
Fachtagung

Bodenbehandlung mit Bindemitteln

Schweinfurt, 22. Januar 2020

Thema:

Organische Einflüsse auf Bodenbehandlungen

M.Sc. Monika Schad


Kontakt:

M.Sc. Monika Schad
Vertretungsprofessur Geotechnik
Leiterin Labor und Prüfstelle für Geotechnik
Hochschule Biberach
Hochschule für angewandte Wissenschaften
Karlstraße 11
88400 Biberach
Fon: +49 (7351) 582 307
Fax: +49 (7351) 582 519
E-Mail: schad@hochschule-bc.de
www.hochschule-biberach.de

M.Sc. Monika Schad



- 19.01.1989 Ausbildung Baustoffprüferin, Fachrichtung Boden
- 03/1990 - 06/1994 FH Biberach, Bauingenieurwesen, Vertiefung der Studienfächer Geotechnik, Wasserbau und Stahlbau
Diplomarbeit: Stoffgesetze für das FEM-Programm PLAXIS – experimentelle Ermittlung der Bodenparameter
- 30.06.1994 Diplomingenieur, Dipl.-Ing. (FH)
- 10/2000 - 09/2001 University of Birmingham
Masterthesis: Influence of Fibres on the Strength Properties of a “Mixed in Place” Cut-off Wall
- 13.12.2001 Master of Science, M.Sc. in Foundation Engineering
- 07/1994 - 02/2003 Hochschule Biberach, Labor und Prüfstelle für Geotechnik
- 03/2003 - 02/2011 Stellvertretende Leiterin der Prüfstelle nach RAP Stra
- 02/2011 - 02/2019 Leiterin der Prüfstelle nach RAP Stra
- seit 2019 Vertretungsprofessur Geotechnik an der Hochschule Biberach



Veranstaltung: Bodenbehandlung mit Bindemitteln
Datum / Ort: 22. Januar 2020 in Schweinfurt

Organische Einflüsse auf Bodenbehandlungen

M.Sc. Monika Schad
Vertretungsprofessur Geotechnik
Leiterin Labor und Prüfstelle für Geotechnik
Hochschule Biberach

2



Inhalt - Zusammenstellung der Ergebnisse der Voruntersuchungen

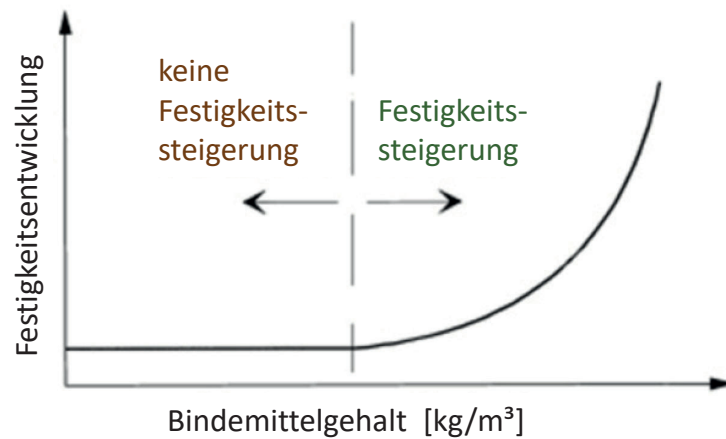
- 1 Grundlage
 - 1.1 Nachweis der Organik in der Bodenmechanik
 - 1.2 Analysenwerte im Vergleich
 - 1.3 Art und Einfluss der Huminsäuren

- 2 Tiefgründige Bodenverbesserung des Unterbaus mit dem Fräs-Misch-Injektionsverfahren
 - 2.1 Vorstellung des Verfahrens am Projekt ABS Oldenburg-Wilhelmshaven
 - 2.2 Baugrundverhältnisse und Böden im Bereich der Ausbaustrecke
 - 2.3 Bindemittel und Festigkeitsentwicklung
 - 2.3.1 Zusammenstellung möglicher Bindemittel - Erfahrungswerte aus der Literatur
 - 2.3.2 Zusammensetzung der im FMI-Verfahren verwendete CEM III - Zemente
 - 2.4 Herstellung und Zusammensetzung des Hüttensandes
 - 2.5 Zusammenstellung der untersuchten Mischungen
 - 2.6 Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung
 - 2.7 Vergleich der Festigkeitsentwicklung Torf Wilhelmshaven mit einem Torf aus Süddeutschland
 - 2.8 Einfluss von Anhydrit im Bindemittel

- 3 Bodenverbesserung im Erdbau nach den ZTV E-StB 17
 - 3.1 Verfahren zur Bodenstabilisierung im Erdbau
 - 3.2 Einfluss des Wassergehaltes auf die Verdichtung
 - 3.3 Festigkeitsentwicklung ausgeführter Eignungsprüfungen
 - 3.4 Umweltverträglichkeit bzw. Veränderung der Löslichkeit von Schadstoffen

Bodenverbesserung organischer Böden

Anforderungen an das Baustoffgemisch für die Festigkeitsentwicklung



- Für den Beginn der Festigkeitsentwicklung ist eine Mindestbindemittelmenge erforderlich.
- Im Baustoffgemisch muss ein pH-Wert von > 9 vorliegen.
- Eine Neutralisierung der Reaktionen der Huminstoffe kann durch die Zugabe von Zusatzstoffen bedingt erreicht werden.

1.1 Nachweis der Organik in der Bodenmechanik

Organik – im Feststoff

- a) Glühverlust V_{gl} [M.-%]
⇒ Masseanteil der bei $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ verbrennbaren Organik
- b) TOC – Gehalt
⇒ Gesamter organischer Kohlenstoff

Lösliche Organik – Huminstoffe / Huminsäuren

- c) Nachweis mit 3 %-iger Natronlauge nach DIN EN 1744-1
Qualitativer Nachweis von in verdünnter Natronlauge löslichen Huminsäuren
- d) Anteil löslicher Huminstoffe im Eluat (DOC-Wert)

1.2 Analysergebnisse im Vergleich

Bezeichnung	pH – Wert [-]	Glühverlust [%]	TOC- Gehalt	Huminstoffe im Eluat
ABS Wilhelmshaven	6,2	43	23	30
	6,2	65	34	19
B32 Altshausen	7,4	38	21	20
Talaue Erbach	6,8	31	15	13
Anmoor - Talaue Ehingen	7,6	14 - 18	2,5	< 0,5

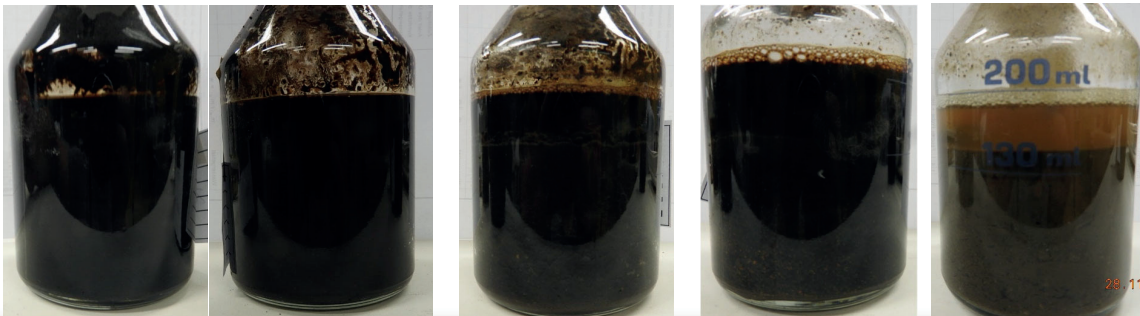
Reaktion mit 3%-iger Natronlauge:

ABS Wilhelmshaven

B32 Altshausen

Talaue Erbach

Anmoor Ehingen



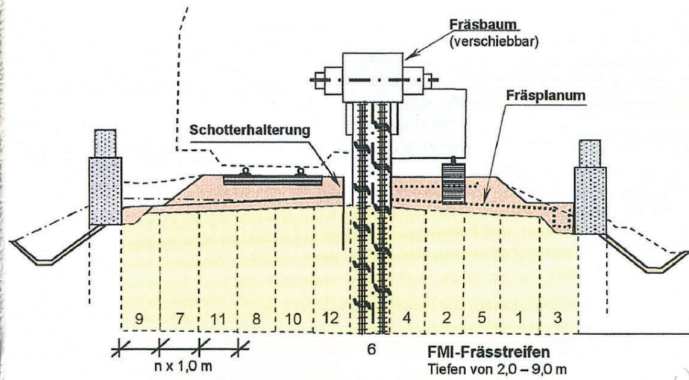
1.3 Art und Einfluss der Huminsäuren

Die chemische Unterteilung der Huminstoffe stützt sich auf Löslichkeitsunterschiede im alkalischen und sauren Bereich in Fulvosäuren, Huminsäuren und Huminstoffe.

Bezeichnung	Huminsäurevorstufen	Huminsäuren		Humine
	Fulvosäuren Hymatomelansäuren	Braunhuminsäuren	Grauhuminsäuren	
C-Gehalt [%]	< 50	50 - 60	58 - 62	
Farbe	gelb	tiefbraun	grau-schwarz	schwarz
löslich in	Wasser und NaOH	NaOH	NaOH	unlöslich
Reaktivität	Radikalbildung	mittel	mittel	gering
Wirkung bei der Boden- verbesserung	Reaktion mit Mineralstrukturen die Aluminium enthalten ⇒ verhindert die Bildung von Schichtkristallgittern ⇒ Reaktionsprodukt unterbindet die weitere Hydratation des Zementes	geringes Sorptions- vermögen	hohes Sorptions- vermögen bzw. „starke chemische Affinität“ zu Calcium	

2.0 Tiefgründige Bodenverbesserung im Nassmischverfahren – Fräs-Misch-Injektionsverfahren

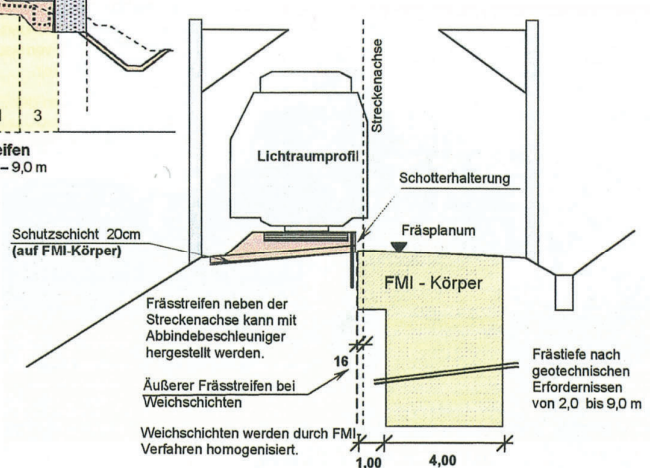
2.1 Vorstellung des FMI - Verfahrens



Durchführung der Fräs-Misch-Injektions-Arbeiten im Baugleis und Sicherung des Betriebsgleises

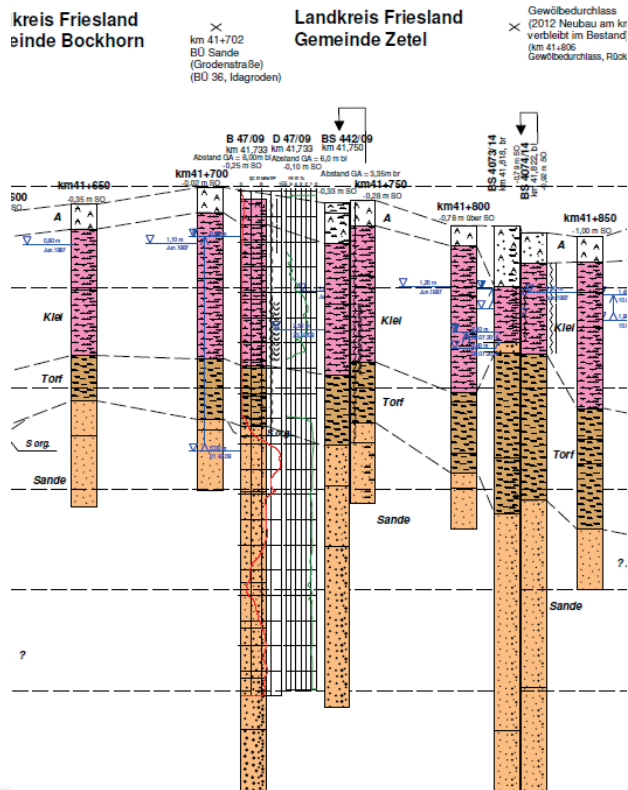
Ertüchtigung des gesamten Planumbereiches mit parallel angeordneten Scheiben

aus: Prof. Dr.-Ing. Göbel, Prof. Dr.-Ing. Lieberenz, Handbuch Erdbauwerke der Bahnen



aus: www.oldenburg-wilhelmshaven.de (Infoseite Bahn)

2.2 Baugrundverhältnisse im Bereich der ABS Oldenburg – Wilhelmshaven



Klassifikation der anstehenden Böden

Klei

Bodenart: Ton, schluffig
 DIN 18196: TA (Fließgrenze $w_L = 102\%$)
 Wassergehalt: $w = 80 - 100\%$
 Konsistenz: sehr weich – breiig / flüssig
 Glühverlust: 4 – 7 M.-%

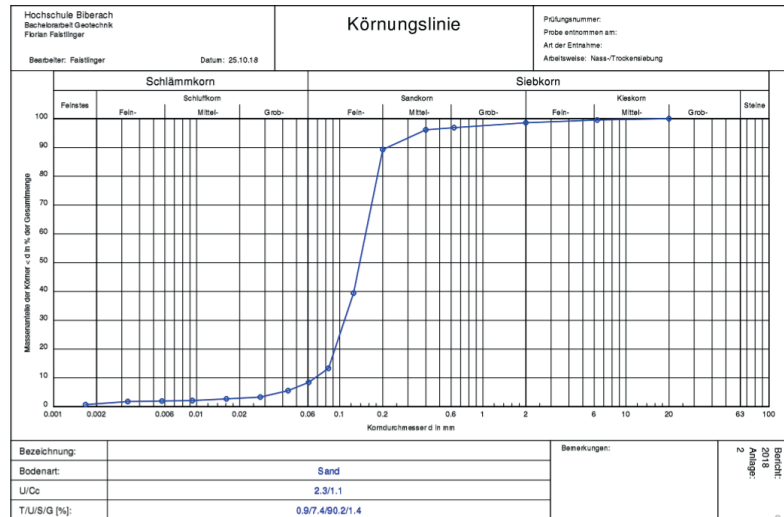
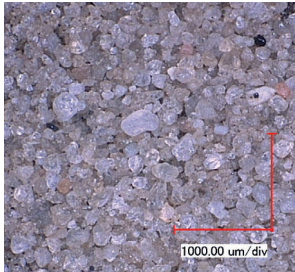
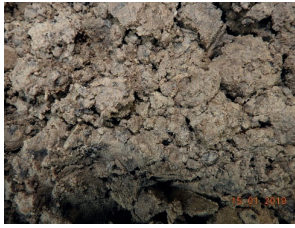


Torf

DIN 18196: HN - HZ
 mäßig zersetzt - zersetzt
 Wassergehalt: 150 M.-% - 250 M.-%
 Lagerung: teilweise wassergesättigt
 Glühverlust: 50 - 85 M.-%



Klassifikation der anstehenden Böden



Sand

- Bodenart: Feinsand, schwach schluffig
- DIN 18196: SU, enggestuft
- Lagerung: wassergesättigt
- Glühverlust: 1 – 1,5 M.-%

2.3.1 Zusammenstellung möglicher Bindemittel

Janz und Johansson 2002 (nordische Böden), Relative Druckfestigkeitszunahme basierend auf Laboruntersuchungen (Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen) an nordischen Böden

Bindemittel	Schluff	Ton	Organische Böden	Torf
	Glühverlust 0 – 2 %	Glühverlust 0 – 2 %	Glühverlust 2 – 30 %	Glühverlust 50 – 100 %
Zement	++	+	+	++
Zement + Gips (?)	+	+	++	++
Zement + Hüttensand	++	++	++	+++
Zement + Kalk	++	++	+	-
Kalk + Gips (?)	++	++	++	-
Kalk + Schlacke	+	+	+	-
Kalk + Schlacke + Gips (?)	++	++	++	-
Kalk + Schlacke + Zement	++	++	++	-
Kalk	-	++	-	-

+++ sehr gut geeignet in vielen Anwendungen, ++ gut geeignet in vielen Anwendungen,
+ gut geeignet in einigen Anwendungen, - nicht geeignet

Die Wirkungsweise des Bindemittels bzw. der Bindemittelkombination ist durch eine Eignungsprüfung inkl. Langzeitversuche nachzuweisen.

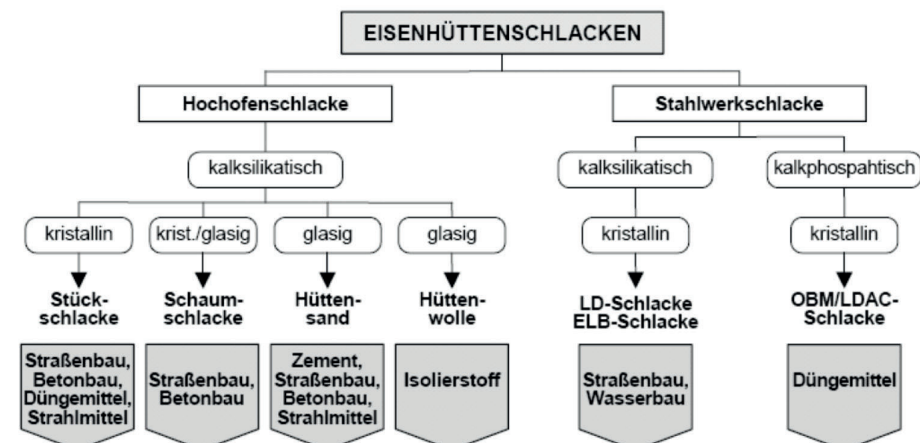
2.3.2 Zusammensetzung der im FMI-Verfahren verwendeten CEM III - Zemente

Zementart	Kurzbezeichnung	Hauptbestandteile			Nebenbestandteile
		Portlandzementklinker K	Hüttensand S	Sonstige	
Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	0 - 5
	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	0 - 5
Portlandkompositzement	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20 ¹		0 - 5
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35 ¹		0 - 5
Hochofenzement	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	0 - 5
	CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	0 - 5
	CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	0 - 5
Kompositzement	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	18 - 30 ²	0 - 5
	CEM V/B	20 - 38	31 - 50	31 - 50 ²	0 - 5

Hochofenschlacke, die vor allem aus Kalk, Kieselsäure, Aluminium- und Magnesiumoxid besteht, wird heute meist in Granulationsanlagen aufgearbeitet. Durch das Abschrecken der flüssigen Schlacke entsteht ein glasig erstarrter, feinkörniger Hüttensand. Dieser eignet sich besonders als Rohstoff für die Herstellung hochwertiger CEM III - Zemente bzw. als Betonzusatzstoff für CEM II - Zemente.

aus: Prof. Dr.-Ing. Thienel, Eisenhüttenschlacken und Hüttensand, Herbstsemester Bundwehr Universität München 2017

2.4 Herstellung und Zusammensetzung des Hüttensandes



	Dimension	Spannweiten	Spannweiten [Lit 16]	Maximalwerte [Lit 22]
SiO ₂	[M.-%]	35-40	35-39	40
Al ₂ O ₃	[M.-%]	8-12	8-12	12
Fe _{ges}	[M.-%]	< 0,3	< 0,5	0,7
MnO ₂	[M.-%]	< 1,5	< 0,5	1,3
CaO	[M.-%]	33-40	36-43	43
MgO	[M.-%]	8-10	4-12	16
S	[M.-%]	< 1,5	1,2-1,6	1,9

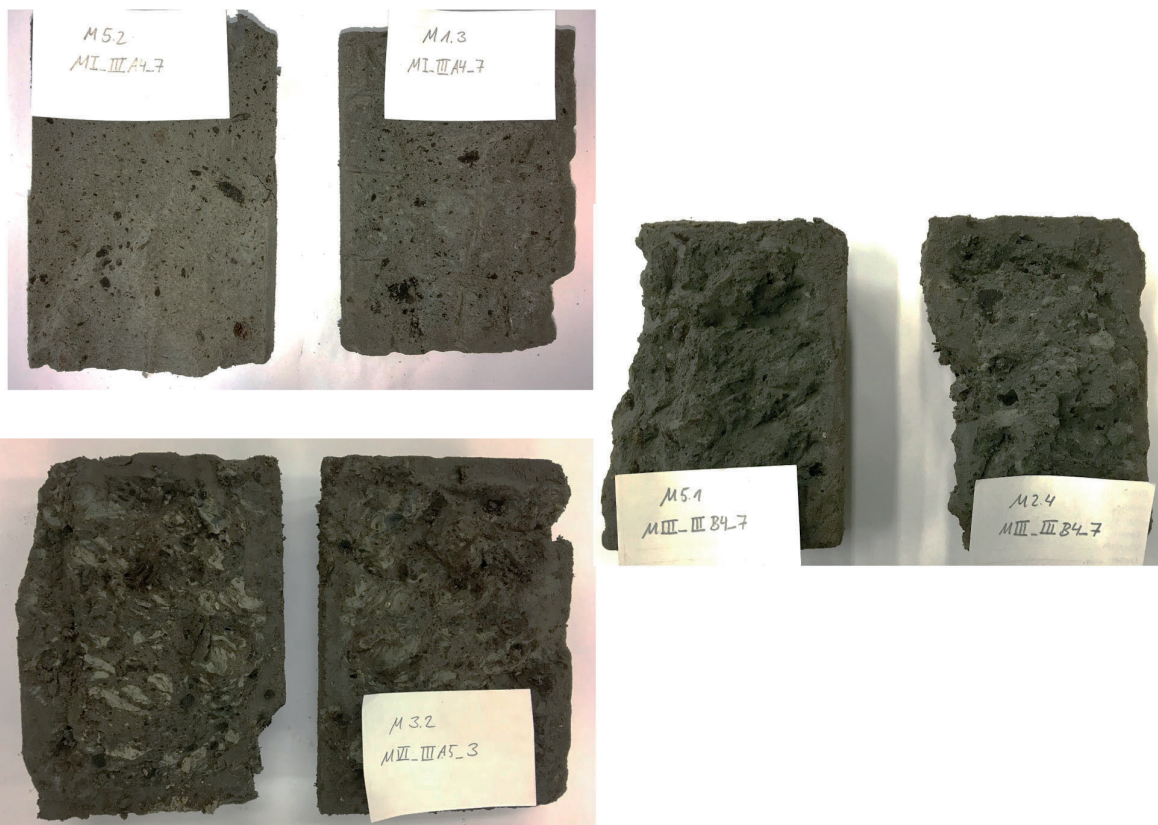
aus: Prof. Dr.-Ing. Thienel, Eisenhüttenschlacken und Hüttensand, Herbstsemester Bundwehr Universität München 2017

2.5 Festigkeitsentwicklung mit zunehmendem Torfanteil

Untersuchte Baustoffgemische im Rahmen der Bachelorarbeit von Florian Faistlinger

Bezeichnung der Mischung	Anteile [Vol.-%]			Bindemittel CEM III - Hochofenzemente
	Torf	Klei	Sand	
BA	Bauausführung			CEM III/A 42,5 N Portlandzementklinker: 35 – 64 % Hüttensand: 36 – 65 %
M I	33,3	33,3	33,3	
M II	40	40	20	
M III	40	40	20	CEM III/B 42,5 Portlandzementklinker: 20 – 34 % Hüttensand: 66 – 80 %
M IV	40	40	20	CEM III/A 52,5 R Portlandzementklinker: 35 – 64 % Hüttensand: 36 – 65 %
M V	50	50	--	
M VI	70	30	--	

Vergleich der Baustoffgemische – Bachelorarbeit von Florian Faistlinger



2.3 Festigkeitsentwicklung mit zunehmendem Torfanteil

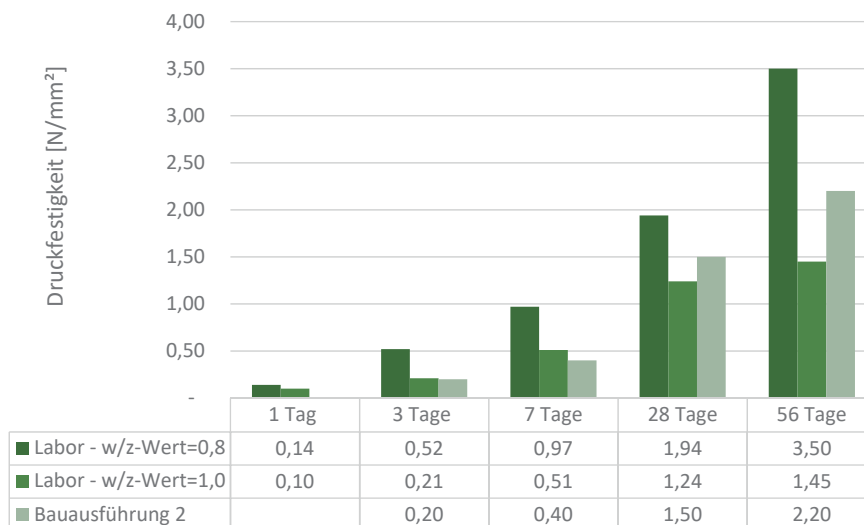
2.3.1 Untersuchte Baustoffgemische - Bachelorarbeit von Florian Faistlinger

Mischung-Torfanteil	Dichte und Wassergehalte				Bindemittel
	Feuchtdichte ρ [t/m ³]	Trockendichte ρ_d [t/m ³]	mittlerer Wassergehalt w [M.-%]		
			Boden	Baustoff	
BA	1,65	1,25	--	30	CEM III/A 42,5 N
M I - 33	1,52	1,06	70	46	
M II - 40	1,48	0,92	85	64	
M III - 40	1,51	1,13		30	CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)
M IV - 40	1,45	0,89	120	64	CEM III/A 52,5 R
M V - 50	1,38	0,76		82	
M VI - 70	1,35	0,73		140	

2.6 Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung

Vergleich Bauausführung und Laboruntersuchungen

Ausgangsgemisch: Torf : Klei : Sand = 33,3 : 33,3 : 33,3 Vol.-%
Zementgehalt: 250 kg/m³ CEM III/A 42,5 N, w/z = 0,8 und w/z = 1,0



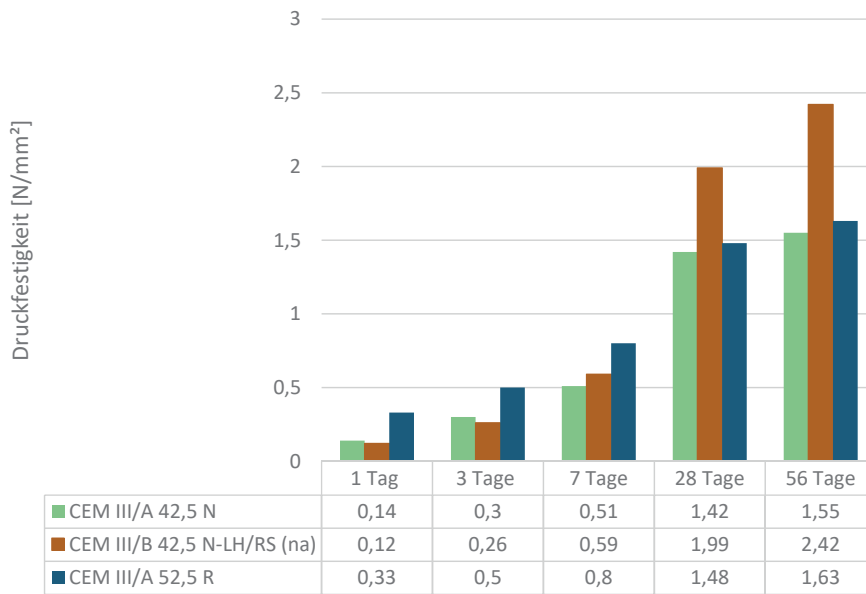
Bewertung der Ergebnisse:

- w/z – Wert hat einen großen Einfluss auf die Druckfestigkeit
- Angabe Bauausführung w/z-Wert = 0,8
- Berücksichtigung von zusätzlichem Wasser aus dem gesättigten Sand: w/z-Wert = 1,0

Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zementart

Ausgangsgemisch: Torf : Klei : Sand = 40 : 40 : 20 Vol.-%

Zementgehalt: 250 kg/m³, w/z – Wert = 0,9 – 0,95

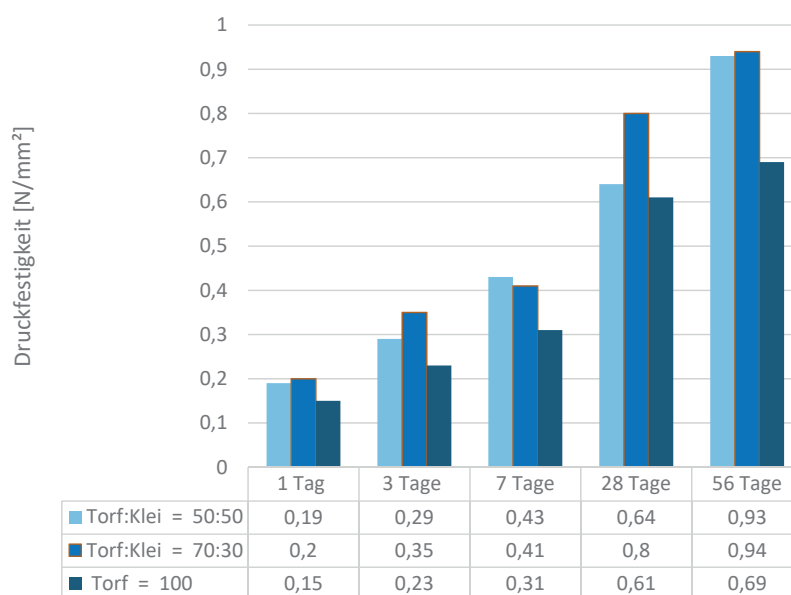


Interpretation der Ergebnisse:

- CEM III/B 42,5: Festigkeitssteigerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen und 56 Tagen
- CEM III/A 52,5 R: schnellere Festigkeitsentwicklung / vergleichbare Endfestigkeit mit CEM III/A 42,5

Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Torfanteils

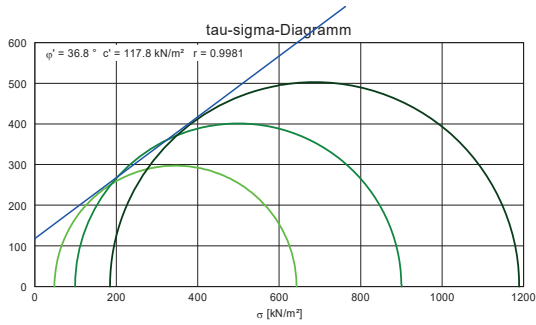
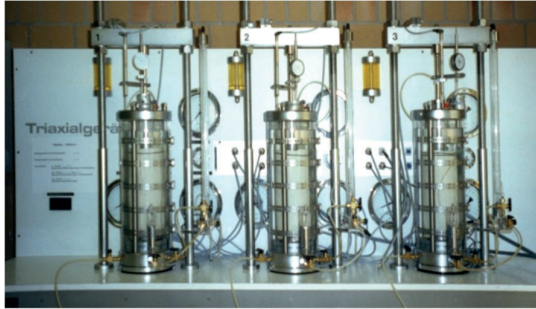
Zementgehalt: 250 kg/m³, CEM III/A 52,5 R



w/z – Werte:

M IV: w/z-Wert = 0,95, M V: w/z-Wert = 1,05, M VI: w/z – Wert = 1,0

Bestimmung der Scherparameter im Triaxialversuch (D-Versuche)

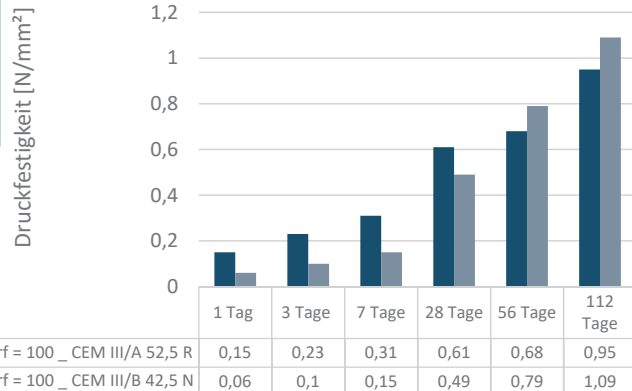


Boden	Reibungswinkel ϕ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Erfahrungswerte für Ausgangsboden		
Klei TA, breiig	17,5 – 20	0 - 2
Torf stark zersetzt	20 - 22,5	0 - 5
Sand, schluffig SU	30 – 35	0
Kenwerte aus dem Triaxialversuch der stabilisierten Baustoffgemische Bindemittelmenge 250 kg/m³		
FMI-Bodenstabilisierung M BA und Sand : Klei : Torf = 33,3 : 33,3 : 33,3 Vol.-%	38 - 40	220 - 280
FMI-Bodenstabilisierung M V, M VI Torf : Klei = 50 : 50 Vol.-% Torf : Klei = 70 : 30 Vol.-%	37 - 39	100 - 120
FMI-Bodenstabilisierung 100 % Torf	30 – 35	70 - 80

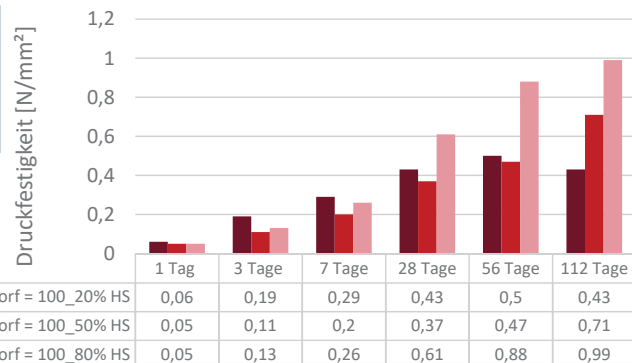
Ausgangsboden – 100% Torf (wassergesättigt)

Zementgehalt: 250 kg/m³

CEM III/A 52,5: w/z-Wert = 1,0
 CEM III/B 42,5 N-LH/RS (na): w/z- Wert = 1,0
 Wasserlagerung nach einer Abbindezeit von 7-Tagen

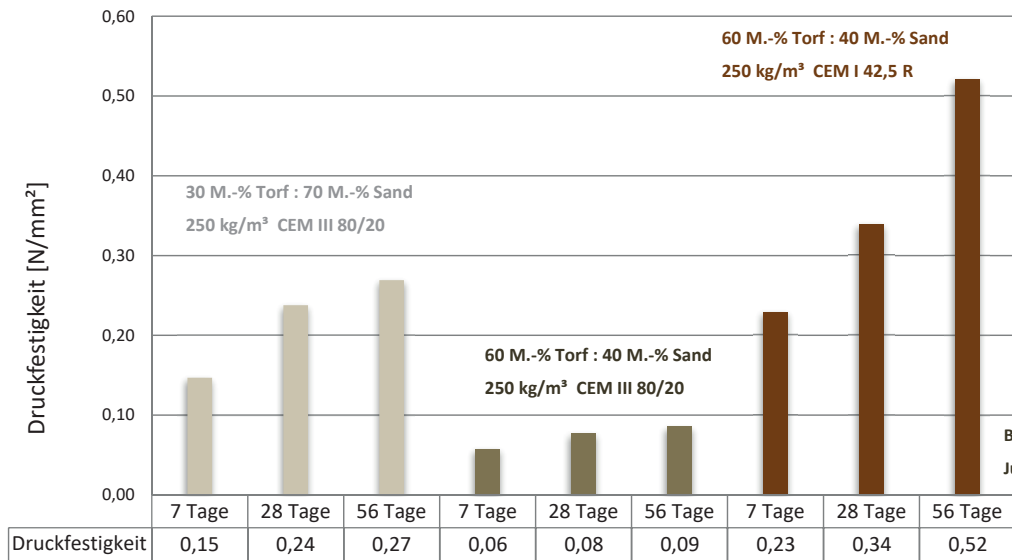


Bindemittel: CEM I 42,5 R : Hüttensand HS
 w/z – Werte: 1,2
 Wasserlagerung nach einer Abbindezeit von 7-Tagen



Ausgangsboden – Torf-Sand-Gemische (Süddeutschland B32 – Altshausen)

Bindemittelgehalt: 250 kg/m³, w/z-Wert = 0,8

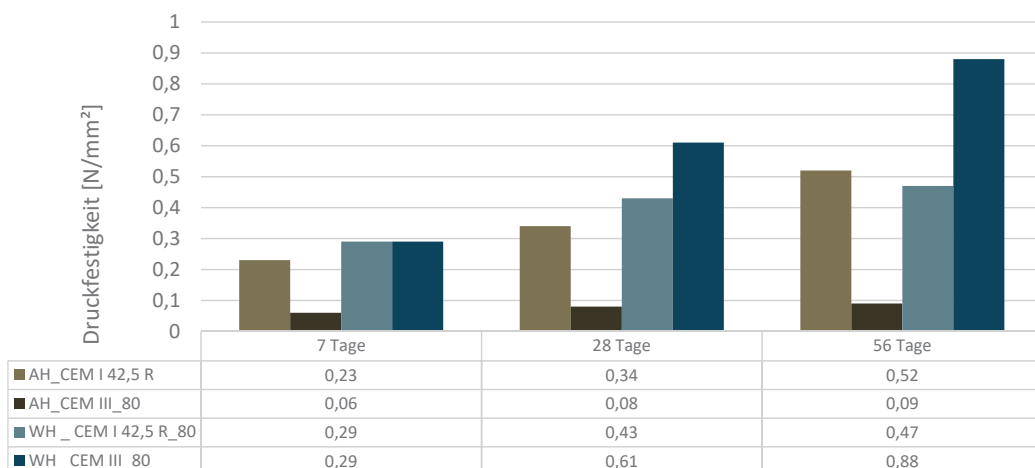


Bachelorarbeit:
Judith Danner

- ⇒ Zement mit hohem Hüttensandanteil zeigt ein deutlich schlechteres Abbindeverhalten als der Zement ohne Hüttensand (CEM I 42,5 R)
- ⇒ Bei hoher Organik von 60 M.-% findet kein Abbinden statt.

2.7 Vergleich der Ergebnisse Wilhelmshaven und Altshausen (Süddeutschland)

Bindemittelgehalt: 250 kg/m³, 60 M.-% Torf : 40 M.-% Sand

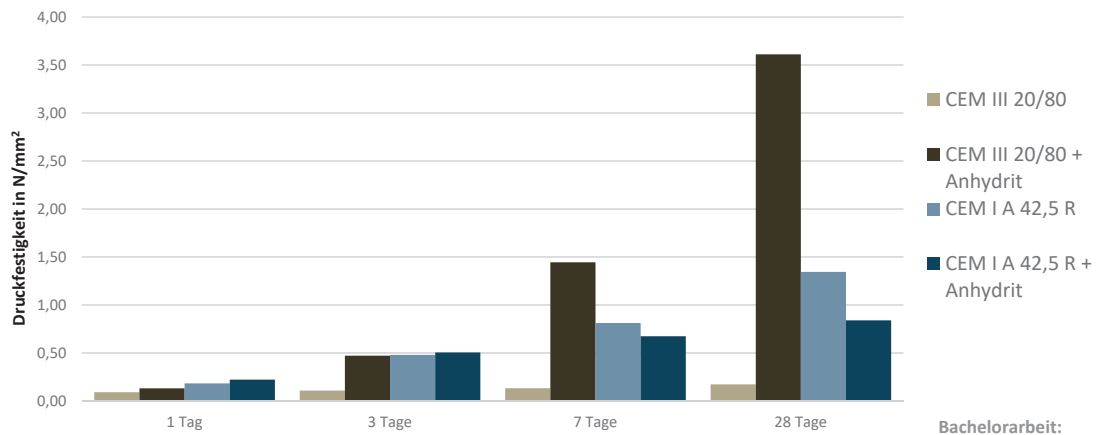


- Bei den Mischungen mit CEM I 42,5 R (Altshausen) und 80 % CEM I 42,5 R + 20 % Hüttensand (Wilhelmshaven) liegen vergleichbare Druckfestigkeiten vor.
- Unter Verwendung eines Mischbindemittel mit 80 % Hüttensand liegt die erreichbare Druckfestigkeit nach 56 Tage beim Torf Wilhelmshaven bei 0,9 N/mm². Mit dem Torf aus Altshausen wird keine Festigkeit erreicht.

2.8 Einfluss von Anhydrit im Bindemittel

Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zementart mit und ohne Anhydrit

Torf : Sand = 30 M.-% : 70 M.-%; Bindemittelgehalt: 250 kg/m³; w/z-Wert = 0,8
 Anhydritanteil: 20% der Zementmasse



Bachelorarbeit:
Judith Danner

3 Bodenstabilisierung nach den ZTV E-StB

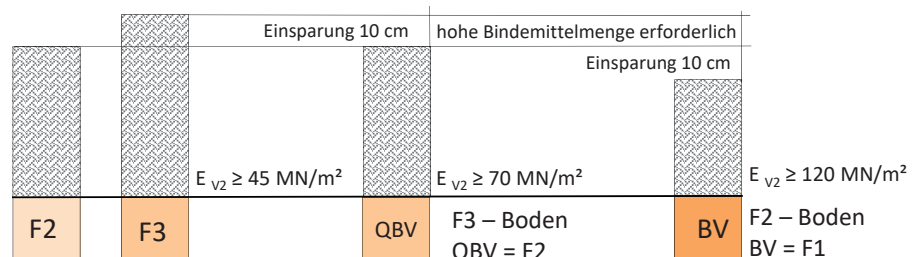
3.1 Möglichkeiten zur Bodenstabilisierung im Erdbau des Straßenbaus

Begriffe	Bodenverbesserung	QBV Qualifizierte Bodenverbesserung	BV Bodenverfestigung
Ziel	Verbesserung der Einbaubarkeit und Erhöhung der Tragfähigkeit	Verbesserung der Einbaubarkeit und Frostsicherheit sowie dauerhafte Erhöhung der Tragfähigkeit $q_u \geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	Durch eine Verfestigung wird eine dauerhaft tragfähige und frostsichere Tragschicht hergestellt. ZTV E-StB: > 4 - 6 N/mm²
Einsparung	Nutzung der anstehenden Böden und Vermeidung von Bodenaustausch	Reduzierung der Oberbaustärke durch eine Qualifizierte Bodenverbesserung im Planumbereich	Reduzierung der Oberbaustärke durch eine Bodenverfestigung im Planumbereich

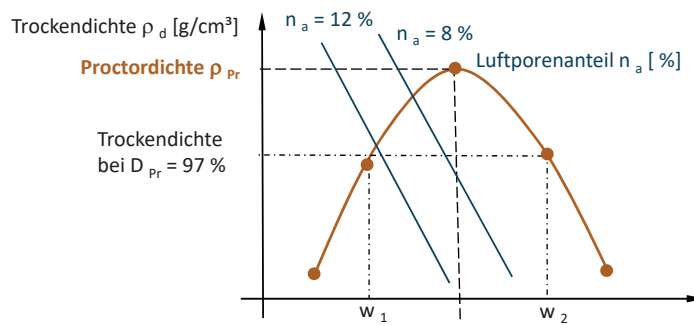
Reduzierung des frostsicheren Oberbaus:

Frostempfindlichkeit:
 F1 – nicht
 F2 – gering bis mittel
 F3 – sehr

Tragfähigkeit:
 E_{v2} – Wert
 Statischer Plattendruckversuch



3.2 Einfluss des Wassergehaltes auf die Verdichtung

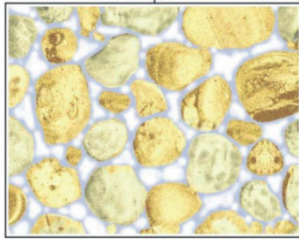


Anforderungen ZTV E-StB 17 für F3 – Böden:

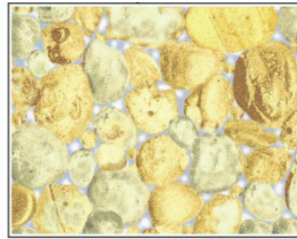
$D_{pr} \geq 97 \%$
 $n_a \leq 12 \%$

Wasserempfindliche Böden:
 $n_a \leq 8 \%$

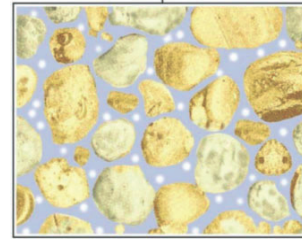
optimaler Einbauwassergehalt



Einbau F3 Boden mit $n_a \geq 12 \%$:
 - hohe Trockenfestigkeit
 - hohes Wasseraufnahmevermögen
 => bei Wasserzutritt Sackungen und Verlust der Tragfähigkeit



Einbau F3 Boden am Optimum:
 - max. Verdichtung möglich
 - gute Tragfähigkeit
 => $n_a \leq 8 \%$ d.h. nur geringe Wasseraufnahme möglich



Einbau F3 Boden bei $\geq w_2$:
 - geringe Wasserdurchlässigkeit
 - mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die Tragfähigkeit stark ab

3.3 Festigkeitsentwicklung ausgeführter Eignungsprüfungen

3.3.1 Bodenverbesserung: Oberboden-Auelehm-Anmoor

Untersuchte Mischung:

Oberboden : Aueablagerung : Anmoor
 33,3 Vol.-% : 33,3 Vol.-% : 33,3 Vol.-%

Bindemittel:

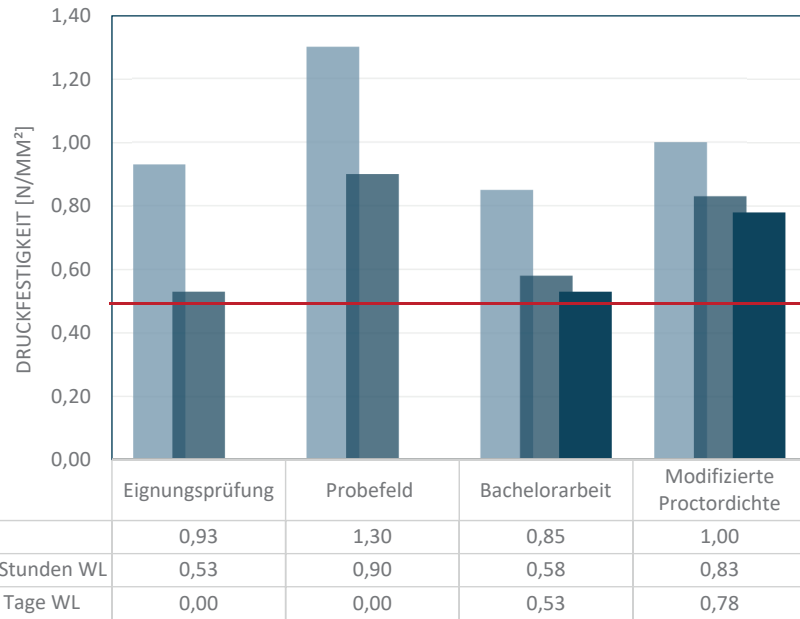
9 M.-% (115 kg/m³)
 Mischbindemittel 30 / 70
 30% Kalk : 70% Zement



Talaue Ehingen	pH – Wert [-]	Glühverlust [%]	TOC- Gehalt	Huminstoffe im Eluat	Natronlauge -Versuch
Oberboden	--	--	--	--	dunkelbraun
Auelehm	--	10	--	--	hellbraun
Anmoor	7,6	16	2,5	< 0,5	rostbraun

Druckfestigkeitsentwicklung

Baustoffgemisch: 33,3 Vol.-% Oberboden : 33,3 Vol.-% Auelehm : 33,3 Vol.-% Anmoor
9 M.-% Mischbindemittel (30% Kalk, 70 % Zement)



3.3.2 Bodenverbesserung: Sand mit Torfanteil (Erbach)

Untersuchte Mischung:

MI: Torf : Sand
20 M.-% : 80 M.-%

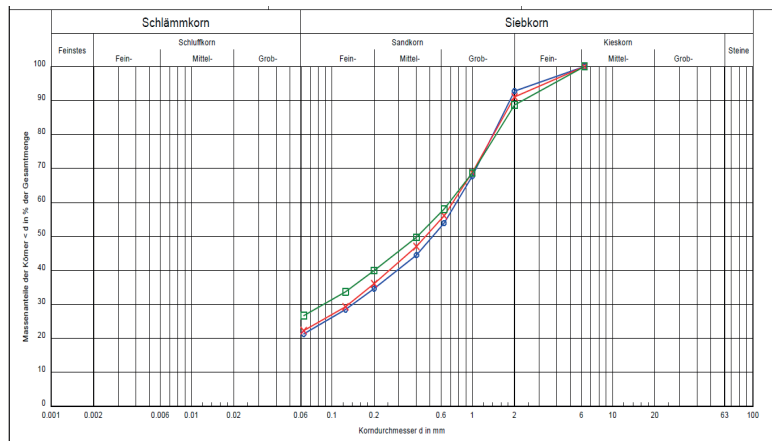
MII: Torf : Sand
40 M.-% : 60 M.-%

Quartärer Sand
mit hohem Kalkanteil

Bindemittel:

10 M.-%

CEM I 42,5, CEM III (20_80), Mischbindemittel 30/70, Kalk CL 90

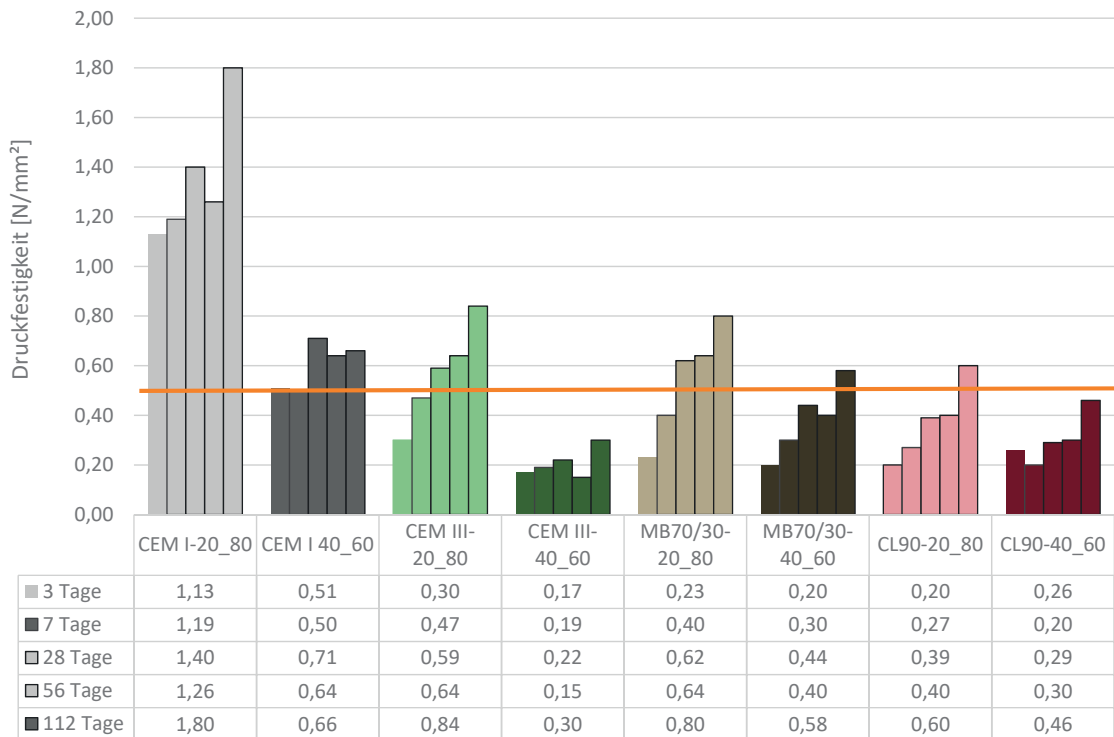


Talae Ehingen	pH – Wert [-]	Glühverlust [%]	TOC- Gehalt	Huminstoffe im Eluat	Natronlauge -Versuch
Sand (quartärer Sand)	--	--	--	keine	keine Verfärbung
Torf – Erbach	6,8	31	15	13	schwarz

Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bindemittelart

Ausgangsgemisch: Torf : Sand = 20 : 80 und 40 : 60 M.-%

Bindemittelgehalt: 10 M.-%

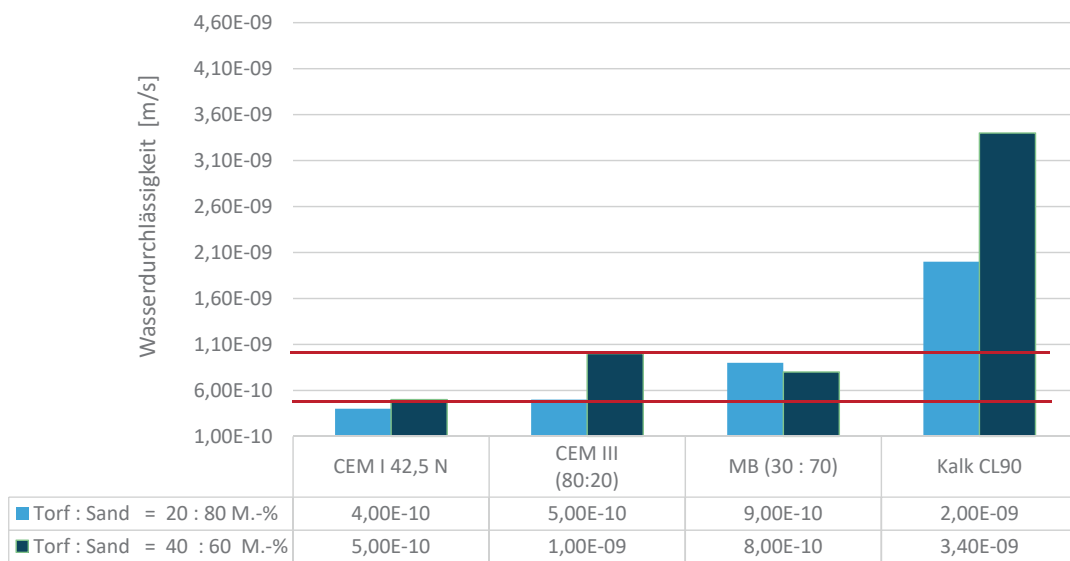


Wasserdurchlässigkeit der Baustoffgemisch i = 30

Baustoffgemisch I: 20 M.-% organischer Boden + 80 M.-% Sand

Baustoffgemisch II: 40 M.-% organischer Boden + 60 M.-% Sand

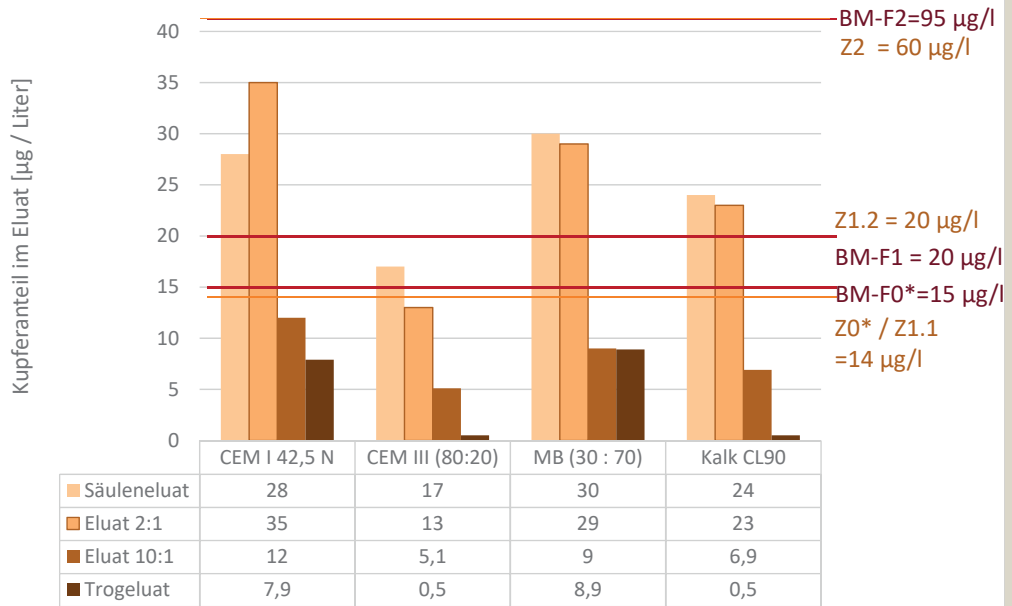
Bindemittelmenge: 10 M.-%



3.4 Umweltverträglichkeit bzw. Veränderung der Löslichkeit von Schadstoffen

Arsengehalt im Eluat (Torf mit geogenem Arsen)

Baustoffgemisch 40 M-% organischer Boden + 60 M.-% Sand + 10 M.-% Bindemittel

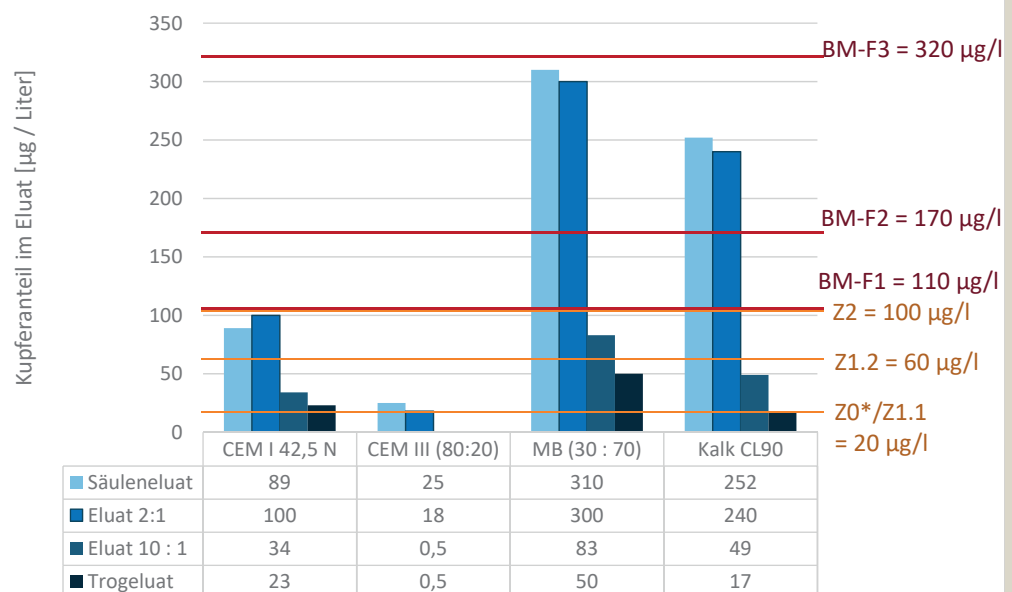


Arsengehalt im Feststoff:

Torf: Feststoff: 52 mg/kg (Z2), Eluat: u.d.B (Z0), Baustoffgemisch: 10 mg/kg – 14 mg/kg (Z0*, BM-0*)

Kupfergehalt im Eluat

Baustoffgemisch 40 M-% organischer Boden + 60 M.-% Sand + 10 M.-% Bindemittel



Kupfergehalt im Feststoff:

Torf: 13 mg/kg (BM-0, Z0)

Baustoffgemisch: 10 mg/kg – 19 mg/kg (Z0*, BM-0*)