
Fachtagung

Bodenbehandlung mit Bindemitteln

Schweinfurt, 22. Januar 2020

Thema:

Sofortige Freigabe von zementstabilisierten Schichten für den Baustellenverkehr

Prof. Dr. Carlo Rabaiotti

Kontakt:

Prof. Dr. Carlo Rabaiotti
Hochschule für Technik Rapperswil Schweiz
Oberseestraße 10
CH-8640 Rapperswil Jona
Fon: +41 (55) 222 49 75
Fax: +41 (55) 222 44 00
E-Mail: carlo.rabaiotti@hsr.ch
www.hsr.ch

Prof. Dr. Carlo Rabaiotti



- Prof. Dr. Carlo Rabaiotti ist seit 2017 Professor für Geotechnik an der "Hochschule für Technik Rapperswil" HSR sowie CEO der Firma terraqua engineering AG (www.terraqua.com).
- Seinen Masterabschluss als Bauingenieur erwarb er an der Universität Parma (Italien) im Jahr 2002. Sein Doktorat schloss er an der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Dr. Alexander Puzrin im Jahr 2008 ab.
- Zuvor war er 8 Jahre als Teamleiter in der Firma Basler & Hofmann sowie Lehrbeauftragter von zwei Kurse an der ETH Zürich tätig.
- Seine Hauptprojekte waren die Foundationen und Baugruben für mehrere Hochhäuser und Industriebauten in der Schweiz (z.B. Vulcano in Zürich) und in Israel (Midtown, Ahstron und Menora-Türme), sowie die Planung der Unterfangungen des neuen unterirdischen Bahnhofs RBS in Bern und das Hangsicherungstragwerk "ETH GLC" in Zürich.
- Er war verantwortlich für die Planung der Baugrube für den Zwischenangriff des Koralm-Basistunnels in Österreich und diente als Prüfingenieur für mehrere ENSI (Eidgenössische Nuklear Sicherheitsinspektorat) und NEAT Projekte.
- Seine Forschungsschwerpunkte sind fortschrittliche Überwachungssysteme im Tiefbau, insbesondere Glasfaseroptik, inverse Analyse, numerische Methoden sowie die Entwicklung von Stoffmodelle für Boden und Asphalt (insbesondere Hyperviscoelasticity).
- Derzeit betreut er auch eigene Doktoranden an der HSR in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und Clemson University (USA).
- Den Praxis Bezug pflegt er weiterhin in der eigenen Firma terraqua engineering AG, durch die Mitarbeit an die Planung wichtiger Bauvorhaben.

Sofortige Freigabe von zementstabilisierten Schichten nach dem Einbau für den Baustellenverkehr



20/01/2020

Prof. Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung 22. Januar 2020, Schweinfurt

Inhalt

- Einleitung
- Erkenntnisse aus der Literatur
- Materialwahl und Stabilizationsmerkmale
- Zyklische Triaxiale und Vierpunkt Biegezugversuche
- In Situ Versuche
- Erkenntnisse aus der Modellierung
- Schlussfolgerungen

EINLEITUNG

3

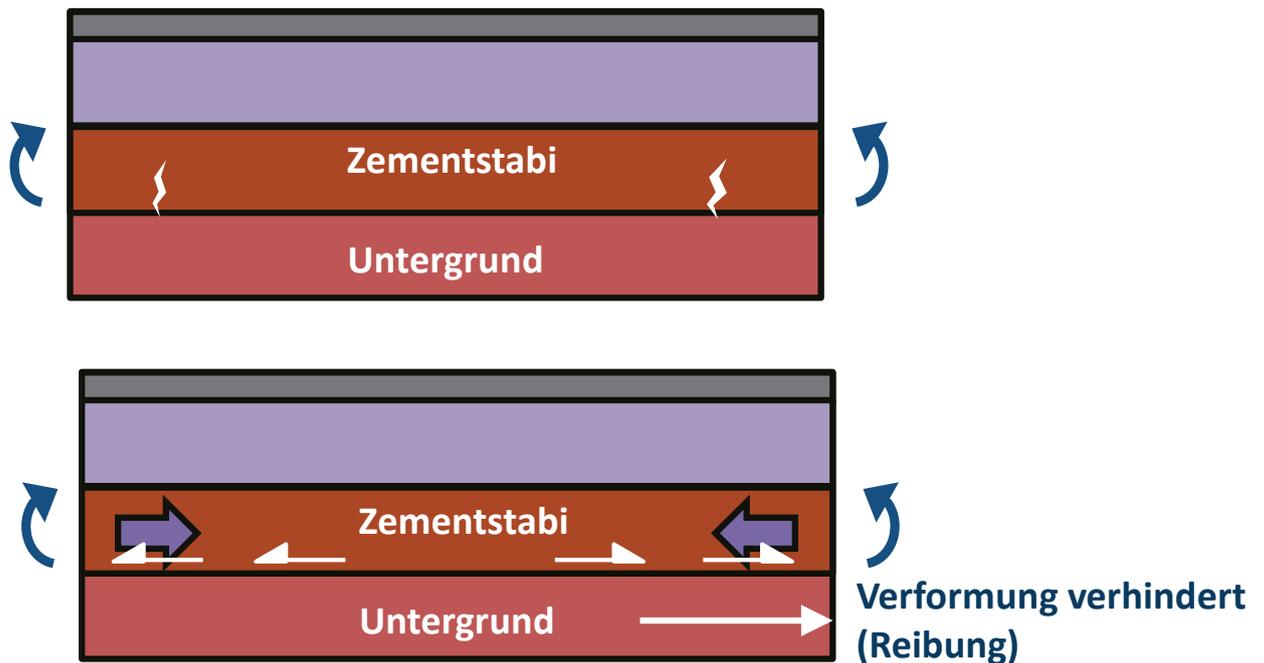
Ausgangslage

Deckschicht



- + Erhöhung Festigkeit / Steifigkeit
- + Frostbeständigkeit
- Lange Bauzeiten (Keine Befahrbarkeit für 7 Tage)

Probleme: Reflexionsrisse und Schwindrisse



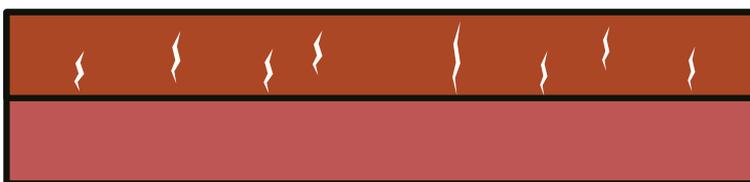
20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

5

Induzierte Mikrorissbildung

- 2 – 3 Überrollungen der Vibrowalze nach 1 – 2 Tage Abbindezeit
- Reduktion der Steifigkeit bis zu 60%



- Rissbreite ↓
- Reflective Cracking ↓
- Crack healing → Langzeitverhalten bleibt gleich

20/01/2020

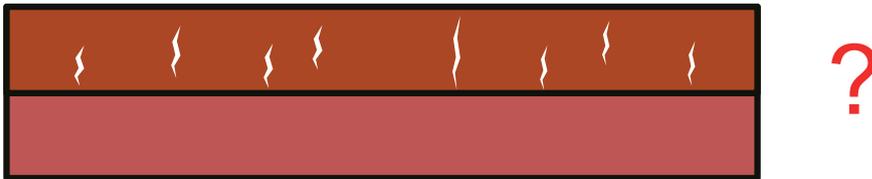
Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

6

Induzierte Mikrorissbildung

Frühbefahren vom Baustellenverkehr?

- Bessere Verteilung der Risse
- Kurzfristiger Verlust Steifigkeit und Festigkeit
- Noch keine Erfahrungen in der Literatur



Ähnliche Effekte als Pre-Cracking?

- Reduktion vom reflective cracking
- Reduktion der Bauzeiten

LITERATUR

Erkenntnisse aus der internationalen Literatur

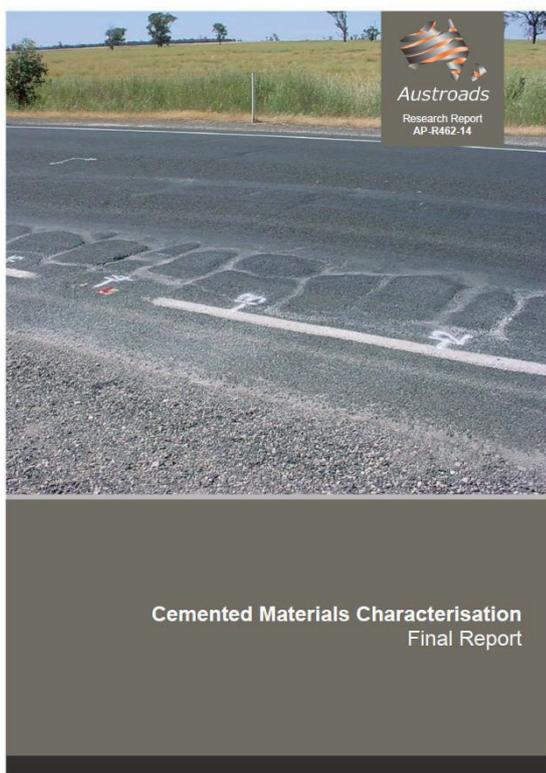
- Im USA, EU, Australia bereits mehrere Erfahrungen mit Pre-Cracking (induzierte Rissen) während dem Abbindeprozess des stabilisierten Materials
- Schwind- und Ermüdungsriss sind ein zentrales Thema, sowie die Entwicklung der Zugfestigkeit des Materials
- International generell grosse Abweichungen in der Dosierung und Zusammensetzung des stabilisierten Materials
- Heutzutage ist Australien führend in der Forschung (Austroads <http://www.austroads.com.au/>)

20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

9

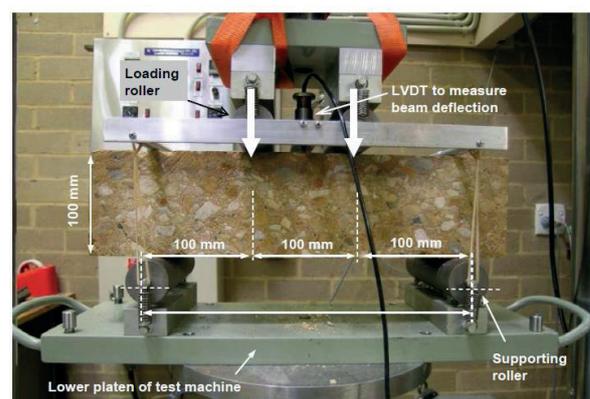
Erkenntnisse aus der internationalen Literatur



Abstract

This report brings together five years of research into the modulus, strength fatigue characteristics of cement treated granular materials as used in road pavements. Laboratory procedures used to prepare, cure and test materials for flexural modulus, flexural strength and flexural fatigue behaviour of cemented material beams are reported together with the test results.

Based on the laboratory results, a framework for the revision of the *Guide to Pavement Technology – Part 2: Pavement Structural Design* has been suggested and the proposed revised text of the Guide has been prepared.



20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

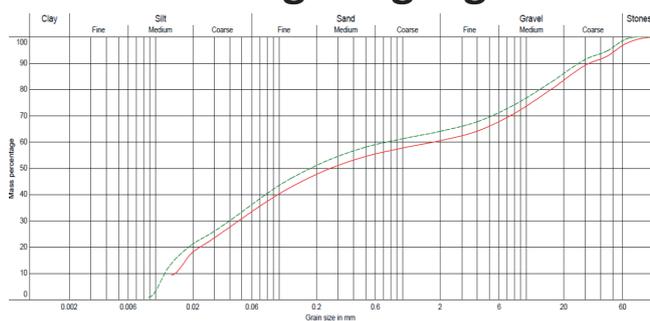
10

MATERIALWAHL UND STABILISATIONSMERKMALE

11

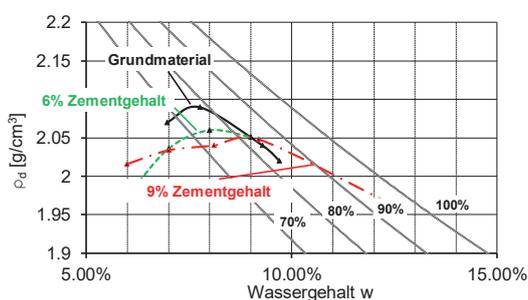
Stabilisierungsmerkmale

Kornverteilung Ausgangsmaterial



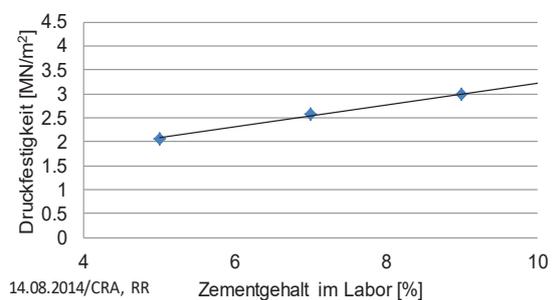
Proctor Versuche

Proctor Test an Grund- und Zementstabilisierten Boden



Druckfestigkeit

Druckfestigkeit (Mittelwerte)



Resultate aus CBR Versuche

Grundmaterial		
	$I_{CBR, 2.5\text{ mm}}$	$I_{CBR, 5\text{ mm}}$
	[%]	[%]
Probe 1	8	10
Probe 2	7	10
Probe 3	9	14
Mittelwert	8	11
s	1	2

CBR Frost, Stabilisiert mit 6% Zement, verdichtet eine Woche nach der Mischung				
	$I_{CBRF, 2.5\text{ mm}}$	$I_{CBRF, 5\text{ mm}}$	$I_{CBR} / I_{CBRF, 5\text{ mm}}$	$I_{CBR} / I_{CBRF, 5\text{ mm}}$
	[%]	[%]	[%]	[%]
Probe 1	60	55		
Probe 2	50	45		
Probe 3	65	60		
Mittelwert	58	53	0.82	0.80
s	6.24	6.24		

Stabilisiert mit 6% Zement, verdichtet eine Woche nach der Mischung		
	$I_{CBR, 2.5\text{ mm}}$	$I_{CBR, 5\text{ mm}}$
	[%]	[%]
Probe 1	64	65
Probe 2	78	68
Mittelwert	71	66
s	7	1

Stabilisiert mit 9% Zement, verdichtet eine Woche nach der Mischung		
	$I_{CBR, 2.5\text{ mm}}$	$I_{CBR, 5\text{ mm}}$
	[%]	[%]
Probe 1 (*)	40	41
Probe 2 (*)	43	43
Probe 3 (**)	54	57
Probe 4 (**)	62	64
Mittelwert (*)	42	42
s	2	2
Mittelwert (**)	58	61
s	6	5

(*) 9 % Wassergehalt
 (**) 8 % Wassergehalt

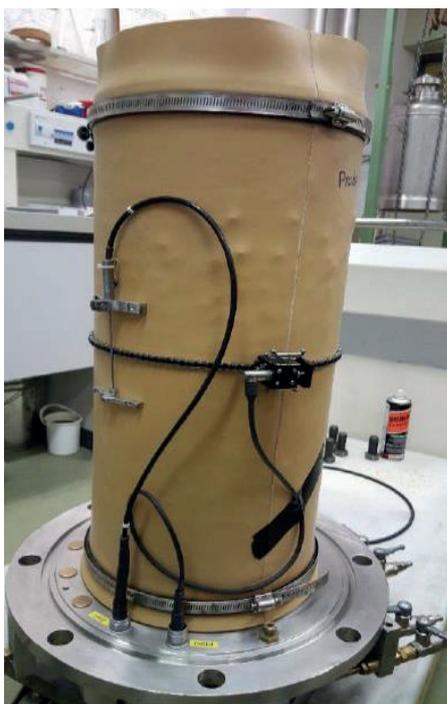
Fazit aus CBR Versuche

- Die notwendige Zementdosierung nach den Druckfestigkeitskriterien (3 N/mm^2) wird mit 9% bestimmt.
- Das Material, welche vor der Stabilisierung sehr wenig tragfähig war (I_{CBR} ca. 10%), wird mit der Zugabe vom Zement deutlich tragfähiger (I_{CBR} ca. 60%), selbst wenn es eine Woche nach der Mischung verdichtet wird.
- Es wurde nachgewiesen, dass das Material, auch mit niedrigeren Zementgehalten stabilisiert (6%), frostbeständig ist.
- Zudem zeigen die Resultate aus den CBR Versuche dass das Material mit niedrigerem Zementgehalt (6% statt 9%) und welcher eine Woche nach der Mischung verdichtet wurde, eine höhere Tragfähigkeit aufweist.

ZYKLISCHE TRIAXIALE UND VIERPUNKTBIEGEZUGVERSUCHE

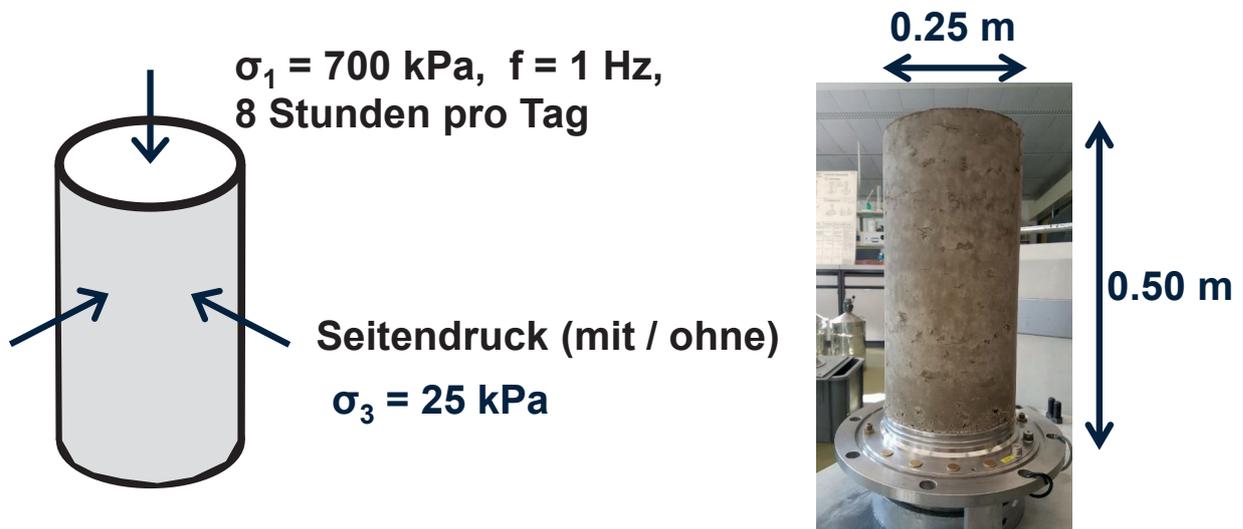
15

Triaxiale Versuche



Versuch Spezifikationen

- **Siltiger Kies** (GM), max. Korndurchmesser: **32 mm** Zementgehalt **c = 9 %** → $f_c = 3 \text{ N/mm}^2$ (SN 640 509a)
- Optimum Wassergehalt: **w = 8.06 %**
- **Standard Proctor** Verdichtung



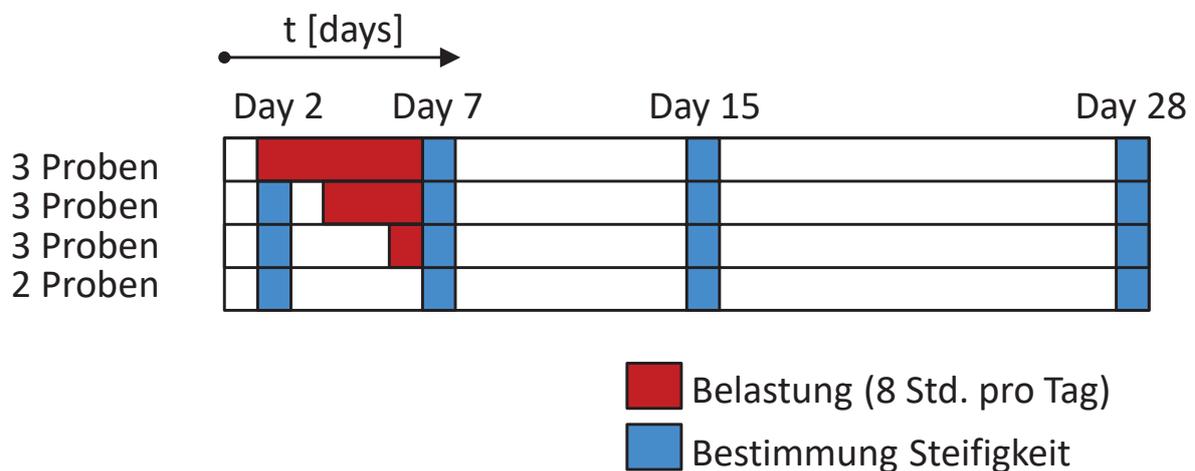
20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

17

Versuchsprogramm

- Zyklische Belastung während des Abbindeprozesses
- Bestimmung der Steifigkeit in Zeitintervalle

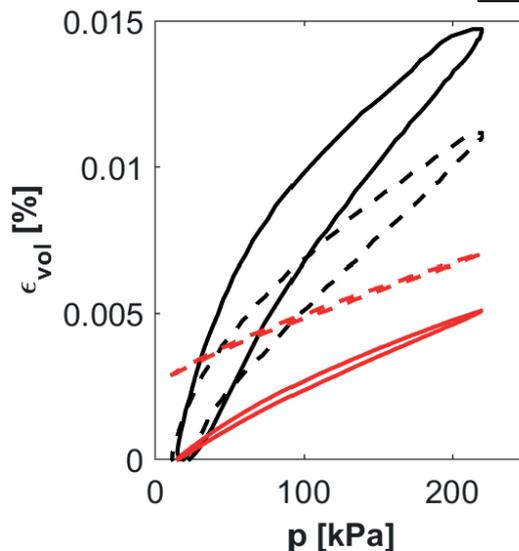
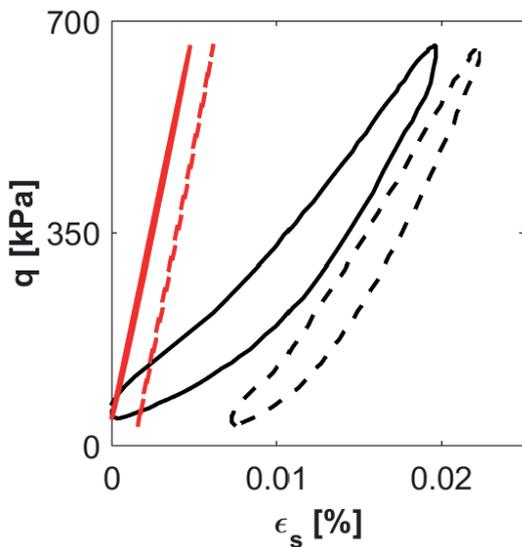
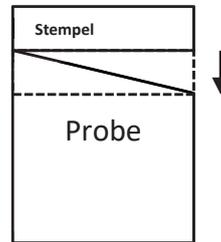


20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

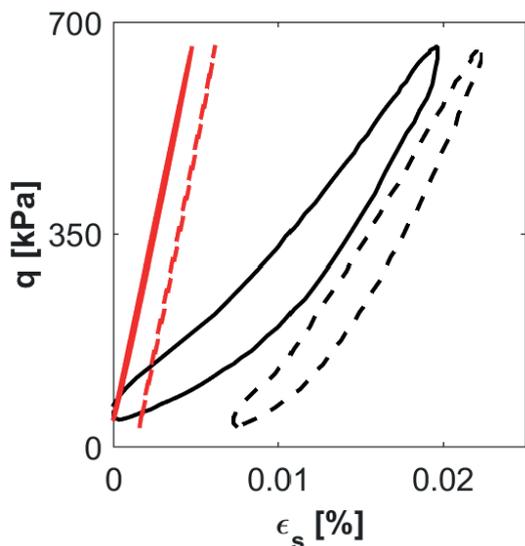
18

Messresultate

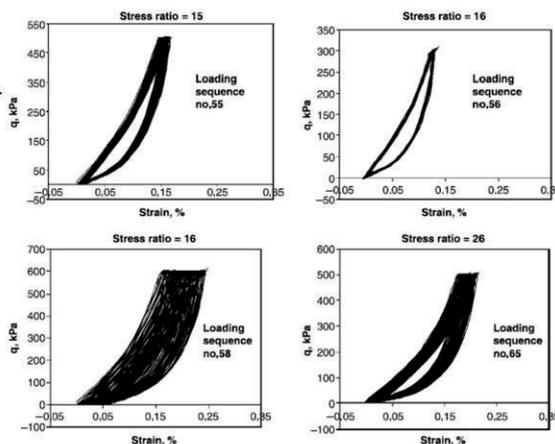


t	0 h	8 h
Lokale Messungen	— (red solid)	- - - (red dashed)
Globale Messungen	— (black solid)	- - - (black dashed)

Messresultate



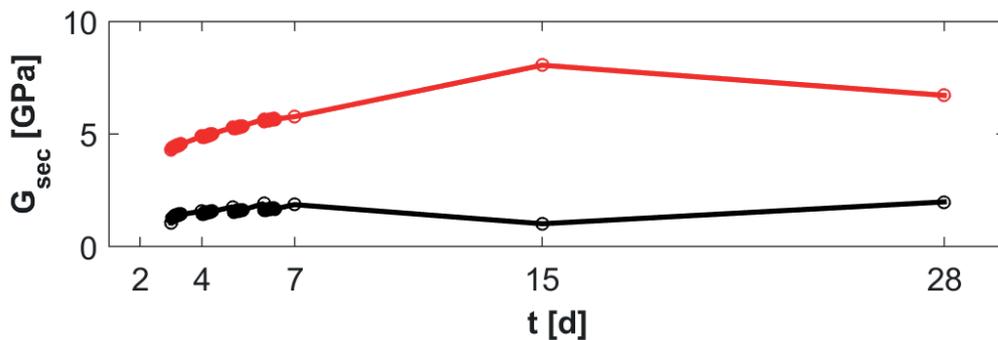
Fehler auch in der internationaler Literatur!



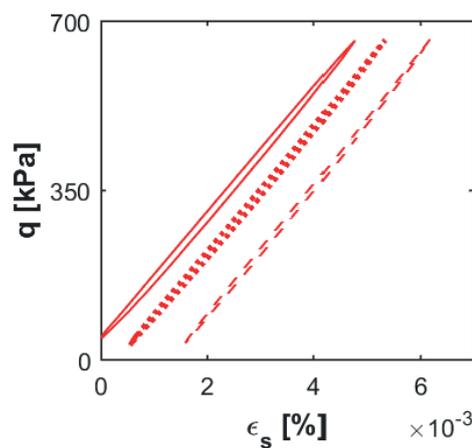
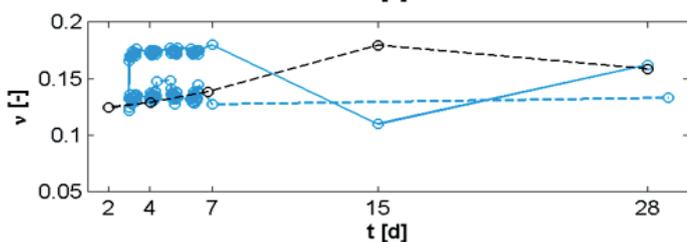
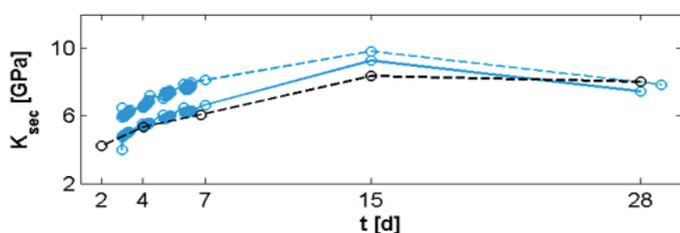
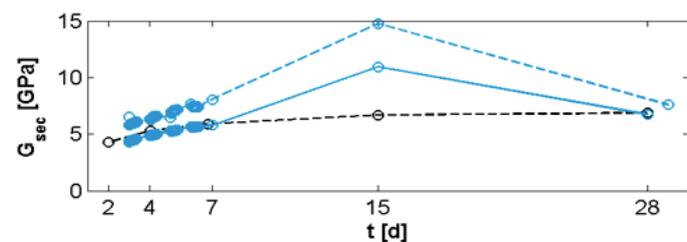
International Journal of Pavement Engineering
 DOI: 10.1080/10704965.2014.933333
 Mechanical behaviours of hydrated cement treated crushed rock base as a road base material in Western Australia
 Pengpeng Kitagawa & Hamid Niaz

t	0 h	8 h
Lokale Messungen	— (red solid)	- - - (red dashed)
Globale Messungen	— (black solid)	- - - (black dashed)

Messresultate

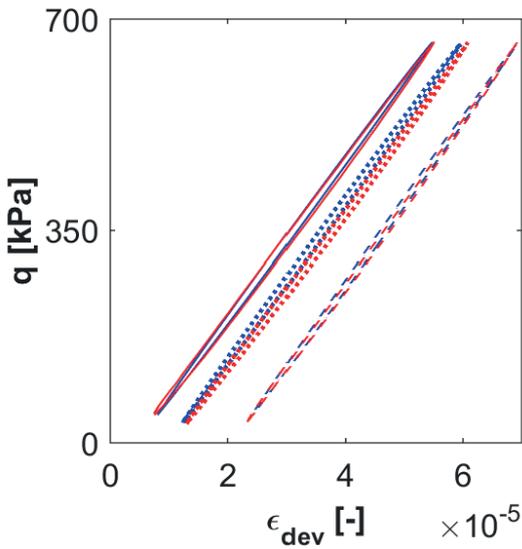


Steifigkeitszunahme und Viskosität



Interpretation

(Lokale Messungen)



t	0 h	1 h	8 h
Versuch	—	⋯	- - -
Model	—	⋯	- - -

Nicht lineares Burger Modell

Normalisierte Steifigkeit

$$G_2 = G_{\text{day3}} \cdot f(t)$$

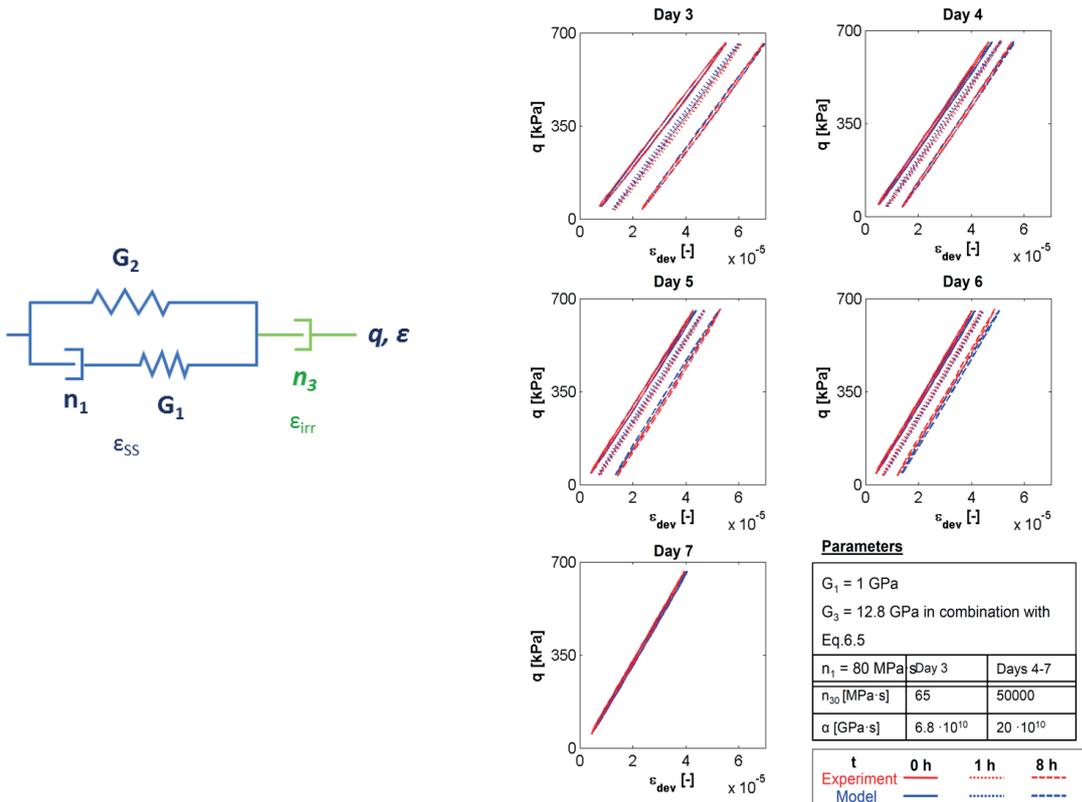
$$\epsilon = \epsilon_{SS} + \epsilon_{irr}$$

$$n_3 = n_{30} + \alpha \cdot \epsilon_{irr}$$

$$\dot{\epsilon}_{irr} = \frac{q}{n_{30} + \alpha \cdot \epsilon_{irr}}$$

$G_1 = 1 \text{ GPa}$
 $G_{\text{day3}} = 4.23 \text{ GPa}$
 $n_1 = 80 \text{ MPa}\cdot\text{s}$
 $n_{30} = 65 \text{ MPa}\cdot\text{s}$
 $\alpha = 6.8 \cdot 10^{10} \text{ GPa}\cdot\text{s}$

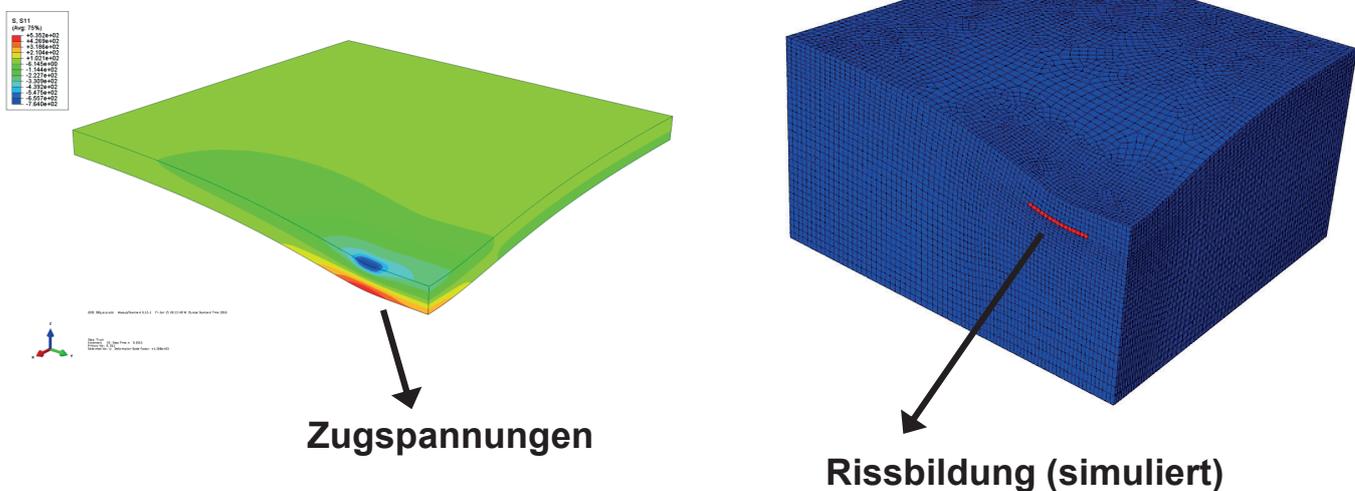
Stoffgesetz für zementstabilisierte Materialien



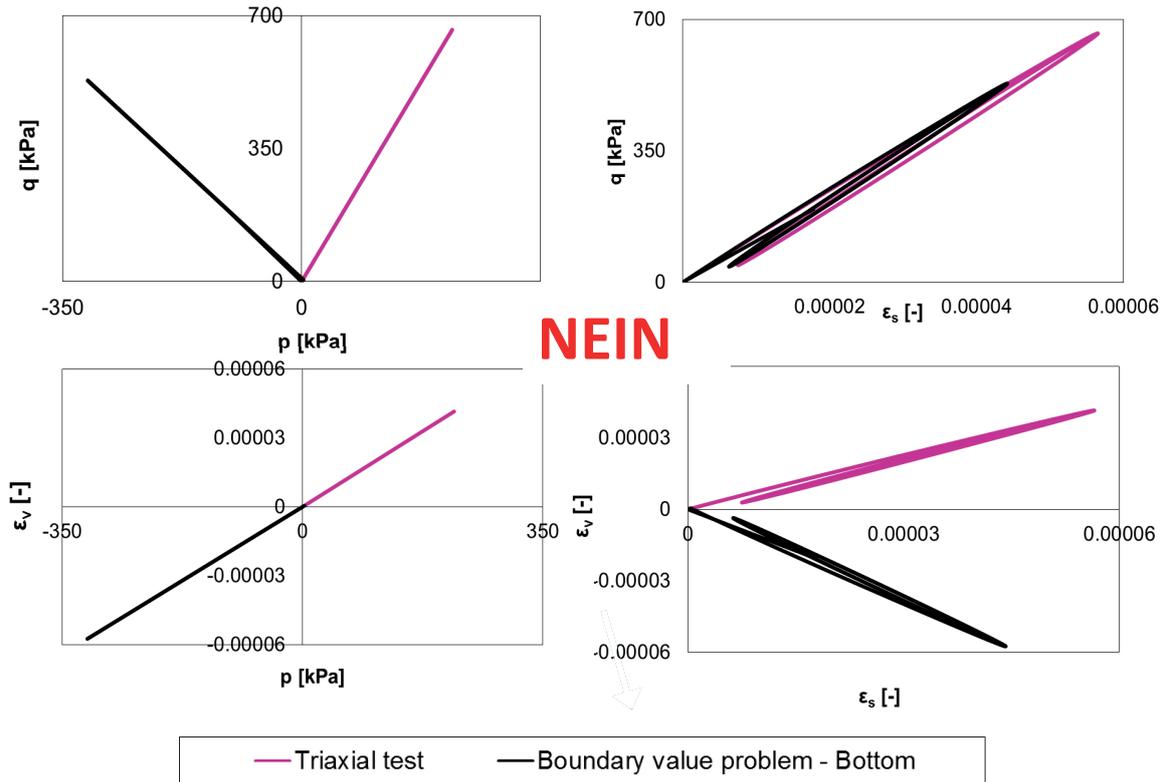
Fazit Triaxiale Versuche

- Die Druckbeanspruchung der Proben während der Abbindezeit verursacht eine temporäre Erhöhung der Steifigkeit gegenüber den unbelasteten Proben, welche nach 28 Tage nicht mehr feststellbar ist. Nach 28 Tage haben früh belastete und unbelastete Proben dieselbe Steifigkeit.
- Es konnten keine Mikrorisse beobachtet werden.
- Die kleinen Probekörper, welche gemäss Norm für die Ermittlung der Druckfestigkeit verwendet werden, liefern eher niedrigere Werte der Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu den grösseren Proben der Druckschwellversuche.
- Das stabilisierte Material verhält viskös. Die Kumulierung von bleibenden Dehnungen (Nachverdichtung) durch die Belastung während der Abbindezeit wird durch die Viskosität des Materials verursacht.

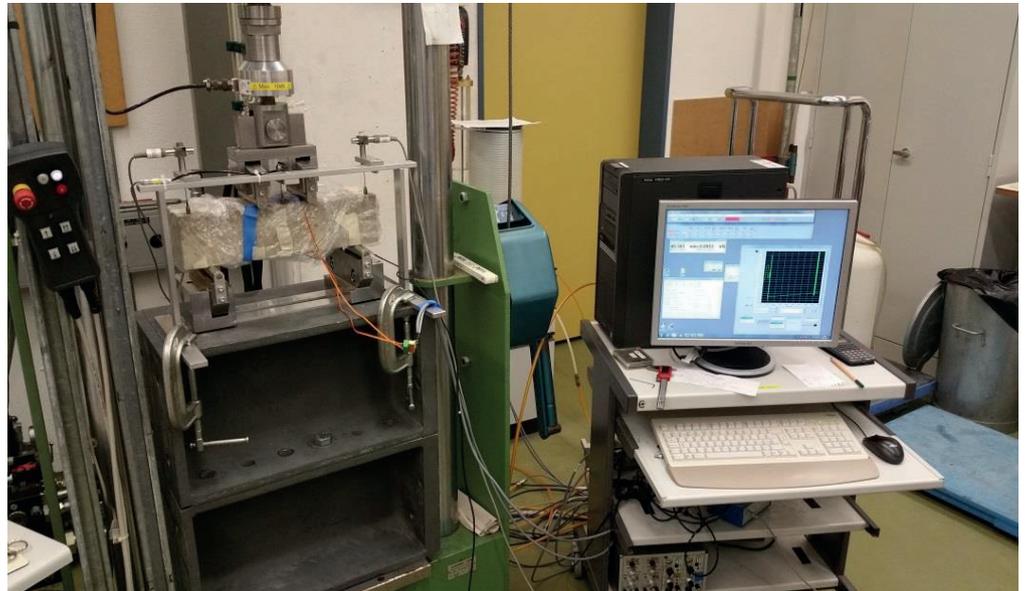
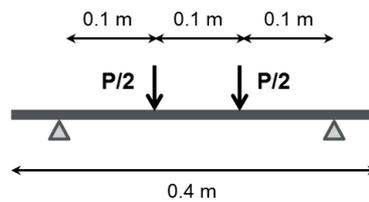
Versuch – Realität?



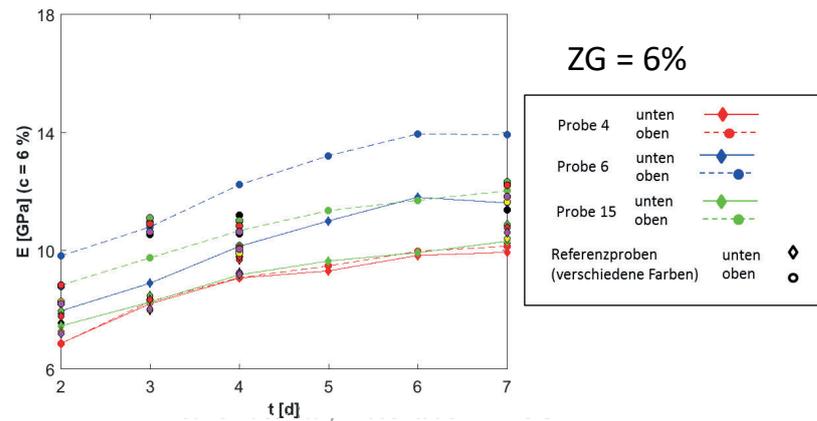
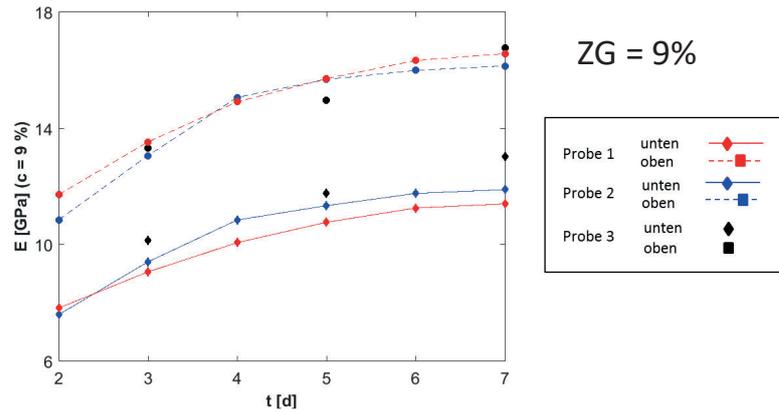
Triax Versuch – Realität?



Vierpunktbiegezugversuche



Steifigkeitszunahme

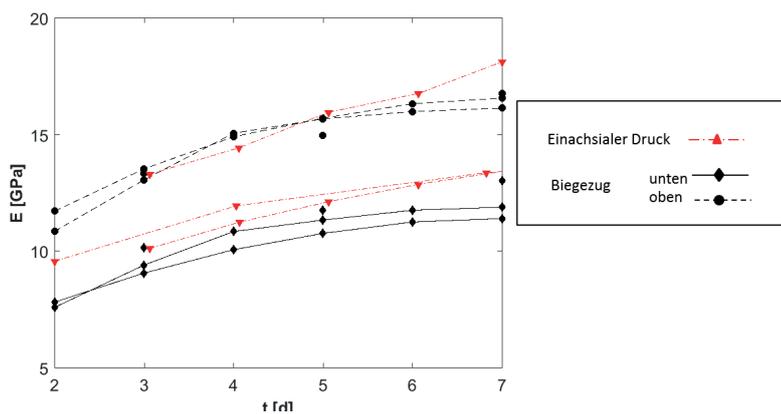


20/01/2020

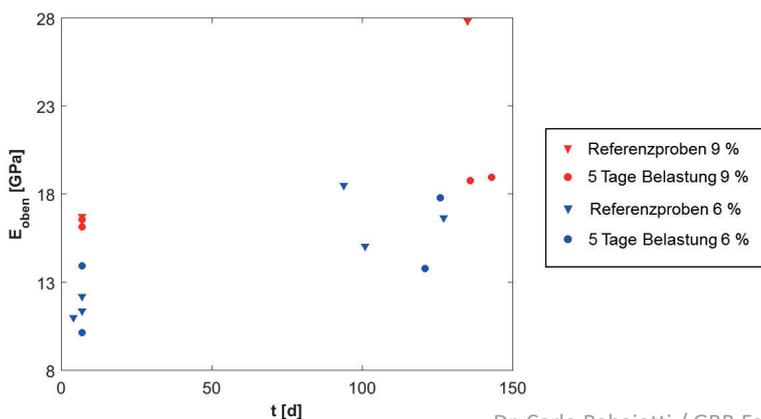
Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

29

Steifigkeitszunahme



Einachsiale vs. Biegezugsteifigkeit (9% ZG)



Langzeitsteifigkeit Biegezugversuche

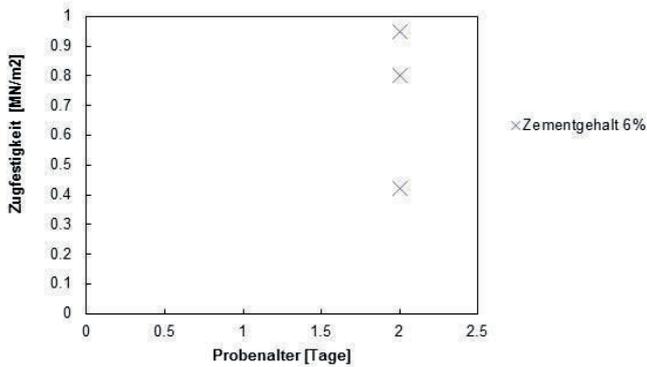
20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

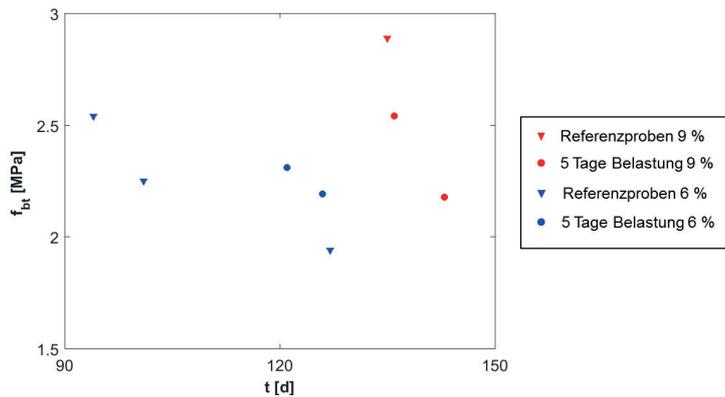
30

Biegezugfestigkeit

4P Biegezugversuch



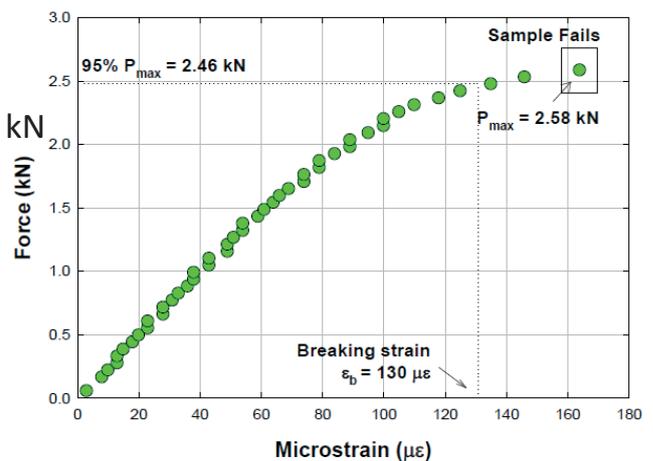
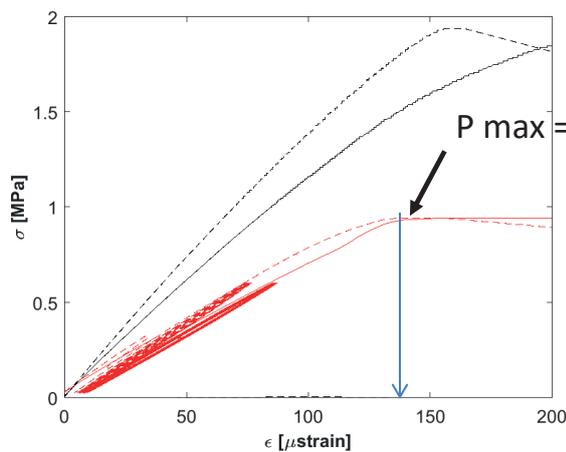
Kurzfristig = 0.7 N/mm²



Langfristig = 2 bis 3 N/mm²

Vergleich mit Austroads

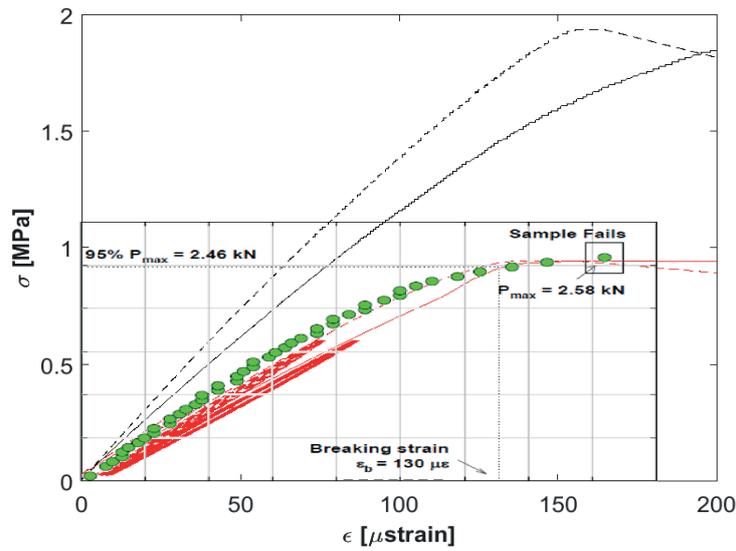
Figure 3.10: Example of breaking strain and strain at 95% of the breaking load



Alter :2 Tage, z = 6%	unten ——— oben - - - - -	Alter: 121 Tage, 5 Tage Belastung, z = 6%	unten ——— oben - - - - -
--------------------------	-----------------------------	---	-----------------------------

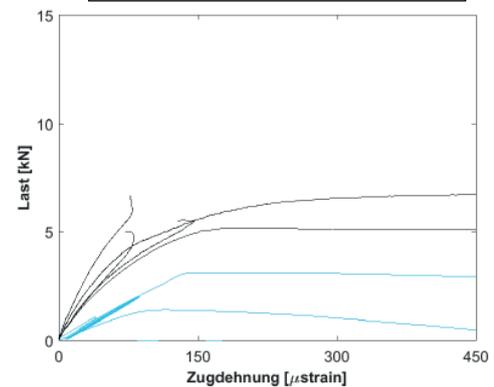
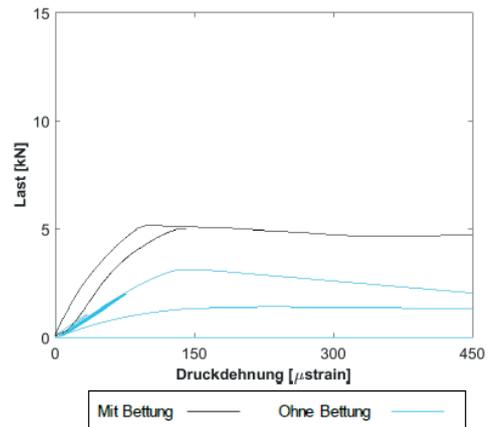
Austroroads 2014

Vergleich mit Austroads



Alter :2 Tage, z = 6%	unten	— (solid red)	Alter: 121 Tage, 5 Tage Belastung, z = 6%	unten	— (solid black)
	oben	- - - (dashed red)		oben	- - - (dashed black)

Versuche auf Sandbett



Fazit Biegezugversuche

- Die Resultate aus den Biegezugversuchen bestätigen die Erkenntnisse aus den einaxialen und triaxialen Versuche: Die Steifigkeiten während der Abbindezeit werden durch die Frühbelastung nicht gross beeinflusst und sind miteinander praktisch identisch.
- Das zementstabilisierte Material weist bei den Biegezugversuchen im geprüften Frequenzbereich praktisch keine viskösen Eigenschaften auf. Die Steifigkeit wird wie erwartet von der Amplitude der Lastanbringung beeinflusst.
- Die zementstabilisierten Proben weisen erhebliche Biegezugfestigkeiten bereit bei geringen Zementdosierungen (6%) auf. Kurzfristig wurde bei dem gewählten Material eine Biegezugfestigkeit von 0.7 (0.8) N/mm², längerfristig bis 3 N/mm² gemessen worden.
- Es wird gezeigt, dass keine Risse während der Frühbelastung entstehen, ausser die angebrachte Last nahe beim Bruchniveau ist.

IN SITU VERSUCHE

Testfeld

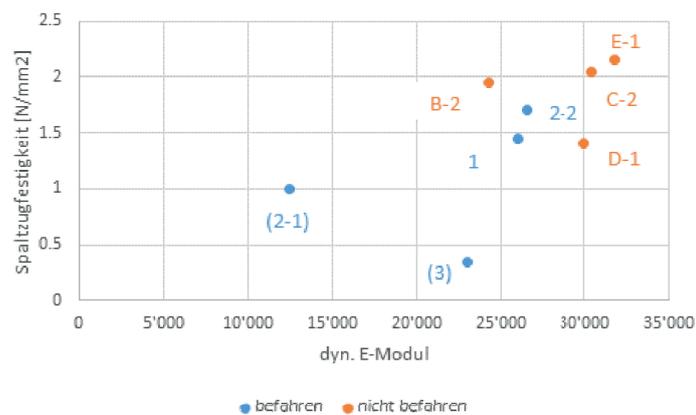
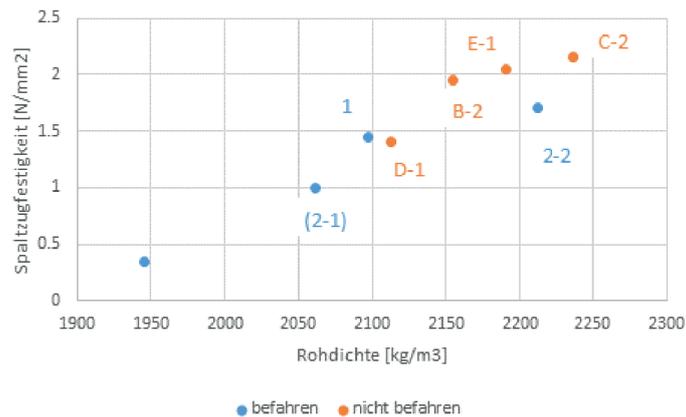


20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

37

Spaltzugversuche an Bohrkerne

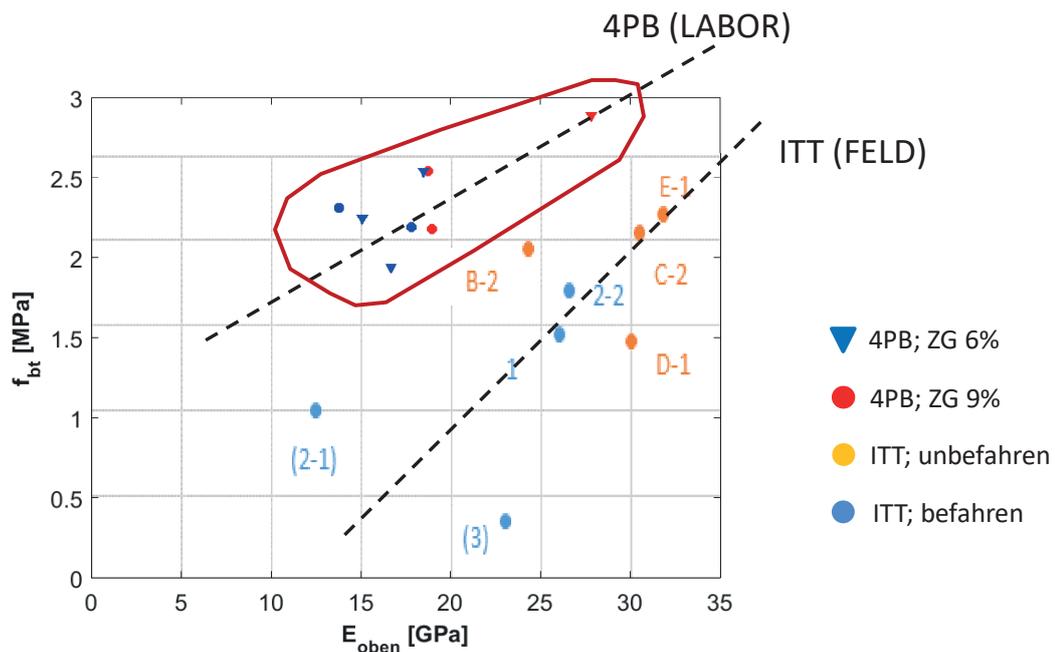


20/01/2020

Dr. Carlo Rabaiotti / GBB Fachtagung

38

Testfeld



Fazit

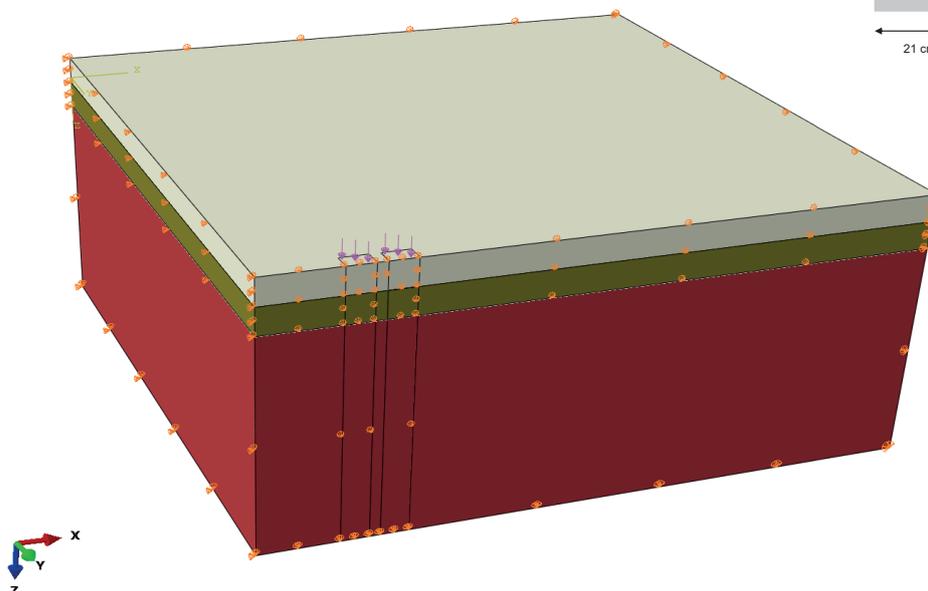
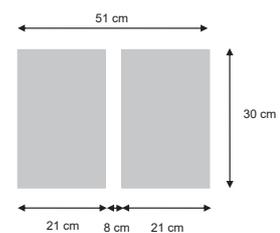
- **Die Feldversuche haben in einem verhältnismässig nicht so repräsentativen Umfeld stattgefunden, da das zementstabilisierte Material auf einem sehr steifen Untergrund verdichtet worden ist.**
- **Nichts desto trotz zeigen die Experimentelle Resultate, dass die Festigkeit und Steifigkeit des Materials durch das Frühbefahren beeinflusst worden sind.**
- **Die Resultate aus den Laboruntersuchungen an den Bohrkernen sind in sehr guter Übereinstimmung mit den Werten, welche mittels den im Labor hergestellten Proben für die triaxialen und Biegezugversuche ermittelt worden sind.**
- **Generell kann festgehalten werden, dass durch das Frühbefahren keine unzulässige Schwächung der Fundamentalschicht stattfindet.**

ERKENNTNISSE AUS DER MODELLIERUNG

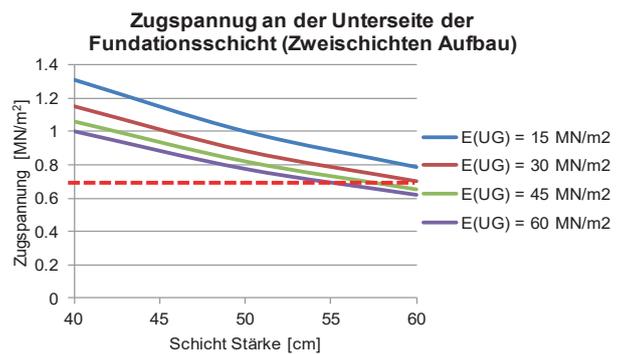
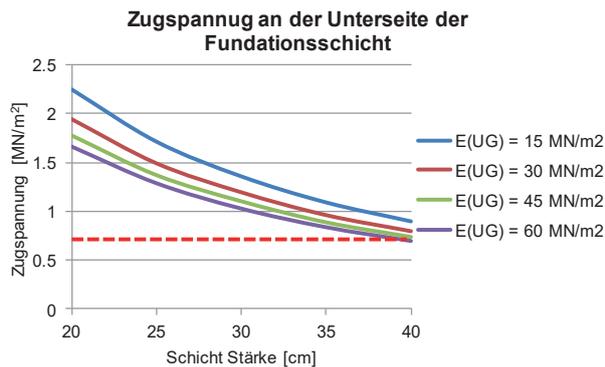
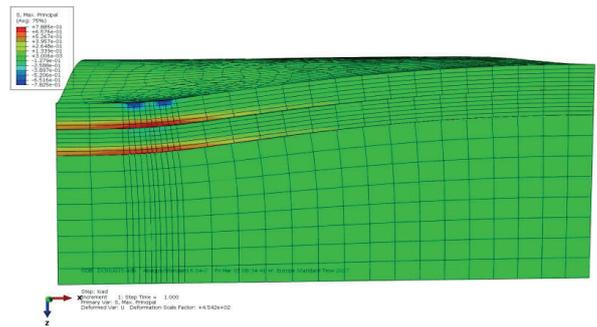
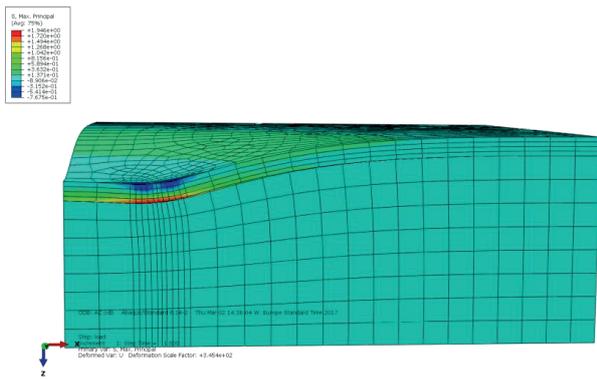
41

Finite Elemente Analyse

100 kN Achslast,
Zwillingsräder



Resultate



FAZIT

- Die durchgeführten FE Analysen haben ermöglicht, die Bedingungen zu untersuchen, welche zu einer Mikrorissbildung während der Abbindezeit führen können.
- Es wurde gezeigt, dass bei einer 10 Tonne Achslast, die Bedingungen für die Entstehung von Mikrorissen für das Befahren 2 Tage nach der Herstellung der Schicht praktisch immer gegeben sind.
- Dabei spielt die Steifigkeit des Untergrundes eine eher untergeordnete Rolle. Für die Grösse der Zugspannungen hat die Dicke der Fundamentsschicht einen viel grösseren Hebelarm.

Schlussfolgerungen

- Durch die CBR Frost Versuche nachgewiesen werden, dass bereits mit 6% Zementgehalt das Material nicht mehr frostgefährdet ist, dies obwohl die Proben erst eine Woche nach der Zementzugabe verdichtet wurden.
- Die Nachbildung der mechanischen Belastung des Materials wurde im Labor mittels triaxialen Druckschwellversuche und 4-Punkt Biegezugversuche durchgeführt. Die Resultate zeigen generell keine langfristigen Effekte der Belastung infolge des Frühbefahrens während der Abbindezeit.
- Die Resultate der Druckschwellversuche zeigen insbesondere, dass die Druckbelastungen während der Abbindezeit eher eine Verbesserung der Tragfähigkeit des Materials verursachen, welche aber langfristig schwindet.

Schlussfolgerungen

- Die Resultate der 4-Punktbiegezugversuche (4PB) zeigen, dass das Material bereit 2 Tage nach der Herstellung eine nicht vernachlässigbare Zugfestigkeit aufweist: bis 2 – 2.5 N/mm² nach 130 – 150 Tage.
- Die gemessenen Steifigkeiten beim 4PB Versuch stimmen mit denjenigen aus den Druckschwellversuchen und aus der internationalen Literatur sehr gut überein.
- Es konnten keine Effekte der Schädigung infolge der Frühbelastung nachgewiesen werden.
- Das mechanische Verhalten des Materials im Druck kann sehr gut von einem ad hoch entwickelten nicht linearem Viskoelastischen Stoffgesetz beschrieben werden. Dies wurde anhand der Experimentellen Resultate (vor allem aus den Druckschwellversuchen) kalibriert.

Schlussfolgerungen

- Die Resultate der Versuche auf den Bohrkernen aus den In Situ Versuche zeigen hohe Werte der Festigkeit und Steifigkeit, welche in sehr guter Übereinstimmung mit denjenigen, aus den Laborversuchen (Druckschwellversuche und 4-Punkt Biegezugversuche) sind.
- Eine gewisse kleine Abnahme dieser Eigenschaften des Materials im Frühbefahrenen Feld konnte nachgewiesen werden.
- Die Effekte der Frühbelastung für verschiedene Stärken der zementstabilisierten Schicht sowie Untergrundsteifigkeiten wurden mithilfe von mehreren finiten Elementen Analyse untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine 100 kN Achslast, welche auf einer 2 Tage alten Schicht verkehrt, womöglich immer (Mikro) Risse verursacht.

Schlussfolgerungen

- Auf Basis der zahlreichen Erkenntnisse aus dieser Studie kann daher festgehalten werden, dass das Frühbefahren einer zementstabilisierten Schicht zwei Tage nach der Verdichtung möglich ist
- Es ist jedoch zu vermerken, dass die Resultate aus dieser Studie sich nur auf ein Material beziehen. Obwohl das gewählte Material sehr repräsentativ ist für eine Zementstabilisation, gewisse Abweichungen für andere Materialzusammensetzungen sind momentan nicht auszuschliessen.
- Eine breitere Untersuchung mit anderen Ausgangsmaterialien (z.B. mit siltig-tonigen Feinanteil) ist für eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse aber sehr empfehlenswert.