115
4.4.2 Eindimensionale Kompressionsversuche.....	119
4.4.2.1 Vorbetrachtung.....	119
4.4.2.2 Versuchsdurchführung	119
4.4.2.3 Beobachtung eines strukturellen Kollapses.....	120
4.4.2.4 Druck-Setzungs-Verlauf.....	121
4.4.2.5 Steifemoduln unter verhinderter Seitendehnung	122
4.4.3 Rahmenscherversuche	124
4.4.3.1 Vorbetrachtung und normative Festlegungen.....	124
4.4.3.2 Festigkeitsbereiche und zeitliche Entwicklung	125
4.4.3.3 Interpretation von Restscherfestigkeiten	132
4.4.3.4 Einfluss des Einzelkorns	135
4.4.4 Veruche zur Bewertung der Tragfähigkeit	136

4.4.4.1	Statische Plattendruckversuche	136
4.4.4.2	Dynamische Plattendruckversuche	139
4.4.4.3	CBR-Versuche	141
4.4.5	Wasserdurchlässigkeitsversuche	143
4.5	Prüfung der Praxistauglichkeit von CLSM.....	147
4.5.1	Allgemeines zur Versuchsanlage	147
4.5.1.1	Konzept und Aufbau einer Versuchsanlage.....	147
4.5.1.2	Herstellung und Einbau der CLSM-Dichtungen	149
4.5.1.3	Messtechnik und Datenmanagement	150
4.5.2	Untersuchungsschwerpunkte.....	151
4.5.2.1	Abschätzung des Rissrisikos junger CLSM-Dichtungen.....	151
4.5.2.2	Hydraulische Gesamtbewertung des Systems	152
4.5.2.3	Austrocknungs- und Frostgefahr eingebauter CLSM.....	155
Kapitel 5	- Steuerung mechanischer Eigenschaften von CLSM-Dichtungen	157
5.1	Vorbemerkungen	157
5.2	Struktur und Stoffcharakter während der Herstellung.....	158
5.3	Mechanische Eigenschaften im Einbauzustand	162
Kapitel 6	- Zusammenfassung und Ausblick	187
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	199
Quellenverzeichnis	201
Anlagen	215
