

# **Experimentelle Untersuchungen zum Stoffverhalten von konditionierten Mehrphasengemischen mit organischen Bestandteilen**

DISSERTATION  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Martin Löwen**

Betreuer und erster Gutachter:  
Univ.-Prof. Dr. Ing. Richard A. Herrmann  
Universität Siegen

Zweiter Gutachter:  
Univ. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Rafiq Azzam  
RWTH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung:  
09.10.2019

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

Siegen 2019





## Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt das kontinuumsmechanische Verhalten von Mehrphasengemischen in Form von unbehandelten und konditionierten Böden mit organischen Bestandteilen/Beimengungen. In Böden enthaltene organische Bestandteile können das Verformungsverhalten von Böden maßgeblich beeinflussen. Böden mit organischen Bestandteilen, wie z. B. Torfe, zeigen zumeist ein vergleichsweise sehr ausgeprägtes Kompressionsverhalten. In Abhängigkeit von dem Zersetzungsgrad der organischen Bestandteile, dem Anteil der Organik und den damit verbundenen sehr hohen Wassergehalten ist eine Korrelation zur Tragfähigkeit feststellbar.

Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation durchgeführten Untersuchungen an Mehrphasengemischen (Boden/Boden-Bindemittel) erfolgten mit der Zielsetzung das Kompressionsverhalten sowie die Scherfestigkeit von Böden mit organischen Bestandteilen, in Abhängigkeit von der Zugabe verschiedener Bindemittel und -anteile, näher zu beschreiben und daraus einen verwendbaren Baustoff in Sinne eines Hochleistungs-Baustoffes-Bodens (HLBB) zu entwickeln.

Die Untersuchungen an drei Torfen mit voneinander abweichenden bodenmechanischen Kennwerten – zur Erfassung einer großen Bandbreite und Aussagekraft – zeigen, dass eine Konditionierung/Stabilisierung – vorzugsweise mit Zementen – möglich ist, womit auch anstehende Torfhorizonte unter Verwendung von Spezialtiefbauverfahren (z.B. Mixed-in-Place- oder Mixed-in-Plant-Verfahren) als Baugrund nutzbar gemacht werden können. Voraussetzung dafür sind gezielte Laboruntersuchungen, um die bodenmechanischen Parameter der konditionierten Böden möglichst genau zu ermitteln. Dabei ist die Wahl der Initialspannung und der Zeitpunkt der Laststeigerung von grundlegender Bedeutung für das spätere Verformungsverhalten des mit Bindemitteln verbesserten Baugrundes.

Mit dieser Arbeit soll – was bisher mit granularen Böden bei Mixed-in-Place und weiteren Verfahren bereits möglich ist – ein neuer, weiter reichender Ansatz im Sinne eines neuen „Designs“ des Baugrundes vorgestellt werden: Böden mit organischen Bestandteilen, anstelle einer Tiefgründung oder mit einem Austausch und Deponierung des originären Baugrundes, durch eine Konditionierung zu stabilisieren bzw. zu verfestigen, um eine Belastung des Stoffkreislaufs zu vermindern oder vollständig zu vermeiden.



## Abstract

This dissertation deals with the continuum-mechanical behavior of multi-phase mixtures, untreated soils with organic matters and treated soils with organic matters. Organic matter content in soils can determine the deformation behavior of soils totally. Soils with organic components such as peat are well known for their high compressibility. Depending on the content and degradation of the organic matter, as well as the resulting water content a correlation to the bearing capacity of the soil can be established.

The aim of the performed investigations on multi-phase mixtures (soil/soil with bonding agent) within the scope of this dissertation is to establish the compression and shear behavior of soils with organic content after adding different fractions of binding agent. The ultimate target is to develop a high-performance building material/soil that can be utilized. Hence, three peats with different soil-mechanical properties were investigated to cover a wide range of parameters and to gain trusted results. The results show that it is possible to stabilize the peats by conditioning with cement, thus a peat layer can be stabilized through special ground engineering methods (e.g. Mixed-in-Place- or Mixed-in-Plant-Methods) to become stable construction ground. However, the precondition for the success is to carry out laboratory investigations on the conditioned soils to obtain their precise soil-mechanical properties. In doing so, the selection of the initial stress and the timing for load increase are of eminent importance for the future deformation behavior of the improved soils.

In this dissertation a new far-reaching approach in construction ground design for soils with organic content is introduced – till now it was possible to apply such concepts on granular soils using Mixed-in-Place and other methods – utilizing conditioning methods to stabilize soils with organic content instead of excavating and depositing the soil on landfills for replacement or instead of constructing deep foundations. This would minimize the pressure on the cycle of materials.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Struktur und Ziele der Arbeit</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Baugrundverbesserung</b> .....	<b>5</b>
3.1 Historie.....	5
3.2 Stand der Technik.....	7
3.2.1 Baugrundverbesserung durch Bodenaustausch.....	7
3.2.2 Statische Methoden .....	7
3.2.2.1 Verdichtung bindiger Böden durch Vorbelastung .....	7
3.2.2.2 Verdichtung bindiger Böden durch Vorbelastung und Vertikaldräns zur Beschleunigung der Konsolidation .....	10
3.2.3 Grundwasserbeeinflussung .....	12
3.2.4 Verdichtung.....	13
3.2.4.1 Bodenverdichtung mittels schwerer Fallgewichte .....	13
3.2.4.2 Impulsverdichtung.....	13
3.2.5 Vakuumkonsolidierung .....	15
3.2.6 Bewehrung des Baugrundes .....	16
3.2.7 Mixed-in-Place – Tiefreichende Bodenstabilisierung .....	17
3.2.7.1 Nass-Misch-Verfahren .....	19
3.2.7.2 Trocken-Misch-Verfahren .....	21
3.2.8 Oberflächennahe Massenstabilisierung.....	22
3.2.9 Mixed-in-Plant.....	22
3.2.10 Düsenstrahlverfahren .....	23
<b>4 Organische Böden und Böden mit organischen Bestandteilen</b> .....	<b>25</b>

4.1	Organische Ablagerungen.....	27
4.1.1	Mudden .....	27
4.1.2	Torfe .....	28
4.2	Prozess der Inkohlung.....	31
<b>5</b>	<b>Klassifizierung von Böden mit organischen Bestandteilen und organischen Böden .....</b>	<b>33</b>
5.1	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung nach DIN EN ISO 14688.....	33
5.2	Klassifizierung nach DIN EN ISO 18196 .....	37
5.3	Bezeichnung der Böden nach DIN 1054 .....	41
5.4	Klassifizierung nach Schweizer Norm bzw. USCS.....	41
5.5	Zersetigungsgrad nach DIN 19682-12 .....	44
5.6	Bestimmung des Humusgehaltes.....	45
5.7	Klassifizierung nach ASTM International.....	46
5.8	Weitere Klassifizierungen .....	50
5.9	Zusammenfassung .....	51
5.10	Behandlung von Bodenaushub mit organischen Bestandteilen .....	51
<b>6</b>	<b>Versuchsböden .....</b>	<b>53</b>
6.1	Auswahl und Herkunft .....	53
6.2	Homogenisierung der Versuchsböden .....	53
6.3	Ergebnisse der Untersuchungen an den Versuchsböden .....	53
6.3.1	Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17982-4.....	53
6.3.2	Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-1 .....	55
6.3.3	Wasseraufnahme nach DIN 18132 .....	57
6.3.4	Korndichte nach DIN 18124 .....	59
6.3.5	Kalkgehalt nach DIN 18129.....	61
6.3.6	Bestimmung der organischen Anteile.....	63
6.3.6.1	Glühverlust nach DIN 18128 .....	63
6.3.6.2	Organischer Kohlenstoff $C_{org}$ nach DIN 19539 .....	64
6.3.6.3	Vergleich der Untersuchungsergebnisse Glühverlust $V_{gl}$ und Humus.....	66
6.3.7	Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1 .....	67
6.3.8	Proctorversuche nach DIN 18127 .....	69
6.3.9	Bestimmung des Sulfatgehaltes DIN EN ISO 10304.....	70
6.3.10	In situ Bodenkenngrößen .....	71
6.3.11	Röntgenanalytik.....	71
6.3.11.1	Röntgenbeugungsanalyse (RBA).....	71
6.3.11.2	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) .....	73
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen an den Versuchsböden –	

	Klassifizierung der Versuchstorfe .....	75
<b>7</b>	<b>Stand der Wissenschaft zur Klassifikation und zum Stoffverhalten von Mehrphasengemischen mit organischen Anteilen .....</b>	<b>77</b>
7.1	Torflagerstätten.....	77
7.2	Klassifikationsmerkmale organischer Böden .....	78
7.2.1	Untersuchungen zum organischen Anteil .....	85
7.2.2	Weitere Verfahren zur Bestimmung des organischen Anteils .....	88
7.2.3	Vergleich der verschiedenen Methoden .....	90
7.2.4	Vergleich verschiedener Untersuchungen .....	91
7.3	Zusammensetzung organischer Substanz .....	97
7.4	Kompressionsverhalten .....	100
7.5	Eindimensionale Konsolidationstheorie .....	101
7.6	Sekundärsetzungen.....	104
7.7	Tertiärsetzungen.....	107
7.8	Scherverhalten.....	113
7.9	Einbau von organischen/organikhaltigen Böden .....	114
7.10	Numerische Näherungsverfahren von Bodenverformungen – Stoffgesetze.....	115
<b>8</b>	<b>Bodenverbesserung mit Bindemitteln .....</b>	<b>117</b>
8.1	Tiefreichende Bodenstabilisierung mit Bindemitteln .....	118
8.2	Bindemittel .....	120
8.2.1	Zement.....	120
8.2.2	Kalk.....	121
8.2.3	Kalk-Zement-Stabilisierung.....	124
8.2.4	Sulfatreaktion.....	125
8.2.5	Beeinflussung des pH-Wertes .....	125
8.3	Veränderung der Durchlässigkeit .....	127
8.4	Veränderung des Kompressionsverhalten.....	127
8.5	Einfluss der Vorbelastung.....	128
8.6	Scherverhalten.....	131
8.7	Weitere Untersuchungen zur Stabilisierung von Torf .....	131
<b>9</b>	<b>Oedometerversuche .....</b>	<b>133</b>
9.1	Bindemittel und Zuschlag .....	135
9.2	Herstellung der Probekörper.....	135
9.3	Ermittlung des Wassergehaltes der eingebauten Probekörper .....	137
9.4	Ermittlung der Porenzahlen bzw. Porenräume der Probekörper .....	137
9.5	Durchführung der Kompressionsversuche .....	139

9.6	Probenbezeichnungen der einzelnen Versuchsreihen .....	139
9.7	Sättigung der Versuchsreihen .....	141
9.8	Darstellung der Versuchsergebnisse.....	141
9.8.1	Setzungen $s'_{ges}$ bzw. $s'_{ink}$ und Porenzahlen $e_{ges}$ .....	141
9.8.2	Oedometermodule.....	142
9.9	Ergebnisse der Oedometerversuche.....	144
9.9.1	Versuchsreihen – unbehandelte Versuchsböden – T1, T2, T3 und S1.....	145
9.9.2	T1-Versuchsreihen .....	152
9.9.2.1	Versuchsreihen – T1-60 und 105 °C .....	152
9.9.2.2	T1-DM-LP-Versuchsreihen.....	155
9.9.2.3	T1-DM-B500-Versuchsreihen.....	158
9.9.2.4	T1-DM-B300-Versuchsreihen.....	163
9.9.2.5	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	167
9.9.2.6	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	172
9.9.3	T2-Versuchsreihen .....	185
9.9.3.1	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	185
9.9.3.2	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	189
9.9.4	T3-Versuchsreihen .....	192
9.9.4.1	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	192
9.9.4.2	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	196
9.9.5	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen.....	199
9.10	Näherung der Verformungen der Oedometerversuche .....	201
9.11	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Oedometerversuche .....	204
<b>10</b>	<b>Einaxiale Druckversuche .....</b>	<b>233</b>
10.1	Herstellung der Probekörper und Durchführung der Versuche .....	233
10.2	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche .....	234
10.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche .....	236
<b>11</b>	<b>Scherversuche.....</b>	<b>237</b>
11.1	Herstellung der Probekörper und Durchführung der Versuche .....	237
11.2	Ergebnisse der Scherversuche .....	239
11.2.1	Unbehandelte Versuchsreihen .....	239
11.2.2	T1-DM-Liapor-Versuchsreihen.....	240
11.2.3	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	241
11.2.4	T1-DM-B500-Versuchsreihen .....	242
11.2.5	T1-DM-B300-Versuchsreihen .....	244
11.2.6	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	245
11.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Scherversuche .....	247



<b>12</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>249</b>
	<b>Literaturverzeichnis Literatur, Normen, Regelwerke und Gesetze.....</b>	<b>253</b>
	<b>Anhang (A.).....</b>	<b>289</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Wirkungsweise der Vorbelastung zur Baugrundverbesserung (aus [18]).	8
Abb. 3.2:	l.: gekräuselter Vertikaldrän, r.: Zusammenhang zwischen Seitendruck und Durchflusskapazität (aus DIN EN 15237:2007 [22]).	11
Abb. 3.3:	Treibhausgas-Bilanz Moorentwässerung (aus [30]).	12
Abb. 3.4:	Prinzip der Impulsverdichtung (aus [48]).	14
Abb. 3.5:	Prinzip der Vakuumkonsolidierung (aus [49]).	15
Abb. 3.6:	Federmodelle für die Konsolidation unter Vorlast (a) und unter Vakuum (b) (aus [50]).	16
Abb. 3.7:	Zusammenstellung der verschiedenen DSM-Methoden (aus [14]).	17
Abb. 3.8:	Unterteilung von in situ Bodenstabilisierungen nach der Zugabe des Bindemittels (a), dem Vermischungsprinzip (b) und dem Ort der Vermischung mit verschiedenen länderspezifischen Verfahren (aus [61]).	18
Abb. 3.9:	o. l.: Herstellprozess Nass-Misch-Verfahren, o. r.: Beispiele für Einbauraster (aus [68]), u.: Verschiedene Einbauanordnungen von DSM-Säulen (aus [71]).	19
Abb. 3.10:	Prinzip Tubular-Soil-Mixing (aus [70]).	20
Abb. 3.11:	Monitoring Nass-Misch-Verfahren DSM (aus [14]) nach [72]).	20
Abb. 3.12:	Herstellprozess Trockenmisch-Misch-Verfahren DSM (aus [68]).	22
Abb. 3.13:	Verfahrensweise Oberflächennahe Massenstabilisierung (aus [68]).	22
Abb. 3.14:	Prinzipdarstellung der Varianten des Düsenstrahlverfahrens (aus [14]).	23
Abb. 3.15:	HDI-Elementformen (aus [76]).	24
Abb. 4.1:	Moorverbreitung in Deutschland auf Basis der Geologischen Übersichtskarte 1:200.000, BGR, 2011 (aus [106] (verändert), aus [107]).	29
Abb. 5.1:	Plastizitätsdiagramm (aus DIN 18196:2011-5 [126]).	38
Abb. 5.2:	Plastizitätsdiagramm (aus DIN EN ISO 14688-2:2018 [118]).	39
Abb. 5.3:	Gruppensymbole für feinkörnige Böden (aus SN 670 004-2b-NA [132]).	42
Abb. 5.4:	Gruppennamen der feinkörnigen, organischen Böden (aus SN 670 004-2b-NA [132]).	43

Abb. 5.5:	Klassifizierung nach verschiedenen Systemen auf Grundlage des Aschgehaltes/organischen Anteils in M.-% der Trockensubstanz (aus [166]).	50
Abb. 6.1:	Kornverteilungslinien der Versuchsböden.	54
Abb. 6.2:	Natürliche Wassergehalte $w_n$ der Versuchsböden.	57
Abb. 6.3:	Zeit-Wassergehaltlinien (log t-w-Linien) der Versuchsböden.	59
Abb. 6.4:	Korndichten $\rho_s$ der Versuchsböden.	60
Abb. 6.5:	Kalkgehalte $V_{Ca}$ der Versuchsböden.	62
Abb. 6.6:	Glühverluste $V_{gl}$ der Versuchsböden.	64
Abb. 6.7:	ToC <sub>400</sub> bzw. $C_{org}$ / Humusgehalte der Versuchsböden.	65
Abb. 6.8:	Glühverluste $V_{gl}$ und Humusgehalte der Versuchsböden.	66
Abb. 6.9:	l.: Fließgrenzenversuche an den getrockneten (60/105°C) und den nicht getrockneten Versuchsböden, r.: Ausrollgrenzenversuche der Versuchsböden.	68
Abb. 6.10:	Ergebnisse der Proctorversuche an den Versuchsböden T1 und T2.	70
Abb. 6.11:	Diffraktogramm Versuchstorf T1.	72
Abb. 6.12:	Diffraktogramm Versuchstorf T2.	72
Abb. 6.13:	Diffraktogramm Versuchstorf T3.	73
Abb. 6.14:	Diffraktogramm Versuchsboden S1.	73
Abb. 7.1:	REM-Aufnahmen James Bay Peat, l.: vertikaler Schnitt, r.: horizontaler Schnitt (aus [195]).	78
Abb. 7.2:	l.: Abhängigkeit von Fasergehalt und Kornreindichte (aus [211] aus [176]), r.: Abhängigkeit von Zersetzungsgrad und Wassergehalt (aus [212] aus [176]).	79
Abb. 7.3:	l.: Zusammenhang Fasergehalt und Trockendichte, r.: Zusammenhang Kornreindichte und organischer Anteil (aus [176] (aus [211])).	80
Abb. 7.4:	Zusammenhang zwischen $C_{org}$ und Trockenrohddichte (aus [213]).	80
Abb. 7.5:	Zusammenhang zwischen Zersetzungsgrad (H) nach von Post und Trockenrohddichte (aus [213]).	81
Abb. 7.6:	Korndichten von Glührückstände organischer Böden aus Mecklenburg-Vorpommern (aus: [140]).	81
Abb. 7.7:	Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl verschiedener schwach zersetzter Torfe, Tone sowie Reinsand (aus [195]).	82
Abb. 7.8:	o.: Abhängigkeit der bez. Setzung von der Spannung, u.: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Spannung (aus [221]).	83
Abb. 7.9:	Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl e (aus [86]).	84

Abb. 7.10:	Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl $e$ (aus [223]).	85
Abb. 7.11:	$\alpha$ : Vergrößerungsfaktor des Glühverlustes bei einer Glühtemperatur von 800 ggü. 550 °C (nachbearbeitet), $\mu$ : Abhängigkeit der Korndichte vom Glühverlust (aus [230]).	87
Abb. 7.12:	Vergleich Glühverlust und trockene Oxidation mit eigenen Versuchen [237] und Versuchen von [111] u. [230] (aus [237]).	91
Abb. 7.13:	l.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Wassergehalt, r.: Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Plastizitätszahl ( $\gamma=1000\%$ ).	92
Abb. 7.14:	l.: Zusammenhang Fließgrenze und Plastizitätszahl ( $\gamma=50\%$ ), r.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Kalkgehalt.	93
Abb. 7.15:	l.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Fließgrenze, r.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Korndichte.	95
Abb. 7.16:	Klassifikation organischer Substanzen (aus [214]).	97
Abb. 7.17:	Bestimmung der Konsolidationszeit nach der $\log t$ -Methode [278] (aus [279]).	102
Abb. 7.18:	Bestimmung der Konsolidationszeit mit der $\sqrt{t}$ -Methode nach Taylor (aus [279]).	102
Abb. 7.19:	Zeitlicher Verlauf der Zusammendrückung innerhalb einer Laststufe (aus DIN 18135:2012 [280], vgl. auch (EVB, 1993)).	103
Abb. 7.20:	Kompressionsbeiwerte in Abhängigkeit von dem Wassergehalt (aus [195] mit Werten aus [295] und anderen Literaturwerten).	106
Abb. 7.21:	Zeit-Zusammendrückungs-, -Porenzahl und -Porenwasserdrucklinien (halblog. Darstellung) (aus [8] (nachbearbeitet)).	108
Abb. 7.22:	Kompressionsparameter faseriger und amorpher Torf (aus [8] (nachbearbeitet)).	110
Abb. 7.23:	Zeit-Setzungskurven von Dammschüttungen auf Torf (aus [319] (nachbearbeitet) nach [13]).	112
Abb. 7.24:	Porenzahl $e$ und Porenwasserüberdruck $\Delta u$ in Abhängigkeit von der Zeit $t$ bei einem eindimensionalen Kompressionsversuch an Sedimentboden (aus [315]).	113
Abb. 7.25:	$\alpha$ : Fasern in losem Zusammenhang (unkomprimiert), $\alpha$ : Faserverteilung unter Lasteinwirkung, $\mu$ : Faserverteilung bei direkter Scherung, $\mu$ : Faserverteilung unter triaxialer Schereinwirkung (aus [218] (nachbearbeitet)).	114
Abb. 8.1:	Bereiche der Korngrößenverteilungen für die Behandlung mit Kalk und hydraulischen Bindemitteln (aus [337] (nachbearbeitet)).	118

Abb. 8.2:	Entwicklung der Wahl des Bindemittel bei der Tiefreichenden Bodenstabilisierung (aus [63]).	119
Abb. 8.3:	Zusammensetzung der Baukalke nach DIN EN 459-1 [348] (aus [350]).	121
Abb. 8.4:	Verschiebung der Proctorkurve zur nassen Seite (aus [341]).	123
Abb. 8.5:	Synergetische Wirkungsweise von Mischbindern (aus [359] (nachbearbeitet) angelehnt an [360]).	125
Abb. 8.6:	Auswirkungen der Zementzugabe auf den pH-Wert von Böden mit organischen Bestandteilen (aus [372]).	126
Abb. 8.7:	Auswirkungen der Zementbehandlung (8 bis 100 M.-% der Trockenmasse) auf $C_d/C_c$ -Wert Böden mit organischen Bestandteilen (aus [372]).	127
Abb. 8.8:	Einaxiale Druckfestigkeiten verschiedener Mischungen (aus [385] (nachbearbeitet)).	128
Abb. 8.9:	Spannungs-Dehnungs-Kurven von nicht vorbelasteten und vorbelasteten einaxialen Druckversuchen an mit $250\text{kg/m}^3$ behandeltem Ballydermot Torf (aus [385]).	129
Abb. 8.10:	Einaxiale Druckfestigkeiten vorbelasteter/unbehandelter und mit 8 % Zement behandelte Proben (aus [386] (nachbearbeitet)).	130
Abb. 8.11:	Beziehung zwischen Bindemittelanteil und Scherfestigkeit (aus [389]).	131
Abb. 9.1:	o.: Oedometerzelle mit feststehendem Ring, u.: mit schwebend angeordnetem Ring (aus DIN 18135:2012 [280]).	133
Abb. 9.2:	Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – l.: $\log \sigma - s'_{\text{ges}}$ , r.: $\log \sigma - e_{\text{ges}}$ .	147
Abb. 9.3:	Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – l.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=20,0$ , r.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=4,0$ .	148
Abb. 9.4:	Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – l.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{außen})} - y_{\text{max}}=10,0$ , r.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{außen})} - y_{\text{max}}=2,0$ .	149
Abb. 9.5:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma - s'_{\text{ges}}$ , r.: $\log \sigma - e_{\text{ges}}$ .	153
Abb. 9.6:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=20,0$ , r.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=4,0$ .	154
Abb. 9.7:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{außen})} - y_{\text{max}}=10,0$ , r.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{außen})} - y_{\text{max}}=4,0$ .	154
Abb. 9.8:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma - s'_{\text{ges}}$ , r.: $\log \sigma - e_{\text{ges}}$ .	155
Abb. 9.9:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=20,0$ , r.: $\sigma - E_{\text{Oed}(\text{innen})} - y_{\text{max}}=4,0$ .	156

Abb. 9.10:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=10,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=4,0$ .....	157
Abb. 9.11:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	159
Abb. 9.12:	T1-DM- B500-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=20,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=6,0$ .....	159
Abb. 9.13:	T1-DM-B 500-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=10,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=6,0$ .....	160
Abb. 9.14:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	163
Abb. 9.15:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=20,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=6,0$ .....	164
Abb. 9.16:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=10,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=6,0$ .....	165
Abb. 9.17:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	167
Abb. 9.18:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=16,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=6,0$ .....	169
Abb. 9.19:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=10,0$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)} - y_{max}=3,0$ .....	169
Abb. 9.20:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – $\log \sigma-s'_{ges}$ .....	174
Abb. 9.21:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – $\log \sigma-e_{ges}$ .....	175
Abb. 9.22:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – $\sigma-E_{Oed(innen)}$ .....	176
Abb. 9.23:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	176
Abb. 9.24:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	181
Abb. 9.25:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	182
Abb. 9.26:	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	186
Abb. 9.27:	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	187
Abb. 9.28:	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	189
Abb. 9.29:	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	190
Abb. 9.30:	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	193
Abb. 9.31:	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	193
Abb. 9.32:	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma/e_{ges}$ .....	196
Abb. 9.33:	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	197
Abb. 9.34:	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log \sigma-s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma-e_{ges}$ .....	200
Abb. 9.35:	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma-E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma-E_{Oed(au\beta en)}$ .....	200

Abb. 9.36:	Soft Soil Fittings T1 – l.: $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .....	202
Abb. 9.37:	Soft Soil Fittings T2 – l.: $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .....	202
Abb. 9.38:	Soft Soil Fittings T3 – l.: $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.: $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .....	203
Abb. 9.39:	T1-60°C- und 105°C-1d 12,5-20d 400 und T1-DM-10%-und -20% LP-1d 12,5-5d 400-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	208
Abb. 9.40:	REM-Aufnahmen der Calciumcarbonataufwuchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 4 h Ruhezeit, EDRS-Spektren von 2 Bereichen der Calciumcarbonataufwuchse des mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 4 h Ruhezeit. ....	210
Abb. 9.41:	Calciumcarbonataufwuchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 – o. l.: direkt nach Anmischung, o. r.: nach 2 h Ruhezeit, m. l.: nach 4 h Ruhezeit, m. r.: nach 14 h Ruhezeit, u. l.: nach 24 h Ruhezeit, u. r.: nach 72 h Ruhezeit.....	211
Abb. 9.42:	REM-Aufnahmen der Calciumcarbonataufwuchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 72 h Ruhezeit, EDRS-Spektren von 2 Bereichen der Calciumcarbonataufwuchse des mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach 72 h Ruhezeit. ....	212
Abb. 9.43:	l.: B500-Versuchsreihen – $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungsstufen $\sigma=12,5$ und 25,0 kN/m <sup>2</sup> , r.: B 300-Versuchsreihen – $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungsstufe $\sigma=12,5$ und 25,0 kN/m <sup>2</sup> .....	213
Abb. 9.44:	BK-Versuchsreihen – $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungsstufen $\sigma=12,5$ und 25,0 kN/m. <sup>2</sup> .....	214
Abb. 9.45:	T1-DM-5% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	215
Abb. 9.46:	T1-DM-10% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	216
Abb. 9.47:	T1-DM-20% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	216
Abb. 9.48:	l.: T1-DM-5% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – $\sigma$ -rel. D. $E_{Oed(innen)}$ , r.: T1-DM-10% B500, B300, BK u. CEM I – $\sigma$ -rel. D. $E_{Oed(innen)}$ .....	217
Abb. 9.49:	T1-DM-20% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – $\sigma$ -rel. D. $E_{Oed(innen)}$ .....	217
Abb. 9.50:	T1-DM/WM-5% CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	218
Abb. 9.51:	T1-DM/WM-10 % CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	219
Abb. 9.52:	T1-DM/WM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	219
Abb. 9.53:	T1-DM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$ .....	220



Abb. 9.54:	T1-DM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ -rel. D. $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ -rel. D. $E_{Oed(aussen)}$ .....	221
Abb. 9.55:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	222
Abb. 9.56:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	223
Abb. 9.57:	l.: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – rel. D. $E_{Oed(innen)}$ , r.: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – rel. D. $E_{Oed(innen)}$ .....	223
Abb. 9.58:	T1, T2 u. T3-DM-5% CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	225
Abb. 9.59:	T1, T2 u. T3-DM-10% CEM I-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	225
Abb. 9.60:	T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-1,3 u. 7d 25-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	226
Abb. 9.61:	T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-7d 25-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	227
Abb. 9.62:	T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-7d 25-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	228
Abb. 9.63:	T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-10 u. 3d 0 bzw. 1d 12,5 u. 1d 25-Versuchsreihen – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\sigma$ - $E_{Oed(au\ss en)}$ .....	229
Abb. 9.64:	Schematische Entwicklung der Oedometermodule $E_{Oed}$ bzw. bez. ink. Setzungen $s'_{ink}$ des mit CEM I konditionierten T1 in Abhängigkeit von der Haltedauer der Initialspannung – l.: $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.: $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ .....	230
Abb. 10.1:	Dehnungs-Bruchspannungsdiagramme ( $\epsilon_v$ - $q_u$ -Linien) der konditionierten Versuchsböden T1 und T2. l.: Einzelwerte der Versuchsreihen, r.: Mittelwerte der Versuchsreihen.....	235
Abb. 11.1:	T1-unbehandelt – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	239
Abb. 11.2:	T1-LP – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	240
Abb. 11.3:	T1-BK – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	241
Abb. 11.4:	T1-B500 – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	242
Abb. 11.5:	T1-B300 – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	244
Abb. 11.6:	T1-CEM I – l.: w-T, $x_{max}=20$ mm, r.: w-T, $x_{max}=4$ mm.....	245



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Entwicklung der Baugrundverbesserungsverfahren in Japan a) (aus [14]).	5
Tab. 3.2:	Entwicklung der Baugrundverbesserungsverfahren in Japan b) (aus [14]).	6
Tab. 3.3:	Anwendungsgrenzen der Baugrundverbesserung in Abhängigkeit der Bodenart (nach [15]).	6
Tab. 3.4	$E_s$ -Werte für Setzungsabschätzungen nach [21].	10
Tab. 3.5:	Übersicht über Vertikaldrän-Typen und Einbaumethoden (verändert aus [18]).	11
Tab. 4.1:	Feuchtigkeit, elementare Zusammensetzung während der Inkohlungsstufen (nach [112]).	31
Tab. 4.2:	Veränderungen organischen Materials während der Inkohlung (nach [115] (nach [116], Angaben zur Dichte nach [117])).	32
Tab. 5.1	Korngrößenfraktionen nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92].	34
Tab. 5.2:	Benennung von organischen Böden nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92].	34
Tab. 5.3:	Bestimmung des Zersetzungsgrades von feuchtem Torf durch Ausquetschversuch nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92].	35
Tab. 5.4:	Klassifizierung von Böden $\leq 2$ mm Korngröße mit organischen Anteilen nach DIN EN ISO 14688-2:2018 [118].	35
Tab. 5.5:	Begriffe für die Beschreibung des organischen Anteils nach DIN EN ISO 14688-2:2018 [118].	36
Tab. 5.6:	Humusgehalte von Böden nach Färbung (o.: nach DIN 4022-1:1987 [123], u.: nach DIN 4022-1:1969 [124]).	37
Tab. 5.7:	Bezeichnung der Böden nach DIN 1054:2010 [130].	41
Tab. 5.8:	Bestimmung der organischen Anteilen mit Natronlauge (nach SN 670370a:2008 [133]).	44
Tab. 5.9:	Bestimmung der Zersetzungsstufen und des Zersetzungsgrades von pedogen nicht veränderten Torfen (aus DIN 19682-12:2007-11 [135]).	44
Tab. 5.10:	Humusstufen nach [93] und entsprechende $C_{org}$ -Werte.	46
Tab. 5.11:	ASTM Normen zur Bestimmung von Eigenschaften bzw. zur Klassifizierung von Torf.	46

Tab. 5.12:	Wasseraufnahmevermögen nach ASTM D 4427:2018 [151] .....	47
Tab. 5.13:	Bezeichnung des pH-Wertes nach ASTM D 4427:2018 [151].....	48
Tab. 5.14:	Aschegehalt mit Umrechnung in Glühverlust nach ASTM D 4427:2018 [151]. ....	49
Tab. 5.15:	Unterteilung organische Böden nach ASTM D 4427:2018 [151]. .....	49
Tab. 5.16:	Fasergehalt nach ASTM D 4427:2018 [151]. .....	50
Tab. 6.1:	Kornverteilungen der Versuchsböden nach [168].....	54
Tab. 6.2:	$k_f$ -Werte der Versuchsböden nach den Kornverteilungen. ....	55
Tab. 6.3:	natürliche Wassergehalte, -anteile und Feststoffanteile der Versuchsböden.....	56
Tab. 6.4:	Wasseraufnahmevermögen der Versuchsreihen. ....	58
Tab. 6.5:	Korndichten der Versuchsböden. ....	60
Tab. 6.6:	Kalkgehalte der Versuchsböden.....	61
Tab. 6.7:	Glühverluste $V_{gl}$ und Feststoffanteile der Versuchsböden.....	63
Tab. 6.8:	TOC400 bzw. $C_{org}$ und Humusgehalte nach DIN 19539:2016 [174].....	64
Tab. 6.9:	Vergleich der Untersuchungsergebnisse Glühverlust $V_{gl}$ und Humus. ....	66
Tab. 6.10:	Konsistenzgrenzen der Versuchsböden.....	67
Tab. 6.11:	Plastizitätsbereiche nach DIN 14688-2:2018 [118].....	69
Tab. 6.12:	Plastizitäts-, Konsistenzahlen und Zustandsformen der unbehandelten Versuchsböden.....	69
Tab. 6.13:	Sulfatgehalt Versuchstorf T1 .....	71
Tab. 6.14:	in situ Bodenkenngrößen der Versuchsböden.....	71
Tab. 6.15:	Zusammenstellung der RFA-Ergebnisse.....	74
Tab. 7.1:	Vorkommen von Torf (nach [195] nach [2], [196], [197], [198], [199], [200]). ....	77
Tab. 7.2:	Physikalische Eigenschaften von Torfen (aus [201] aus [202]). .....	78
Tab. 7.3:	Einteilung der organischen Böden nach bodenmechanischen Klassifikationskennwerten und Anhaltswerte für zugehörige Bodenkenngrößen (aus [246]). .....	96
Tab. 7.4:	Die wichtigsten Eigenschaften der Huminstoffe (nach [253]). ....	98
Tab. 7.5:	Austauschkapazität, spez. Oberfläche und Ladungsdichte wichtiger Austauscher (aus [177]). .....	100
Tab. 7.6:	Wassergehalte, Durchlässigkeiten und $C_d/C_c$ -Werte verschiedener Torfvorkommen (nach [295]). .....	105
Tab. 7.7:	Empirische Korrelationen zu Kompressionsbeiwerten von Torf (nach [218]). ....	106
Tab. 7.8:	Bodenkennwerte der Versuchstorfe der Untersuchungen von [8] (nach [8])......	109

Tab. 8.1	Festigkeitsbeeinflussende Faktoren bei der Anwendung der tiefreichenden Bodenstabilisierung (aus [14] nach [339] und [340]).....	119
Tab. 9.1:	Korndichten des Zuschlag und der Bindemittel nach DIN 18124:2011 [172].....	138
Tab. 9.2:	Laststufen der Kompressionsversuche .....	139
Tab. 10.1:	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche.....	236
Tab. 11.1:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherversuche. ....	247



## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen / Symbole	Einheit	Bezeichnung
Abb.	-	Abbildung
Abschn.	-	Abschnitt
abs. D.	-	absolute Differenz
Bez.	-	Bezeichnung
BGR	-	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
bez.	-	bezogen
BK	-	Meister Branntkalk körnig 85
BM	-	Bindemittel
B300	-	Schwenk Mischbinder B300
B500	-	Schwenk Mischbinder B500
c	[kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion
C <sub>org</sub>	[M.-%]	organischer Kohlenstoff
C <sub>α</sub>	[-]	Kriechbeiwert
C <sub>c</sub>	[-]	Kompressionsbeiwert
C <sub>s</sub>	[-]	Schwellbeiwert
CEM I	-	Schwenk Portlandzement CEM I 52,5 R
DM	-	Dry-Mixed (Trockenmischverfahren)
E <sub>Oed</sub>	[MN/m <sup>2</sup> ]	Oedometermodul / Steifemodul
E <sub>Oed(innen)</sub>	[MN/m <sup>2</sup> ]	innere Oedometermodul / Steifemodul
E <sub>Oed(außen)</sub>	[MN/m <sup>2</sup> ]	äußere Oedometermodul / Steifemodul
e <sub>ges</sub>	[-]	Porenzahl
FS	-	Feststoff
ges.	-	gesamt
H	[-]	Humositätsgrad
HLBB	-	Hochleistungs-Baustoff-Boden
ink.	-	inkrementell
I <sub>p</sub>	[M.-%]	Plastizitätszahl
lin.	-	linear
log.	-	logarithmisch
LP	-	Liapor 8 Blähton
MW	-	empirischer Mittelwert
n. b.	-	nicht berechnet
n <sub>ges</sub>	[-]	Porenraum
org.	-	organisch
RC-Baustoff	-	Recyclingbaustoff
REM	-	Rasterelektronenmikroskopie
rel.	-	relativ
rel. D.	[%]	relative Differenz
S1	-	Versuchsboden Schluff 1
s <sub>r</sub>	[-]	Sättigungszahl
s <sub>ges</sub>	[mm]	ges. Setzung
s' <sub>ges</sub>	[-]	bez. ges. Setzung
s <sub>ink</sub>	[mm]	ink. Setzung

<b>Abkürzungen / Symbole</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$s'_{ink}$	[-]	bez. ink. Setzung
T1	-	Versuchsboden Torf 1
T2	-	Versuchsboden Torf 1
T3	-	Versuchsboden Torf 1
Tab.	-	Tabelle
TC	-	Total Carbon
TIC	-	Total Inorganic Carbon
TOC	-	Toatal Organic Carbon
u	[kN/m <sup>2</sup> ]	Porenwasserdruck
V	[%]	empirischer Variationskoeffizient
$V_{Ca}$	[M.-%]	Kalkgehalt
$V_{gl}$	[M.-%]	Glühverlust bez. auf die Trockenmasse
WM	-	Wet-Mixed (Nassmischverfahren)
$W_{calc}$	[M.-%]	berechneter Wassergehalt der behandelten Versuchserien auf Grundlage des natürlichen Wassergehaltes
$W_{Acalc}$	[M.-%]	berechneter Wasseranteil der behandelten Versuchserien auf Grundlage des natürlichen Wasseranteils
$W_n$	[M.-%]	natürlicher Wassergehalt bez. auf die Trockenmasse
$W_{An}$	[M.-%]	natürlicher Wasseranteil bez. auf die Feuchtmasse
$W_E$	[M.-%]	Einbauwassergehalt bez. auf die Trockenmasse
$W_{AE}$	[M.-%]	Einbauwasseranteil bez. auf die Feuchtmasse
$W_L$	[M.-%]	Fließgrenze
$W_{Lnat}$	[M.-%]	natürliche Fließgrenze (Lufttrocknung)
$W_{L60}$	[M.-%]	Fließgrenze nach Ofentrocknung bei 60 °C
$W_{L105}$	[M.-%]	Fließgrenze nach Ofentrocknung bei 105 °C
$W_P$	[M.-%]	Ausrollgrenze
w/z-Wert	[-]	Wasser/Zement-Wert
w/BM-Wert	[-]	Wasser/Bindemittel-Wert
Z-Suspension	[-]	Zement-Suspension
Z	[-]	Zersetzungsgrad
$\sigma$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Normalspannung / totale Spannung
$\sigma'$	[kN/m <sup>2</sup> ]	effektive Spannung
$\rho_d$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte
$\rho_f$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Feuchtdichte
$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Korndichte



# 1 Einleitung

Zur sicheren Gründung von Bauwerken, d. h. zur Abtragung der Bauwerkslasten aus allen Disziplinen des Bauingenieurwesens – Konstruktionen des Hochbaus, des Wasserbaus, des Tunnelbaus und Infrastrukturmaßnahmen, aber auch bei der Umnutzung von Bestandsbauwerken – sind detaillierte Kenntnisse des Baugrundes erforderlich. Schäden, die auf eine Missachtung der Bodenkennwerte bzw. nicht ausreichende Baugrunderkundung zurückzuführen waren, zeigten sich in der Vergangenheit zumeist als sehr kostenintensiv in der Sanierung und im Extremfall mit einer Havarie des gesamten Bauwerkes (vgl. A 20 bei Tribsees, Erfder Damm, „Husumer Buckelpiste“).

Bestehen einzelne Bodenschichten oder sogar der gesamte Gründungshorizont aus geotechnisch sehr problematischen nicht tragfähigen Böden – Böden mit organischen Bestandteilen oder organischen Böden (insgesamt sind nach [1] ca. 4 % der Fläche Deutschlands (ca. 13.000 km<sup>2</sup>) als Moorgebiete ausgewiesen und etwa 5 bis 8 % weltweit [2]) – die zumeist schlechte Materialkennwerte in Form von sehr hohen Wassergehalten, geringen Scherfestigkeiten und hohe Kompressibilitäten mit erfahrungsgemäß hohen Streuweiten aufweisen – sind Bodenverbesserungsmaßnahmen in Form von Mixed-in-Place- oder Mixed-in-Plant-Verfahren notwendig und sinnvoll in ihrer Anwendung zur Schonung des Rohstoffes Boden, der sich in menschlichen Zeiträumen nicht erneuert. Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit organischen Böden und Böden mit organischen Bestandteilen, wie z. B. Torf, ist die Böschungsbruchproblematik, die sich besonders in nordwestlichen Teilen Europas darstellt (vgl. [3]).

Bodenverbesserungen mit der Nutzung des anstehenden Baugrundes wirken sich, durch den Entfall von Transportwegen und anschließender Deponierung, damit positiv auf die Klimabilanz aus.

Zudem stellen Verfahren des Bodenaustauschs, die schnell den wirtschaftlichen Rahmen von Bauprojekten übersteigen und in Anbetracht der zunehmenden Entsorgungsproblematik, keine effiziente Lösung dar. Torfsprengungen, wie sie zum Anfang des letzten Jahrhunderts angewendet wurden, um die schlecht bzw. nicht tragfähigen Horizonte zu verdrängen, sind heute aus ökologischer Sichtweise nicht mehr vertretbar und stellen auch wegen der zufallsbedingten Ausführungsqualität keine Lösungen mehr dar.

Bodenverbessernde Maßnahmen mit dem Design eines neuen Baustoffes Boden – wenn möglich als Hochleistungs-Baustoff-Boden (HLBB) – hingegen, die das Verformungsverhalten des Bodens verbessern bzw. dieses prognostizierbar machen, stellen damit Alternativen dar, die in der Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen werden.

Mit dieser Arbeit soll – was bisher mit granularen Böden bei Mixed-in-Place und weiteren Verfahren bereits möglich ist (vgl. [4], [5], [6], [7]) – ein weiter reichender und neuer Ansatz im Sinne eines neuen „Designs“ des Baugrundes vorgestellt werden: Böden mit organischen Bestandteilen anstelle von Austausch und Deponierung des originären Baugrundes, zu stabilisieren bzw. zu verfestigen, um eine Belastung des Stoffkreislaufs zu vermindern oder sogar vollständig zu vermeiden.

Das Ziel muss es sein, alle Böden, auch organische Böden oder Böden mit organischen Anteilen, zu einem „High Performance Soil“, d.h. Hochleistungs-Baustoff-Boden (HLBB), im Sinne einer Grundlagenforschung, zu entwickeln. sogenannten

Diese Arbeit behandelt das kontinuumsmechanische Verhalten von Mehrphasengemischen mit der Konditionierung, der Stabilisierung bzw. Verfestigung von Böden mit organischen Bestandteilen/Beimengungen – im vorliegenden Fall Torf. Diese Bodenart weist aufgrund ihres mit dem steigenden Anteil an organischen Beimengungen, steigenden Wassergehalt bzw. Wasseraufnahmevermögen, bedingt durch die vergleichsweise große spezifische Oberfläche organischer Bestandteile zumeist nur eine sehr geringe Tragfähigkeit auf und zeigt damit ein ausgeprägtes Kompressionsverhalten, welches sich sehr deutlich in Primär- als auch in langwierigen bis endlosen Kriechsetzungen (Sekundärsetzungen) widerspiegelt. Zudem wurden bei Böden mit Anteilen an Organik auch Tertiärsetzungen, die sich mit einer erneuten Konsolidation zeigen, in Labor- und Feldmessungen gemessen (vgl. [8], [9], [10], [11], [12], [13]).

In dieser Arbeit wurden insgesamt drei verschiedene Torfe aus dem regionalen Umland mit verschiedenen Anteilen unterschiedlicher Bindemittel behandelt, um der grundlegenden Erforschung von Ansätzen und Möglichkeiten zur Konditionierung von Böden mit organischen Bestandteilen mit Verfahren des Spezialtiefbaus, wie u. a. dem Mixed-in-Place (MIP)-Verfahren, zu dienen.

## 2 Struktur und Ziele der Arbeit

Nach der Einleitung und diesem Kapitel behandelt das Kapitel 3 die verschiedenen Verfahren der Konditionierung, die in der geotechnischen Terminologie der sogenannten Baugrundverbesserung zugeordnet und angewendet werden können.

In Kapitel 4 werden die verschiedenen Arten von Böden mit organischen Bestandteilen bzw. organischen Böden bzw. deren Entstehung und Unterteilung dargelegt.

Im daran folgenden Abschnitt, Kapitel 5, werden die verschiedenen bestehenden Systeme zur Klassifizierung von Böden mit organischen Bestandteilen bzw. organischen Böden nach dem Anteil der enthaltenen Organik, dem Zersetzungsgrad u. a. behandelt um einen Überblick über die Unterschiede der Einordnungen dieser darzustellen.

Das Kapitel 6 beschäftigt sich mit den ausgewählten Versuchsböden – 3 Torfe und ein Schluff aus dem rheinischen Braunkohlerevier – die hier zwecks Klassifizierung in einem umfassenden Untersuchungsprogramm analysiert wurden.

In Kapitel 7 wird der Stand der Wissenschaft zum Verhalten organischer Böden dargelegt mit verschiedenen bestehende erforschten Korrelationen zu bodenmechanischen Parametern dieser. Der Fokus liegt hier vorwiegend auf Untersuchungen zum organischen Gehalt und dem Kompressionsverhalten von Böden mit organischen Bestandteilen bzw. organischen Böden.

Daran werden in Kapitel 8 die Auswirkungen einer Bodenbehandlung mit den klassischen Bindemitteln auf die verschiedenen bodenmechanischen Parameter dargelegt.

Anschließend werden in Kapitel 9, 10 und 11 die umfangreichen Kompressionsversuche, einaxialen Druckversuche und Rahmenscherversuche an den unbehandelten bzw. mit verschiedenen Mischbindemitteln und Bindemitteln behandelten Versuchsböden dargestellt und evaluiert mit dem Ziel einer Entwicklung eines HLBB aus einem organischen Boden/Boden mit organischen Bestandteilen.

Das letzte Kapitel, Zusammenfassung und Ausblick, fasst die Ergebnisse dieser Ausarbeitung zusammen und zeigt die Möglichkeiten einer Entwicklung eines organischen Bodens/Boden mit organischen Bestandteilen zum HLBB auf. Darüber hinaus werden Empfehlungen weiterer Forschungsansätze dargelegt. Daran folgt der Anhang, in dem weitere Versuchsparameter und -ergebnisse in Form von Tabellen und Graphen dargestellt sind.



### 3 Baugrundverbesserung

#### 3.1 Historie

Die Verfahren der Baugrundverbesserung haben sich seit Beginn des 20. Jahrhunderts nahezu exponentiell weiterentwickelt – von einfachen Methoden in Form von Sprengungen, die nicht belastbare Bodenhorizonte verdrängen und vorrangig in Moorböden angewendet wurden, Bodenaustauschverfahren und Vorbelastungen des anstehenden Bodens, die den Ansatz der Baugrundverbesserungsmethoden stellten, hin zu Methoden die spezielle Maschinenteknik für die hochkomplexe Ausführung von Baumaßnahmen benötigen. Diese lassen sich wiederum in Bodenverbesserungen in Form von Stabilisierungen bzw. Verfestigungen des anstehenden Bodens durch mechanisches und/oder hydraulisches Untermischen von Bindemittel in trockener Form oder als Suspension und Bodenersatzverfahren unterteilen. Einen Überblick über die Entwicklung dieser seit den 1930 er Jahren am Beispiel Japans zeigen Tab. 3.1 und Tab. 3.2.

Tab. 3.1: Entwicklung der Baugrundverbesserungsverfahren in Japan a) (aus [14]).

Improvement principle	Engineering method	Work examples	Period practical application introduced																	
			1930s	1940s	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s									
Replacement	Excavation replacement	Dredging replacement method																		
	Forced replacement	Sand compaction pile method				1966														
Densification	Dewatering/compaction	Compaction by displacement and vibration			1956															
		Gravel compaction pile method				1965														
	Compaction	Vibration compaction	Vibro-flotation method			1955														
		Impact compaction	Dynamic consolidation method					1973												
Consolidation/dewatering	Preloading	Preloading method	1928																	
	Preloading with vertical drains	Sand drain method			1952															
		Packed sand drain method				1967														
		Board drain method				1963														
	Dewatering	Deep well method		1944																
		Well point method			1953															
		Vacuum consolidation method						1971												
Chemical dewatering		Quick lime pile method				1963														

Tab. 3.2: Entwicklung der Baugrundverbesserungsverfahren in Japan b) (aus [14]).

Grouting	Grouting	Chemical grouting method	1961	→
		High pressure injection method	1965	→
Solidification (Admixture stabilization)	In-situ mixing	Shallow mixing method	1972	→
		Deep mixing method	1974	→
	Plant mixing	Pre-mix mixing method	1990	→
		Light weight soil method	1996	→
	Pipe mixing	Pneumatic flow mixing method	1999	→
Thermal stabilization	Heating		-----	→
	Freezing		1962	→
Reinforcement			1972	→

Die Tab. 3.3 zeigt die Anwendungsgrenzen verschiedener Baugrundverbesserungsmaßnahmen in Abhängigkeit zur Bodenart nach [15].

Tab. 3.3: Anwendungsgrenzen der Baugrundverbesserung in Abhängigkeit der Bodenart (nach [15]).

Ton	Schluff	Sand	Kies
Bodenaustausch			
Oberflächenverdichtung			
		Tiefenrüttelverdichtung	
Rüttelstopfverdichtung			
Dynamische Intensivverdichtung			
Verfestigung von oberflächennah anstehenden Böden mit Bindemitteln			
			Zementinjektion
		Chemikalieninjektion	
	Düsenstrahlverfahren		
Bodenvereisung			
Entwässerungsverfahren			
Bewehrungsverfahren			

## 3.2 Stand der Technik

### 3.2.1 Baugrundverbesserung durch Bodenaustausch

Die einfachste Methode der Baugrundverbesserung – wenn nicht tragfähiger Baugrund in Form von stark kompressiblen Tonen oder Böden mit organischen Bestandteilen ansteht – stellt der Bodenaustausch dar (vgl. [16]).

Ein Ausräumen der nicht tragfähigen Schicht/en bis zum anstehenden belastbaren Boden und ein Ersetzen dieser durch verdichtungsfähiges Material ist jedoch, unter dem heutigen Gesichtspunkten von Wirtschaftlichkeit (Kosten der Deponierung, Ersatz mit Baustoffen, die einen hohen Energieaufwand erfordern u. a.) und dem „Carbon footprint“, nicht mehr als zeitgemäß und umweltethisch vertretbar zu betrachten.

Eine weitere Methode stellt der Bodenteilaustausch, die sog. Polstergründung, dar. Infolge des Aufbaus einer (Puffer- bzw.) Tragschicht, die eine höhere Steifigkeit aufweist, als der darunter anstehende weniger tragfähige Baugrund, können Setzungen reduziert bzw. gleichmäßig werden. Das Ergebnis der Setzungsminderung steht hier in Abhängigkeit zur Dicke  $h$  der aufgebauten Tragschicht (vgl. [16]).

### 3.2.2 Statische Methoden

#### 3.2.2.1 Verdichtung bindiger Böden durch Vorbelastung

Die nach [16] einfachste/klassische Art – unter Nutzung der Konsolidationstheorie – einen bindigen Boden zu verdichten, besteht in der Aufbringung einer Oberflächenlast. Dieses Verfahren kann durch s. g. Konsolidationshilfen in Form von Dräns erweitert werden. Ohne diese Konsolidationshilfen muss das durch die Auflast aus den Poren ausgepresste Porenwasser der zu konsolidierenden Schicht einen mit zunehmender Schichtdicke entsprechend länger werdenden vertikalen Dränweg zurücklegen. Zweckmäßig wird bei Aufbringung einer Oberflächenlast zwischen dem Auflastboden, wenn dieser geringere Durchlässigkeiten aufweist, und Geländeoberfläche, eine zusätzliche horizontal und vertikal wirkende Dränschicht (bspw. Sandfilterschicht) eingeschaltet (vgl. [16]).

Die Abb. 3.1 veranschaulicht die Wirkungsweise einer Vorbelastung zur Baugrundverbesserung. Mit dem Auftrag der Vorbelastung  $p_s$  (s. Abb. 3.1 (a)), die größer ist als die spätere Belastungseinwirkung, tritt in der zu konsolidierenden feinkörnigen Schicht ein Abbau des Porenwasserüberdrucks ein. Mit dem Abtrag der Vorbelastung zum Zeitpunkt  $t_s$  (s. Abb. 3.1 (a)), ist der Konsolidierungsgrad  $U$  im mittleren Teil der feinkörnigen Bodenschicht (s. Abb. 3.1 (b)) noch nicht erreicht, womit sich aus diesem Teil bei der späteren geringeren Einwirkung keine Konsolidierungsergebnisse ergeben. Zugleich sind die obere und untere Schicht, die entsprechend nach oben und unten

entwässern konnten, für die späteren Auflasten überkonsolidiert (s. (b), vgl. hierzu auch [17] zur Vorbelastung organischer Böden zur Gründung von Straßendämmen). Im weiteren Verlauf setzt sich dann der Mittelteil, während die obere und untere Lage schwellen, und sich die Anteile aus beiden Verformung in der Gesamtverformung annähernd überlagern. Da im Allgemeinen der Kompressionsbeiwert  $C_c$  größer ist, als der Schwellbeiwert  $C_s$  (vgl. 7.5) ist davon auszugehen, dass die Setzungen unter den späteren Belastungen höher ausfallen als die Hebungen. Nach [18] beschreibt [19] den vorgenannten Effekt unter großer zeitlicher Dauer und folgert, dass es bei großer Schichtmächtigkeit des feinkörnigen Boden empfehlenswert ist, geringere Vorbelastungen über einen längeren Zeitraum einwirken zu lassen, um damit Schwelleffekte zu reduzieren (vgl. [18]).

Anstelle einer Vorbelastung durch Aufbringung einer Schüttung kann die Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden auch mit einer Vakuumbelastung erreicht werden (vgl. Abschn. 3.2.5).

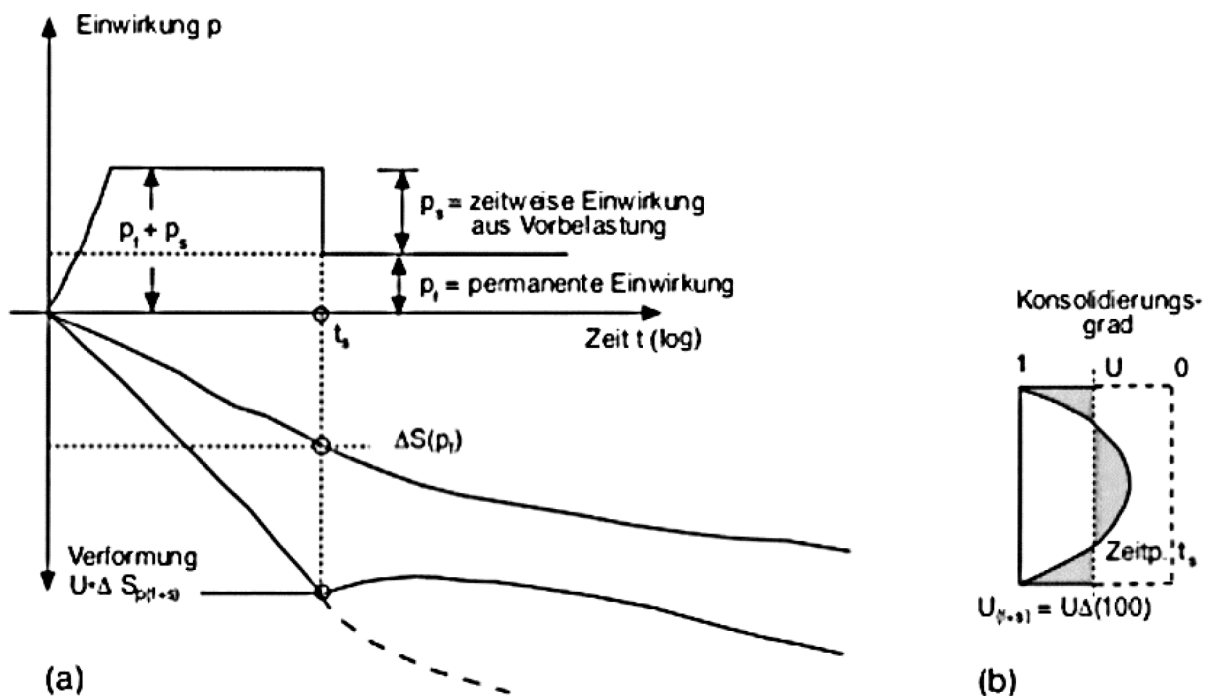


Abb. 3.1: Wirkungweise der Vorbelastung zur Baugrundverbesserung (aus [18]).

Die zulässige Auflast der Vorbelastung steht in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit des anstehenden weichen Bodens. Daher sind die Auflasten so zu bemessen, dass die definierte Bruchlast bei undrained Bedingungen (undrained Scherfestigkeit  $c_u$ ) nicht erreicht wird. Zusätzlich sind die großen Streubreiten der undrained Scherfestigkeit  $c_u$ , und die Zunahme dieser mit fortschreitender Konsolidation, zu berücksichtigen (vgl. [16]).

Die maximale Schütthöhe  $h$  [m] einer Vorbelastung sollte zur Gewährleistung/Sicherstellung der Standsicherheit im Randbereich nach der Literatur mit den folgenden Beziehungen abgeschätzt werden:



$$h = 5,1 \left( \frac{c_u}{\gamma} \right) \quad [\text{m}] \quad [16] \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$h = 3 \text{ bis } 4 \left( \frac{c_u}{\gamma} \right) \quad [\text{m}] \quad [18] \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$h = 4 \left( \frac{c_u}{\gamma} \right) \quad [\text{m}] \quad [20] \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Hierin sind:

h	=	max. Höhe der Vorbelastungsschüttung	[m]
c <sub>u</sub>	=	undrained Scherfestigkeit des anstehenden Bodens	[kN/m <sup>2</sup> ]
γ	=	Wichte der Vorbelastungsschüttung	[kN/m <sup>3</sup> ]

Die Schütthöhe der Vorbelastung sollte zudem mindestens um das 2- bis 3-fache der Höhe der zu konsolidierenden Schichten bzw. der Dauerschüttung über die Randbereiche der späteren Belastungszonen hinaus aufgebaut werden, um auch diesen Bereich zu verbessern/konsolidieren, der noch im Bereich der Lastausbreitung der später aufgebrauchten Last liegt (u. a. zur Verhinderung von Grundbruch am Böschungsfuß und Übernahme von Spreizspannungen).

Die erforderliche Auflast der Vorbelastungsschüttung ergibt sich primär – neben der oberen Grenze zur Einhaltung der Standsicherheit – aus der für die Konsolidation zur Verfügung stehenden Zeit. Damit ist die Grundlage zur Dimensionierung der Vorbelastungsschüttung der zeitliche Konsolidationsverlauf, der durch den Konsolidierungsbeiwert c<sub>v</sub> beschrieben wird. Nach [20] kann der Verlauf der Konsolidierung mit c<sub>v</sub>-Werten aus Kompressionsversuchen hingegen nur ungenau abgeschätzt werden, weshalb diese und Werte, die aus folgender Beziehung:

$$c_v = \frac{k E_s}{\gamma_w} \quad [\text{m}] \quad [20] \quad (\text{Gl. 3.4})$$

aus dem Steifemodul E<sub>s</sub> [kN/m<sup>2</sup>] und der Durchlässigkeit k [m/s] (γ<sub>w</sub> [kN/m<sup>3</sup>] = Wichte des Wassers) abgeleitet werden, nur im Rahmen von Vorplanungen zulässig sind. Hier ist zu berücksichtigen, dass der k-Wert beachtliche Streuungen aufweisen kann. Eine belastbare Prognose ist dahingegen möglich, wenn der c<sub>v</sub>-Wert aus Feldversuchen in Form von Probeschüttungen, vorzugsweise mit zusätzlicher Messung und Aufzeichnung des Porenwasserdruckverlaufs, ermittelt wird [20].

Das Merkblatt 542 [21] – Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) enthält für vorwiegend gering tragfähige Bodenarten folgende Anhaltswerte der Steifemodule E<sub>s</sub> für Setzungsabschätzungen (s. Tab. 3.4):

**Tab. 3.4**  $E_s$ -Werte für Setzungsabschätzungen nach [21].

Bodenart	Steifemodul $E_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Torf	0,3-0,8
Mudde	0,5-1,0
Seekreide	2,0-6,0
Auelehm	2,0-8,0
Klei, sandig	1,0-2,0
Klei	0,7-1,0

Weiter nimmt nach [21] der Steifemodul  $E_s$  bei Belastung in mehreren Stufen infolge Konsolidation um jeweils etwa den Faktor nach (Gl. 3.5) zu.

---


$$1 + \frac{\Delta \sigma'}{\sigma'} [-] \quad \text{FGSV 542:03-2010 [21]} \quad (\text{Gl. 3.5})$$


---

Hierin sind:

- $\Delta \sigma'$  = Spannungserhöhung infolge Schüttung [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\sigma'$  = effektive Spannung vor Aufbringung der Belastungsstufe [kN/m<sup>2</sup>]

### 3.2.2.2 Verdichtung bindiger Böden durch Vorbelastung und Vertikaldräns zur Beschleunigung der Konsolidation

Die durch Vertikaldräns hervorgerufene beschleunigte Konsolidierung resultiert aus dem rotationssymmetrischen Einflussfeld um die Vertikaldräns herum, so dass der zu konsolidierende Boden in der Lage ist, nicht nur in der Schicht nach oben und unten zu entwässern, sondern auch horizontal, womit die Dränwege erheblich reduziert werden und wodurch die Konsolidierungsetzungen (Primärsetzungen) gering durchlässiger Bodenschichten deutlich rascher eintreten. Weiterhin sind die Konsolidierungsetzungen vorwiegend weicher bindiger Bodenschichten mit Vertikaldräns größer, da aufgrund der kürzeren Dränwege der Stagnationsporenwasserdruck geringer ist als mit längeren Entwässerungswegen. Nicht beeinflusst durch Vertikaldräns werden hingegen Sekundärsetzungen (Kriechsetzungen), die im Wesentlichen bei weichen bindigen und organischen Böden auftreten, welche sehr groß sein können, und lange anhalten. Darüber hinaus können durch Vertikaldräns in horizontal geschichteten weichen bindigen Böden die horizontalen Durchlässigkeiten dieser, die häufig um eine Zehnerpotenz größer sind als die vertikalen, erschlossen werden. Dies ist demzufolge auch für geschichtete Böden mit wechselnder Durchlässigkeit gültig – die Dränung der gering durchlässigen Schichten erfolgt hier über die angrenzenden höher durchlässigen Schichten, welche das Wasser den Vertikaldräns zuführen (vgl. [20], [21]).

Weiter regelt die DIN EN 15237:2007-06 [22] die Ausführung von Vertikaldräns mit dem Hinweis, dass es in stark komprimierbaren Böden (z. B. Torf und Gytija) während des Konsolidationsprozesses, durch die relative Kompression zu einem Ausknicken oder Kräuseln eingebauter Vertikaldräns kommen kann, womit die Durchflusskapazität dieser beachtlich gemindert werden kann (s. Abb. 3.2) (vgl. auch [23]). Dieser Vorgang tritt gewöhnlich im oberen Teil des zu konsolidierenden Bodens auf. Die Tab. 3.5 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Dräntypen.

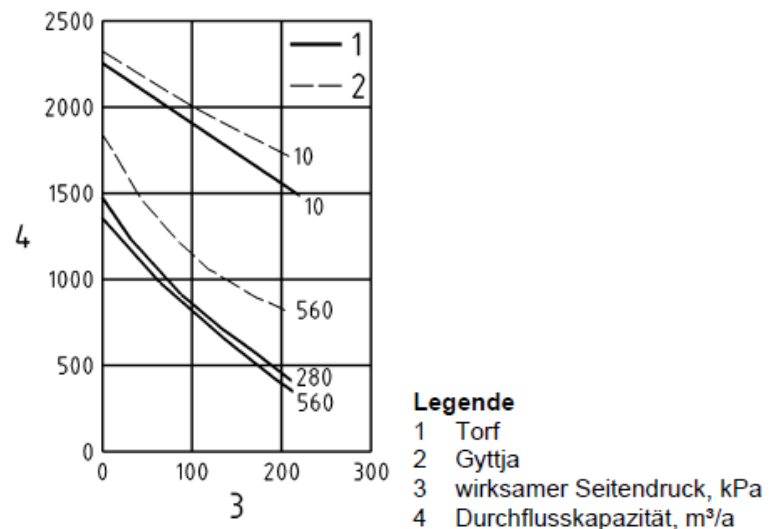


Abb. 3.2: l.: gekräuselter Vertikaldrän, r.: Zusammenhang zwischen Seitendruck und Durchflusskapazität (aus DIN EN 15237:2007 [22]).

Tab. 3.5: Übersicht über Vertikaldrän-Typen und Einbaumethoden (verändert aus [18]).

Dräntyp [Bez.]	Herstellung	Durchmesser [m]	Einbaumethode
Sanddrän	in situ	0,5-0,6	gerammt, gerüttelt mit kompletter Verdrängung des Bodens
	in situ	0,3-0,5	gebohrt mit Hohlbohrschnecke bei geringer Verdrängung, gespült
	vorgefertigt	0,06-0,15	gerammt, gerüttelt bei geringer Verdrängung des Bodens
vorgefertigte Dräns (Kunststoff, Pappe, nicht gewobenes Filtomat)	vorgefertigt	0,05-0,10	gedrückt o. gerüttelt mit Lanze mit Vollverdrängung

Zur Bemessung von Vertikaldräns siehe das Verfahren nach [24] bzw. die Erweiterung der Theorie nach [24] und für den Fall begrenzter Durchflusskapazitäten von Drains nach [25].

Zur Anwendung von Vertikaldräns in weichen Böden s. [26]. Eine neuere Methode stellen die mit Tiefenrüttlern hergestellten geotextilummantelten Kiessäulen dar, die neben einer beschleunigten Konsolidation auch die Tragfähigkeit erhöhen (vgl. [27], [28]).

### 3.2.3 Grundwasserbeeinflussung

Die Grundwasserbeeinflussung, in Form einer gezielten Grundwasserabsenkung, ermöglicht ohne weitere Maßnahmen, eine Verbesserung des Baugrundes, da sich die Gewichts- und Druckverhältnisse sowohl in den entwässerten als auch in den tiefer liegenden Schichten des anstehenden Bodens verändern. In [29] sind die Auswirkungen einer Grundwasserabsenkung auf die effektiven Spannungen im Bodenkörper für verschiedene Bodenschichtungen umfangreich beschrieben (vgl. [16]).

Aus Gründen des Grundwasserschutzes sind diese Methoden jedoch, ob als temporäre oder permanente Beeinflussung des Grundwassers, genehmigungspflichtig und aus heutiger –zunehmend ökologischer – Sichtweise nicht mehr genehmigungsfähig.

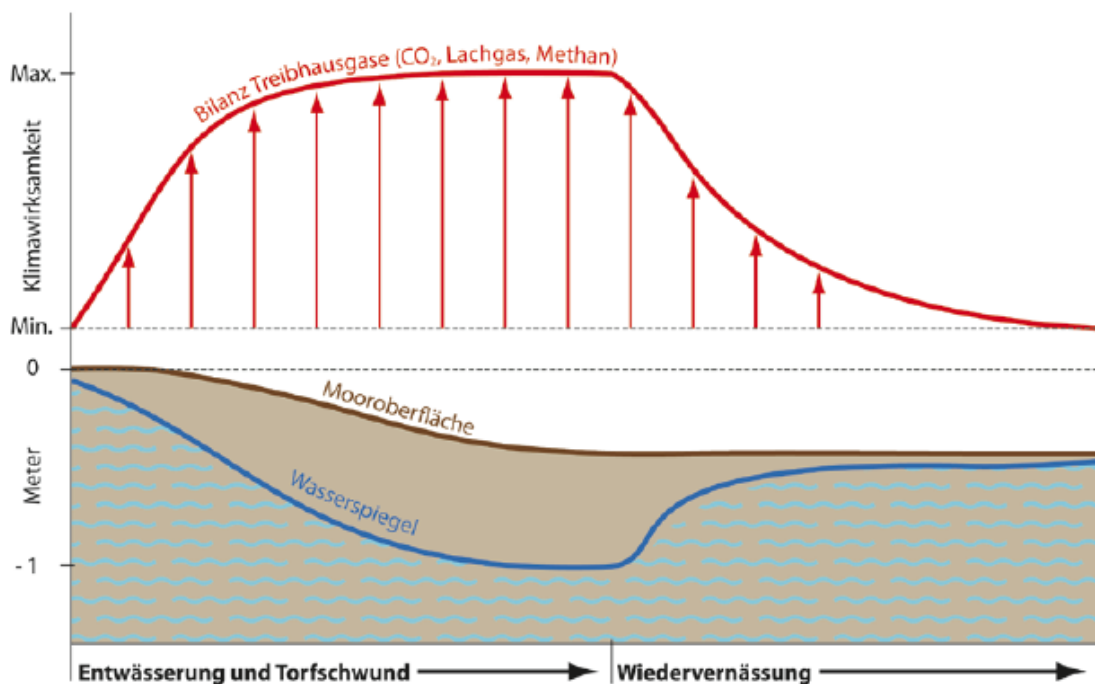


Abb. 3.3: Treibhausgas-Bilanz Moorentwässerung (aus [30]).

Des Weiteren können Grundwasserabsenkungen in Bodenschichten, die organische Anteile enthalten, zu einem Anstieg der Sauerstoffkonzentration führen, und damit zu einer bisher lediglich schwer prognostizierbaren Mineralisierung dieser und in Folge zum Austritt klimaschädlicher Treibhausgase führen (vgl. [31], [32], [33], [34], [35], [36], [30]).

## 3.2.4 Verdichtung

### 3.2.4.1 Bodenverdichtung mittels schwerer Fallgewichte

Die dynamische Bodenverdichtung (auch: Dynamic Intensiv Compaction [37]) , bei welcher schwere Fallgewichte (20 bis 200 t) mit Trägergeräten in große Höhe gehoben (5 bis 30 m) und dann in Rasterabständen von 5 bis 15 m (mehrfach) fallen gelassen werden, dient primär der Verbesserung der Lagerungsdichte von granularen/nichtbindigen Böden. Die immense, beim Aufprall des Gewichtes in den Boden eingetragene kinetische Energie, führt durch die Kornumlagerung zu einer Verdichtung (vgl. [38], [39]). Mit dem Porenwasserüberdruckabbau kommt es zu einer Zunahme der effektiven Spannungen, weshalb dieses Verfahren bei bindigen Böden auch als „dynamische Konsolidation“ bezeichnet wird (vgl. [40], [41]). Die Verdichtungstiefe  $t$  [m] beträgt nach [42]:

---


$$t = (0,1...0,3)\sqrt{G \cdot h} \text{ [m]} \quad [42] \quad (\text{Gl. 3.6})$$


---

Hierin sind:

G = Gewicht Fallgewicht [kN]  
 h = Fallhöhe [m]

Nach EAU [20] sind besonders gut wasserdurchlässige Böden für eine Verdichtung mittels schwerer Fallgewichte geeignet, wobei auch mit hohen Schlägeinwirkungen in wassergesättigten bindigen Böden Verdichtungserfolge erzielt wurden.

Da mit den Stoßimpulsen Risse im Bodenkörper entstehen, konsolidiert der Bodenkörper bei diesem Verfahren vergleichsweise schnell. Ergänzend können auch Vertikaldräns angeordnet werden (vgl. [41]). Die Tiefenwirkung ist auf etwa 10 m beschränkt (vgl. [43]).

Das Verdichtungsverfahren sollte im Vorfeld in situ getestet werden, um die Tiefenwirkung zu erkunden, aber auch um die Erschütterungseinflüsse/Lärmlast auf Nachbarbauwerke oder benachbarte Bauteile zu erfassen. Für die Verdichtung von Böden unter dem freien Wasserspiegel mit schweren Fallgewichten liegen ebenfalls Erfahrungen vor (vgl. [43]).

### 3.2.4.2 Impulsverdichtung

Bei dem Verfahren der Impulsverdichtung wird ein Fallgewicht (5 bis 12 t) mit einer definierten Fallhöhe und Masse mit einer hohen Schlagfrequenz (40-60 Schläge/min) auf eine Stahlplatte (d=1,5 m) fallengelassen und verdichtet damit den anstehenden Boden.

Derzeit sind Verdichtungsenergien von 60 bis 144 kNm mit Verdichtungsleistungen von 2,4 bis 8,6 MNm/min erreichbar (vgl. [44], [45], [46], [47]). Die Abb. 3.4 zeigt das Prinzip der Impulsverdichtung.

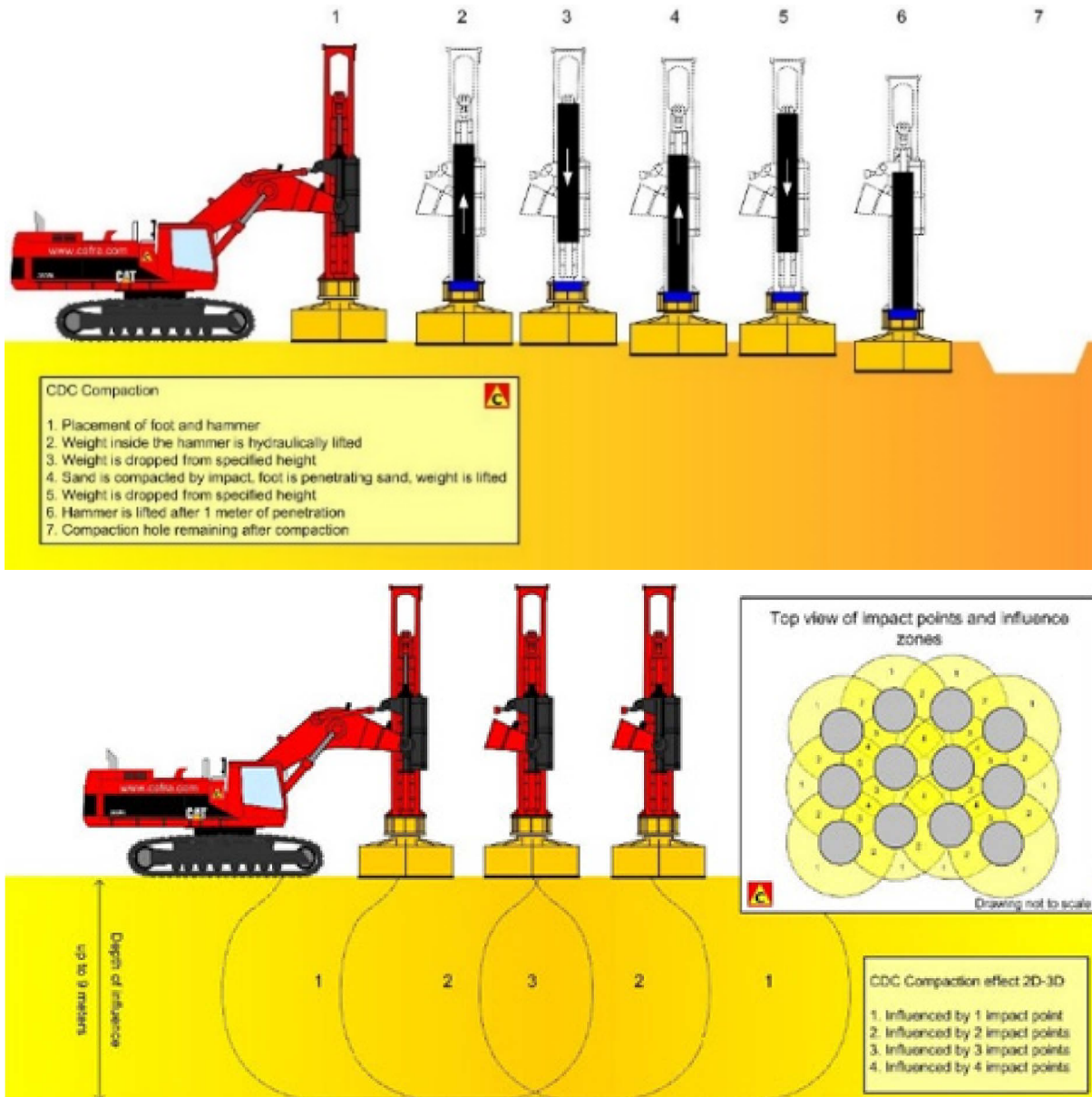


Abb. 3.4: Prinzip der Impulsverdichtung (aus [48]).

### 3.2.5 Vakuumkonsolidierung

Beim Verfahren der Vakuumkonsolidierung wird ein Unterdruck an den im Boden installierten Dränelementen (vgl. Abschn. 3.2.2.2) erzeugt (s. Abb. 3.5), womit sich ohne eine Veränderung der totalen Spannung  $\sigma$  eine Verringerung des Porenwasserdrucks  $u$  und damit eine Erhöhung der effektiven Spannung  $\sigma'$  ergibt.

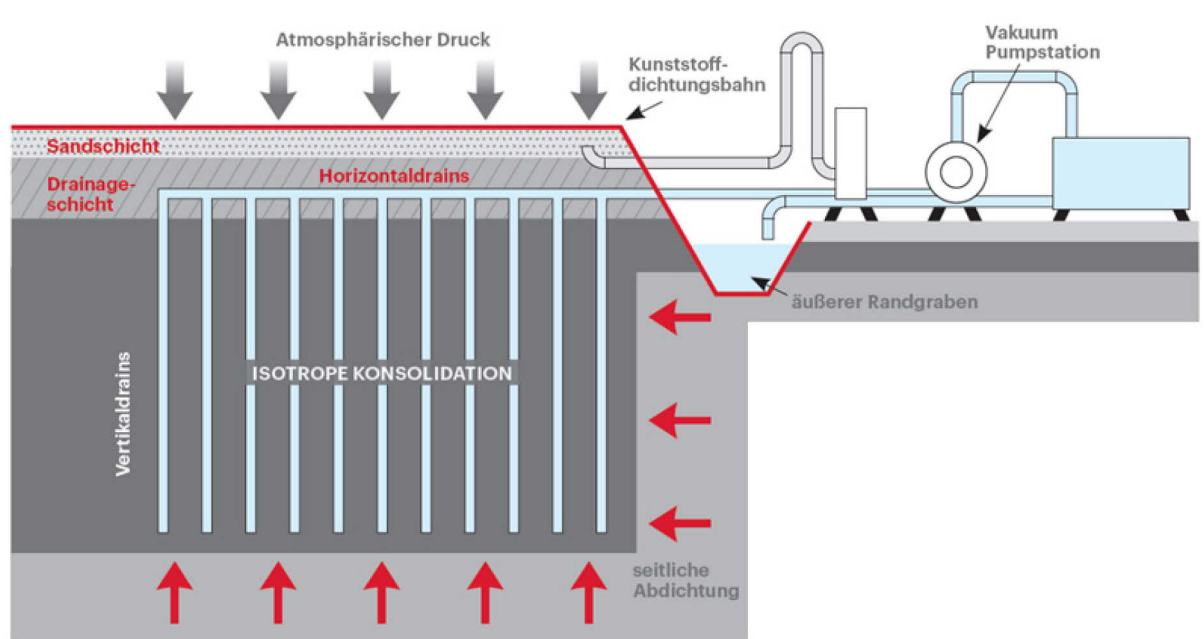
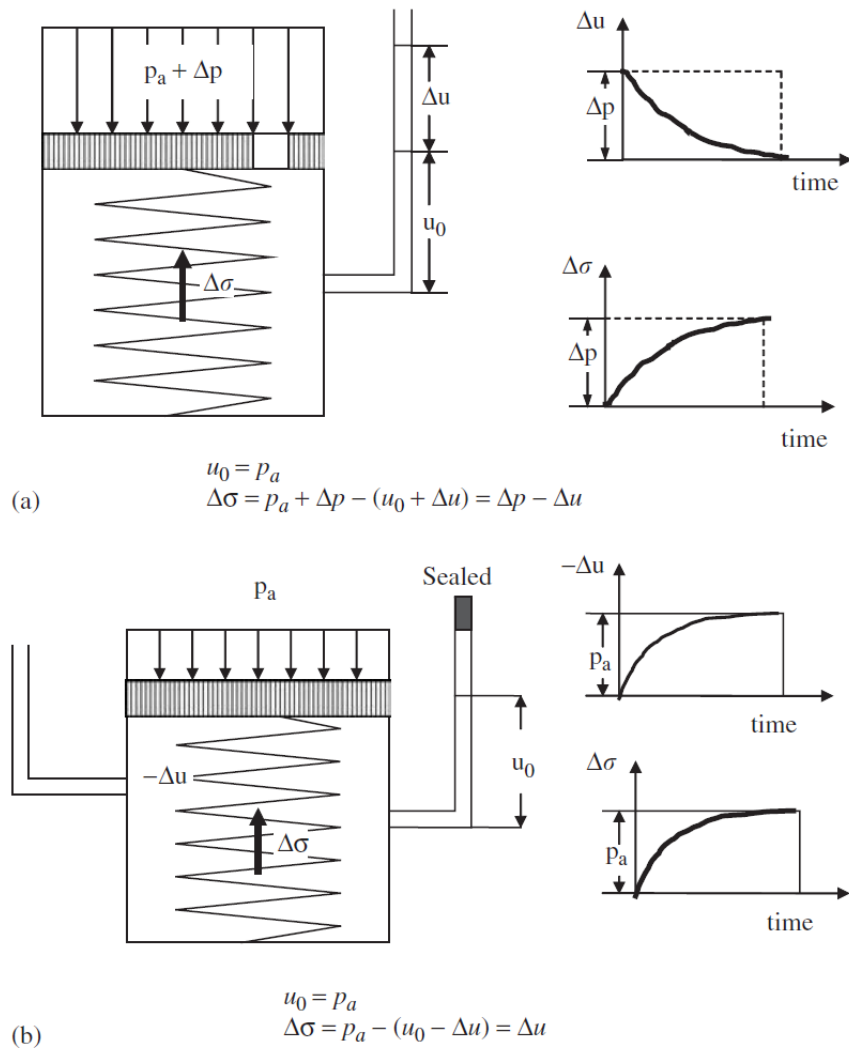


Abb. 3.5: Prinzip der Vakuumkonsolidierung (aus [49]).

Die Abb. 3.6 veranschaulicht und behandelt in zwei Federmodellen den prinzipiellen Prozess der Konsolidation unter Vorlast und mit dem Vakuumverfahren.

Vor der Belastung durch die Vorlastschüttung ist der Porenwasserdruck  $u_0$  gleich dem Luftdruck  $p_a$ . Zum Zeitpunkt der Aufbringung der Vorlast  $\Delta p$  entspricht der Porenwasserüberdruck  $\Delta u$  dieser, und die effektiven Spannungen  $\Delta \sigma$  betragen  $\Delta p - \Delta u$ . Mit der Konsolidation des Bodens erfolgt der Lastübertrag vom Porenwasser auf die Feder bzw. das Korngerüst des Bodens, wodurch der Porenwasserüberdruck  $\Delta u$  abgebaut wird und die effektiven Spannungen  $\Delta \sigma$  zunehmen (vgl. Abb. 3.6 (a)).

Mit dem Aufbringen des Vakuums  $-\Delta u$  reduziert sich der Porenwasserdruck  $\Delta u$  und die effektiven Spannungen  $\Delta \sigma$  nehmen, ohne eine Änderung der totalen Spannungen, zu – die Feder bzw. das Korngerüst wird belastet und damit komprimiert (vgl. Abb. 3.6 (b)).



**Abb. 3.6:** Federmodelle für die Konsolidation unter Vorlast (a) und unter Vakuum (b) (aus [50]).

[51] und [52] zeigen an einem in situ Versuchsfeld aus Torf die Anwendung einer Vakuumkonsolidierung ohne zusätzliche Auflast.

Wenn mehr Auflast benötigt wird, als durch das Vakuum erzeugt werden kann, ist eine Kombination aus Vorbelastung und Vakuumkonsolidierung sinnvoll. Als weiterführende Literatur sind [53], [54], [55] und [56] zu nennen.

### 3.2.6 Bewehrung des Baugrundes

Eine weitere Möglichkeit der Baugrundverbesserung stellen Bewehrungsmaßnahmen in Form von geneigt angeordneten Vernagelungen, die ein monolithisches Verhalten des Bodenkörpers im Bereich der Vernagelung hervorrufen.

Eine stärker verbreitete Anwendung stellen Bewehrungen aus Geokunststoffen oder Geotextilien dar (vgl. [57]). Diese stellen allerdings keine Baugrundverbesserung dar, sondern ein spezielles Element der Bauweisen der Geokunststoffe (vgl. auch [58] für Geokunststoffe in bindemittelverbesserten Böden).



### 3.2.7 Mixed-in-Place – Tiefreichende Bodenstabilisierung

Die in situ Mischverfahren von Bindemittel oder Bindemittelsuspension mit dem geologisch originären Boden der „Tiefreichenden Bodenstabilisierung (Mixed-in-Place)“ sind Bauverfahren, welche sich zur Herstellung von einzelnen Säulen oder Wänden zur Baugrundverbesserung bzw. Baugrubenabdichtung und zum Baugrubenverbau heranziehen lassen.

Die Ausführungen von Tiefreichenden Bodenstabilisierungen (auch: Deep Soil Mixing (DSM) oder Deep Mixing Method (DMM)) sind in der DIN EN 14679:2005 [59], die Bemessungen dieser sind in der DIN 4093:2015 [60] geregelt.

Eine Zusammenstellung der verschiedenen DSM-Methoden und Anwendungsgebiete zeigen Abb. 3.7 und Abb. 3.8.

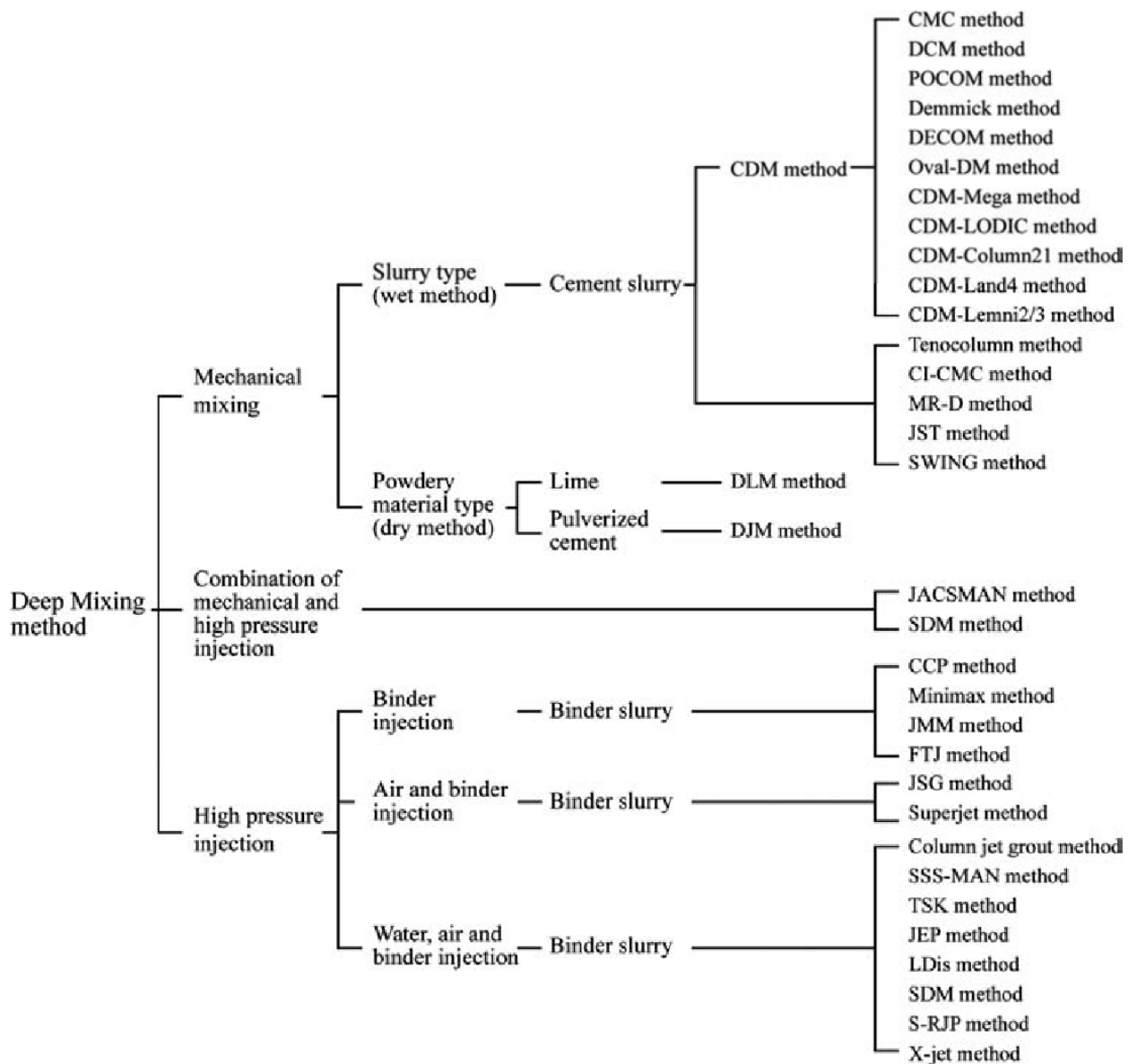
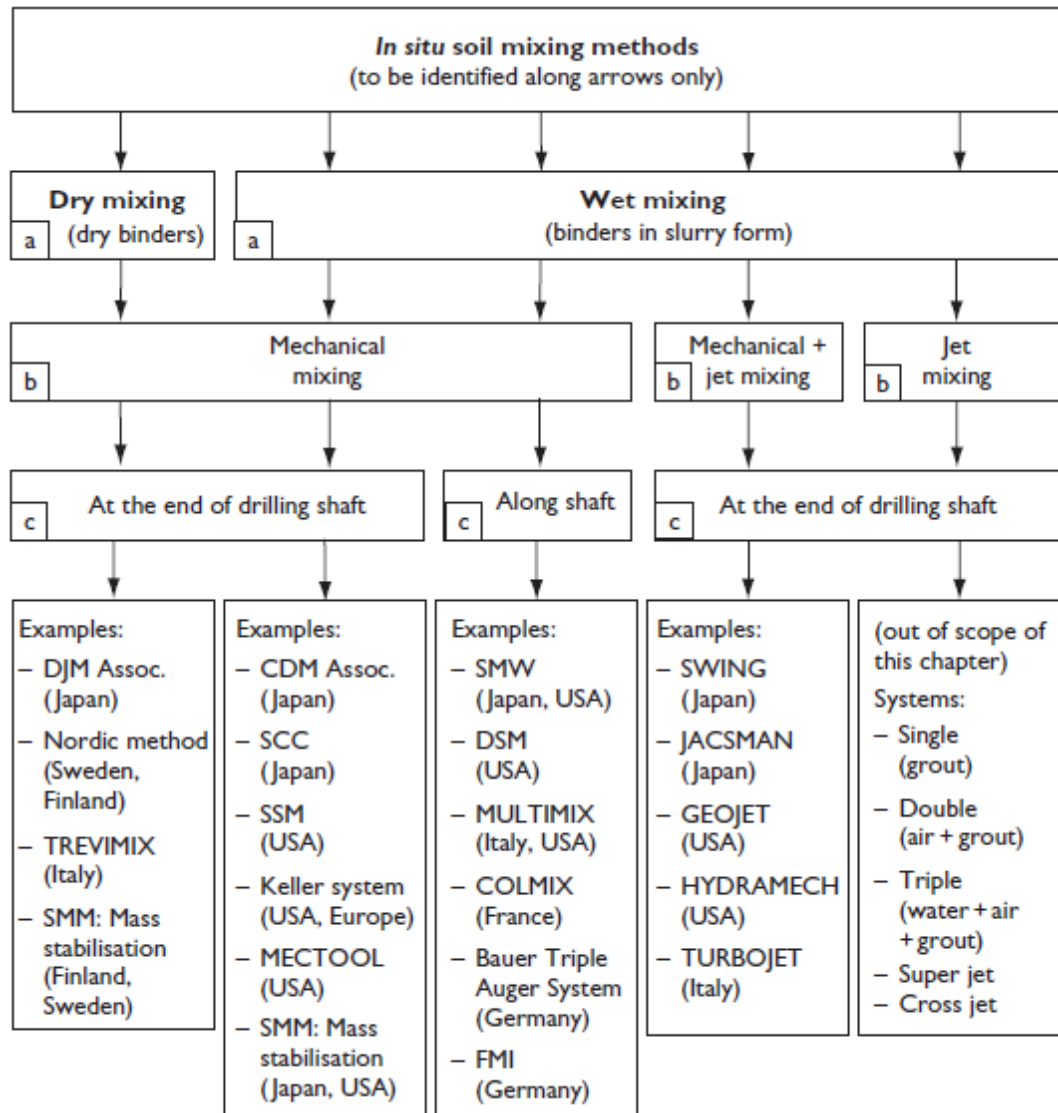


Abb. 3.7: Zusammenstellung der verschiedenen DSM-Methoden (aus [14]).



**Abb. 3.8:** Unterteilung von in situ Bodenstabilisierungen nach der Zugabe des Bindemittels (a), dem Vermischungsprinzip (b) und dem Ort der Vermischung mit verschiedenen länderspezifischen Verfahren (aus [61]).

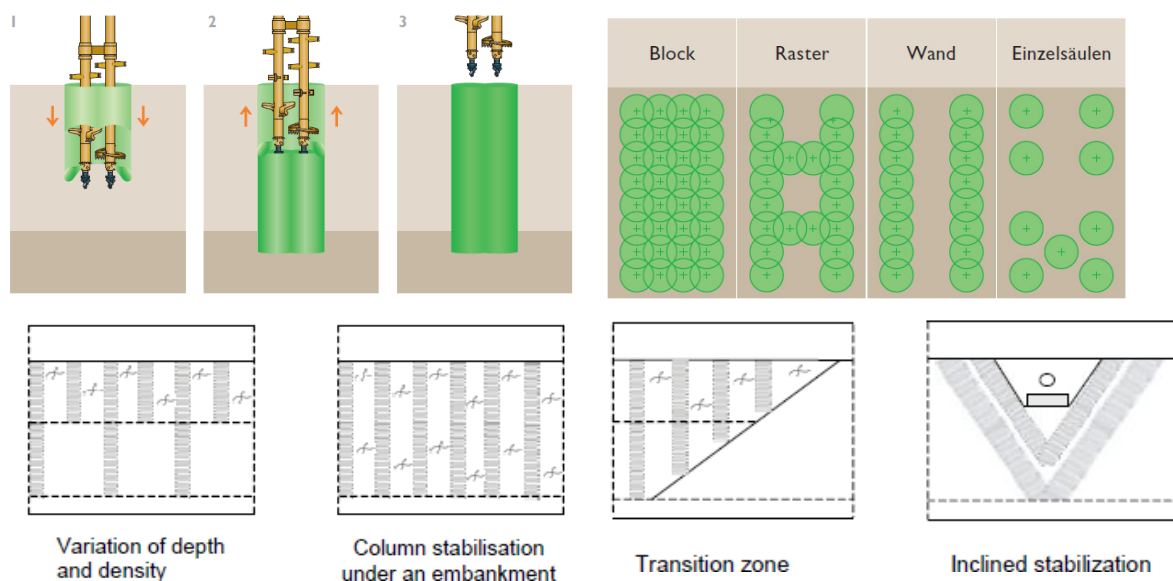
[62] zeigt eine umfangreiche Zusammenfassung der international angewendeten Methoden und gebräuchlichen Werkzeuge. Anwendbar ist die Tiefreichende Bodenstabilisierung auf ein weites Spektrum an Böden – Ton, tonige Sande, sandige Schluffe, organische Tone und Torf (vgl. [63], [64]).

In Verbindung mit im Boden enthaltener Organik führen die gängigen Zugabemengen von Bindemitteln für mineralische Böden zu deutlich geringeren Stabilisierungseffekten. Untersuchungen von [65] und [66] identifizieren den pH-Wert, den Glühverlust, den Wassergehalt und den Feinanteil eines Bodens als erhebliche Einflussfaktoren hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung (vgl. weiter Abschn. 8). [67] zeigen eine Zusammenstellung verschiedener Berechnungsansätze zur Bemessung der Tragfähigkeit von tiefreichenden Bodenstabilisierungen.

### 3.2.7.1 Nass-Misch-Verfahren

Bei der Herstellung im mechanischen Nass-Misch-Verfahren (Wet-Mixed (WM)) wird das Mischwerkzeug, bestehend aus Bohrgestänge, Paddel und Bohrkopf, unter Suspensionszufuhr über Bohrkopf und Paddel, in den Baugrund abgeteuft (s. Abb. 3.9 (o.)). Durch die Auf- und Abwärtsbewegung des Mischwerkzeuges wird die Durchmischung des zu stabilisierenden Bodens mit der Suspension (Homogenisierung) verbessert (vgl. [14]). Die Zusammensetzung und Zugabemenge der Suspension werden an die erforderlichen Parameter des jeweils vorliegenden Bodens angepasst. Zur Erhöhung der Biegesteifigkeit können zusätzlich Bewehrungselemente in die frischen Säulen eingestellt werden. Die Durchmesser der Säulen variieren von ca. 0,40 bis 2,40 m in Abhängigkeit der Anwendung (vgl. [68]) und erreichen Tiefen von bis zu 40 m (vgl. [14]) (vgl. auch SMV-Verfahren Bauer [69]). Die Abb. 3.9 zeigt den Herstellprozess und verschiedene Einbauanordnungen von DSM-Säulen.

Um höhere Genauigkeiten in der Ausführung zu realisieren, besteht weiterhin die Möglichkeit das Nass-Misch-Verfahren verrohrt (Tubular-Soil-Mixing (TSM) s. Abb. 3.10), als eine Kombination aus mechanischem Mischen und hydraulischem Mischen einzusetzen (vgl. JACSMAN (Jet And Churning System MANagement) (vgl. [70])).



**Abb. 3.9:** o. l.: Herstellprozess Nass-Misch-Verfahren, o. r.: Beispiele für Einbauanordnungen von DSM-Säulen (aus [68]), u.: Verschiedene Einbauanordnungen von DSM-Säulen (aus [71]).

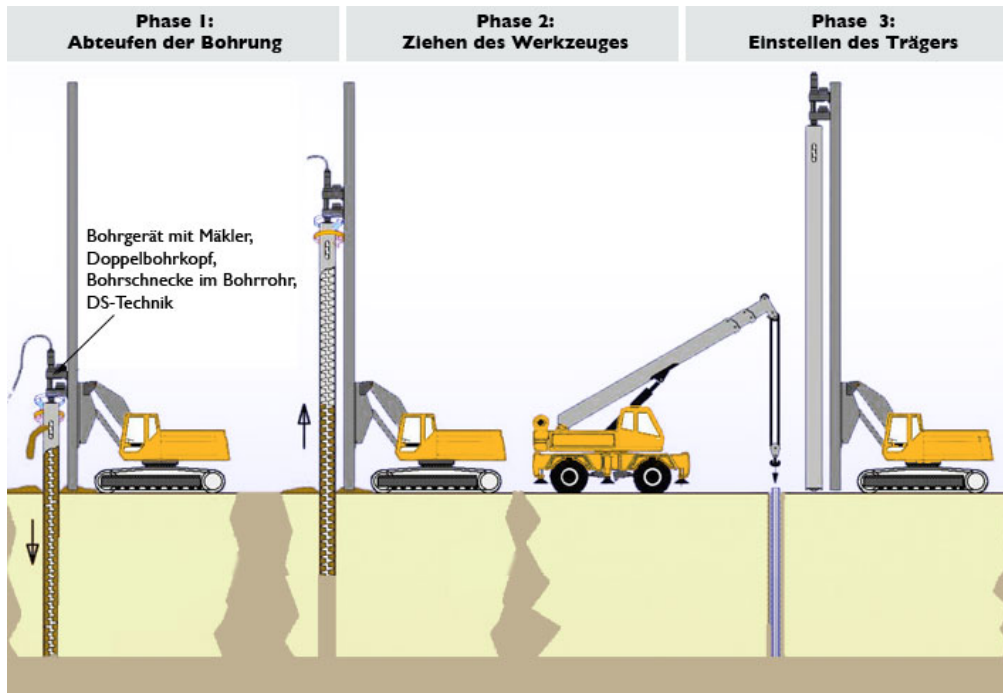


Abb. 3.10: Prinzip Tubular-Soil-Mixing (aus [70])

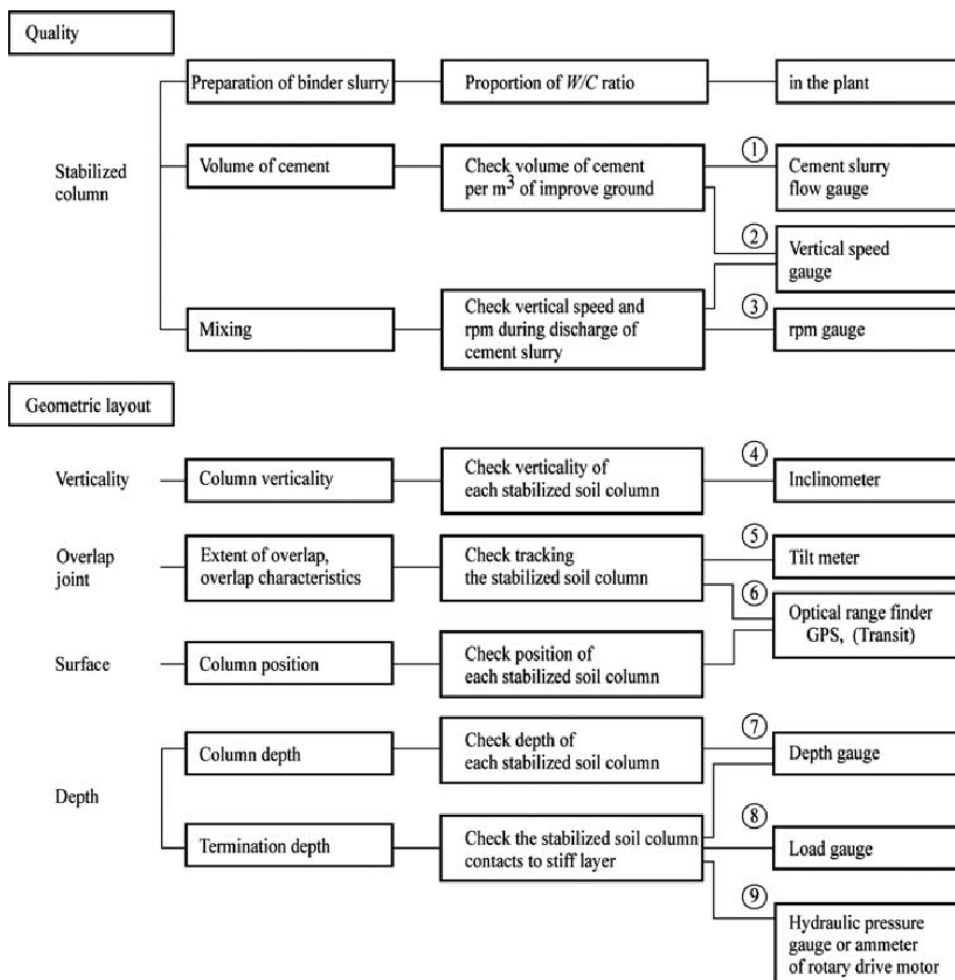


Abb. 3.11: Monitoring Nass-Misch-Verfahren DSM (aus [14] nach [72]).

Zur Qualitätssicherung der DSM werden in den Herstellungsprotokollen jeder Säule Zeit und Datum der Herstellung, Länge der hergestellten Säule, Bohr- und Ziehgeschwindigkeit, Mischgeschwindigkeit, Druck und Durchfluss der eingebrachten Suspension und der gesamte Suspensionsverbrauch dokumentiert. Suspensionsproben für Laborversuche können aus den Säulen entnommen werden und werden grundsätzlich in flüssigem Zustand (Frischmörtelprobe) gewonnen. Zudem können Proben durch Kernbohrungen aus den erhärteten Säulen gewonnen werden, um die Homogenität, Integrität und Steifigkeit der hergestellten Säulen zu überprüfen, wobei die Auswahl der Prüfverfahren in Abhängigkeit zu den Anforderungen an die Bodenstabilisierung steht (vgl. [68]). Die Abb. 3.11 zeigt ein Flussdiagramm zum Monitoring von DSM-Säulen während der Herstellung.

### 3.2.7.2 Trocken-Misch-Verfahren

Das mechanische Trocken-Misch-Verfahren (oder auch: Dry-Mixed (DM), Dry Jet Mixing (DJM)) bzw. Trockenpulver-Einmisch-Technik (TET) erfordert im Gegensatz zum v. g. Verfahren einen entsprechenden Wassergehalt des Bodens bzw. anstehendes Grundwasser, damit das trocken eingedüste hydraulische Bindemittel reagieren kann. Nach [68] besteht der grundlegende Vorteil des Verfahrens „darin, dass eine Stabilisierung von nicht tragfähigen Bodenschichten – auch in organischen Böden und großen Tiefen mit hohen Produktionsraten – kosteneffizient und mit minimalen Rücklaufmengen möglich ist.“ [ [68], S.6].

Zur Herstellung der Säulen wird das Bindemittel während des Ziehvorgangs des Gestänges, das mit gegenüber dem Einbohrvorgang umgekehrter Drehrichtung bewegt wird, eingeblasen (s. Abb. 3.10). Im Allgemeinen werden nach [68] Tone und Schluffe mit Kalk oder Zement-Kalk Mischungen verfestigt, wohingegen für organische Böden Flugasche verwendet wird. Die gebräuchlichen Säulendurchmesser liegen bei 0,60 bis 0,80 m mit Ausführungstiefen von bis zu 25 m [68] bzw. 33 m. [14] Die Abb. 3.11 zeigt die für die Herstellung im Trocken-Misch-Verfahren erforderlichen Komponenten bzw. ein Ablaufschema der Herstellung.

Die Dokumentation der Herstellungsparameter erfolgt vergleichbar dem des Nass-Misch-Verfahrens, wobei die Standardtests hier modifizierte Drucksondierungen bei Säulen mit planmäßig geringen Festigkeitsanforderungen, zudem aber auch Ausziehversuche (Pull Out Resistance Test (PORT)) umfassen (vgl. [68]). Ferner besteht die Möglichkeit der Probenentnahme aus der frischen Säule oder mittels Kernbohrungen.

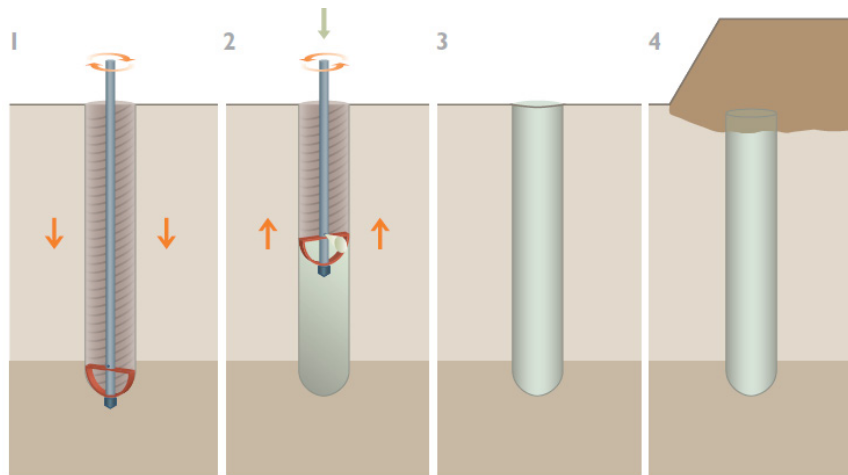


Abb. 3.12: Herstellprozess Trockenmisch-Misch-Verfahren DSM (aus [68]).

### 3.2.8 Oberflächennahe Massenstabilisierung

Die Oberflächennahe Massenstabilisierung mit dem Trocken-Misch-Verfahren stellt eine wirtschaftliche Lösung zur Verbesserung oberflächennah anstehender kontaminierter oder gering tragfähiger Böden mit hohen Wassergehalten, wie „nasse“ ausgebagerte Sedimente, organische Böden oder Abfallschlämme, dar. Bei dieser Verfahrensweise kommen Mischwerkzeuge zum Einsatz, die an den Auslegern von Hydraulikbaggern angeschlossen werden, den anstehenden Boden vertikal oder horizontal durchmischen und gleichzeitig das Bindemittel über eine integrierte Düse zugeben. In Abhängigkeit der Reichweite des Trägergerätes werden Flächen von ca. 8-10 m<sup>2</sup> mit Tiefen von etwa 4,0 m in einer Arbeitsstellung verbessert.

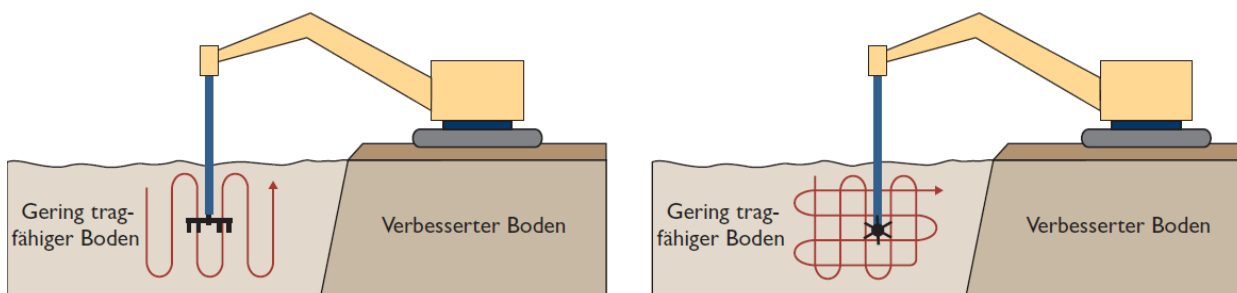


Abb. 3.13: Verfahrensweise Oberflächennahe Massenstabilisierung (aus [68]).

### 3.2.9 Mixed-in-Plant

Beim Mixed-in-Plant-Verfahren oder Zentralmischverfahren erfolgt die Bodenzerkleinerung und anschließende Vermischung mit dem Bindemittel und dem ggfs. erforderlichen Wasser des aufzubereitenden Bodens, im Gegensatz zu den vorgenannten Baumischverfahren (chargenweise oder im Durchlaufmischer) in einer zentralen Anlage. Der behandelte Boden wird daran zum Verwendungsort transportiert und eingebaut (vgl. [73], [74]).

### 3.2.10 Düsenstrahlverfahren

Das sogenannte Düsenstrahlverfahren (DSV) oder auch Hochdruckinjektion (HDI), welches ein rein hydraulisches Verfahren darstellt, ist in drei verschiedenen Ausführungsvarianten zu unterscheiden, wobei nur die 1-Phasen-Variante eine Bodenverbesserung darstellt. Die Ausführung von DSV wird in der DIN EN 12176:12-2001 [75] geregelt, die Bemessung in der DIN 4093:2015-11 [60].

Die Abb. 3.15 zeigt eine Prinzipdarstellung der verschiedenen Düsenstrahlvarianten. Beim 1-Phasen-Verfahren wird zur Herstellung des Düsenstrahlkörpers unter gleichzeitigem Drehen und Ziehen des Gestänges eine Bindemittelsuspension (vorwiegend Zementsuspension) mit Hochdruck (100 bis 600 bar) in den Boden gedüst (s. Abb. 3.14 (l.)). Es fällt kein Rückfluss an – der Baugrund wird verbessert. Der Suspensions-Schneidstrahl (100 bis 600 bar) wird beim 2-Phasen-Verfahren zusätzlich durch einen koaxialen Luftstrahl (5 bis 6 bar) unterstützt (s. Abb. 3.14 (m.)) oder der anstehende Boden wird durch einen Hochdruck-Wasserstrahl (100 bis 600 bar) erodiert und die Zementsuspension wird mit Niederdruck (3 bis 10 bar) eingebracht (nicht illustriert). Bei der Anwendung des 3-Phasen-Verfahrens (s. Abb. 3.14 (r.)) wird der Boden mit einem luftummantelten (5- 6 bar) Hochdruck-Wasserstrahl (100 bis 600 bar) gelöst und der erodierte Raum mit Suspension verfüllt (3 bis 10 bar) (vgl. [14], [76]). Es handelt sich damit bei dem 2- und 3-Phasen-Verfahren nicht um eine Baugrundverbesserung, sondern um ein eigenes Verfahren zur Herstellung von Elementen (Gründungs-/Unterfangungskörper u. a.) des Spezialtiefbaues. Die Abb. 3.15 zeigt eine Auswahl der mit dem Düsenstrahlverfahren herstellbaren Elementformen.

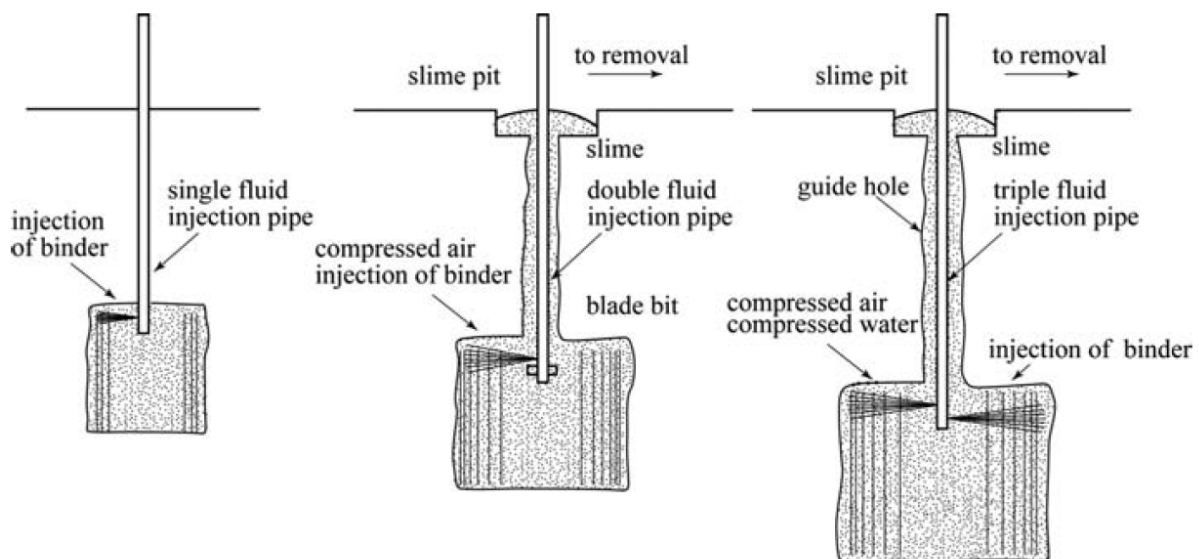
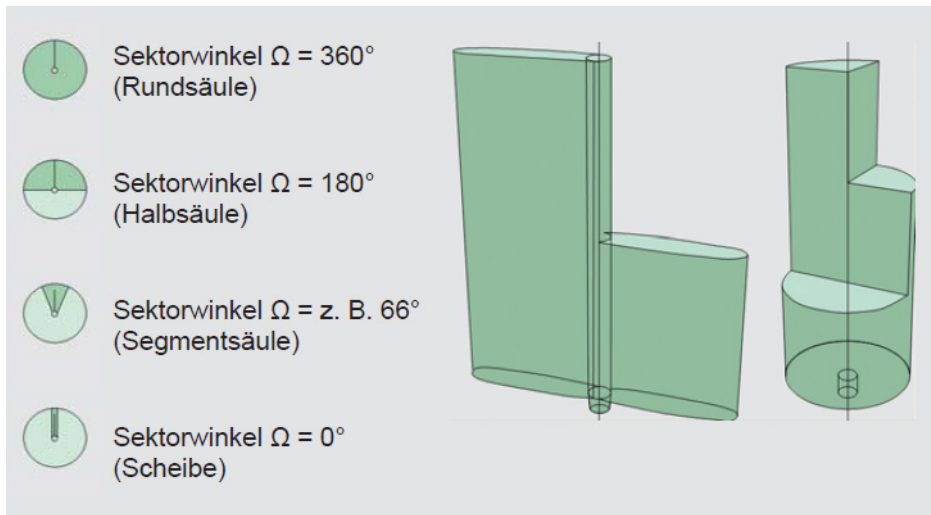


Abb. 3.14: Prinzipdarstellung der Varianten des Düsenstrahlverfahrens (aus [14]).



**Abb. 3.15:** HDI-Elementformen (aus [76]).

Eine einfache Berechnung des Säulendurchmessers auf Grundlage der Boden- und Geräteparameter ist nach [43] nicht möglich. Daher besteht weiterer Forschungsbedarf im Übergangsbereich zwischen Bodenmechanik und Fluidodynamik (vgl. [43]).



## 4 Organische Böden und Böden mit organischen Bestandteilen

Böden können vollkommen aus organischen Substanzen bestehen oder sie treten nur anteilig gegenüber den mineralischen Bodenbestandteilen auf. Ist dies der Fall, stehen Grundbauingenieurinnen und Grundbauingenieure vor der schwierigen Frage, welches Verfahren einzusetzen ist oder überhaupt einsetzbar ist, d. h. welche Phase technisch in das bereits bestehende Mehrphasensystem: Feststoff anorganisch/organisch, Wasser und Luft, erfolgreich eingesetzt werden kann.

Die Entstehung von Böden werden in der Bodenkunde nach [77] nach den vorherrschenden hydrologischen Gegebenheiten – terrestrische, semiterrestrische und subhydrische Bildung – unterschieden. Die Bestandteile von Böden sind Mineralien unterschiedlicher Form und Größe sowie organische Substanz und bilden zusammen das Bodengefüge mit einem charakteristischen Hohlräumensystem, welches wiederum aus Poren verschiedener Ausbildungsstufen besteht. Diese Poren sind mit der Bodenlösung, Wasser und darin gelösten Stoffen sowie Bodenluft, gefüllt.

Innerhalb diesem, in der Basis als Mehrphasen(Drei)-Phasen-System – fest, flüssig und gasförmig – vorliegenden System, bestehen zahlreiche komplexe chemische und physikalischen Wechselwirkungen.

[77] führen weiter aus, dass ca. 80 % der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, welche am aktiven C-Kreislauf teilnehmen in Böden gebunden sind, die restlichen 20 % in der Vegetation. Vorwiegend erfolgt die Rückfuhr des gebundenen Kohlenstoffs in die Atmosphäre über Bodenatmung (mikrobielle Oxidationsprozesse).

Nach [78] haben sich organische Bodensubstanzen in ihrer Zusammensetzung als äußerst komplex erwiesen, da diese aus einer Vielzahl von verschiedenen Stoffen, die von unzersetzten Geweben pflanzlichen und tierischen Ursprungs, hinweg über Zwischenprodukte der Zersetzung, bis hin zu einem amorphen braunen oder schwarzen Substrat reichen, welches die Struktur des Ausgangsmaterial verloren hat und nach [79] von [80] und [81] als Humus (Humus (lat.) = feuchter, fruchtbarer Boden) bezeichnet wurde. Allgemein gilt die Regel: „*je dunkler der Boden ist, um so höher sein Humusgehalt*“ [ [82], S. 349].

Die organische Substanz von Böden setzt sich nach [77] aus abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffen und deren organischen Umwandlungsprodukten zusammen, welche sich in oder auf dem Mineralboden finden und in ihrer stofflichen Zusammensetzung als heterogen zu

beschreiben sind. Auch synthetische organische Stoffe, die anthropogen in den Boden eingebracht werden, wie zum Beispiel Pestizide oder organische Abfälle, werden dazu gezählt. Lebende Organismen aus Bodenflora und -fauna und Wurzelwerk gehören nach [77] allerdings nicht zur organischen Substanz der Böden. Eingeteilt wird die organische Substanz von [77] anhand des Grades ihrer Umwandlung in Streustoffe und Huminstoffe (vgl. auch [83]).

Bei den Streustoffen handelt es sich um Gewebestrukturen, die noch nicht oder nur wenig umgewandelt wurden und morphologisch noch sichtbar sind. Beispiele hierfür sind oberirdisch abgestorbene Pflanzenreste, sowie tote Wurzeln und Bodenorganismen. Diese organischen Bestandteile enthalten größtenteils Lipide, Proteine, Polysaccharide und Lignin und haben nur eine kurze Verweilzeit im Boden. Huminstoffe sind Substanzen, die morphologisch stark umgewandelt sind und keine makroskopisch sichtbaren Gewebestrukturen mehr haben. Ihre Verweilzeit im Boden ist hoch, da sie gegen Mineralisierung stabilisiert sind. Liegen Huminstoffe in organo-mineralischen Verbindungen vor, ist eine Isolierung dieser durch Korngrößen- und Dichtefraktionierung aus dem Boden möglich.

Die Gesamtheit der toten organischen Substanz eines Bodens (Streustoffe und Huminstoffe) wird nach [77] ebenfalls als Humus bezeichnet. Der Prozess des Abbaus organischer Substanzen wird als Zersetzung bezeichnet, die Umwandlung organischer Substanzen in Huminstoffe als Humifizierung und der vollständige mikrobielle Abbau zu anorganischen Stoffen, wie Kohlenstoffdioxid und Wasser, als Mineralisierung. Die Humifizierung beschreibt damit die Umwandlung und Bindung der organischen Substanzen im Boden, wodurch eine Stabilisierung gegenüber einer Mineralisierung entsteht.

[84] beschreibt Humus wie folgt: *„Unter Humus verstehen wir die Gesamtheit jener organischen Stoffe des Bodens, die unter den jeweiligen Produktions- und Zersetzungsbedingungen des biologischen Standortes in charakteristischer Weise weiter zur Anhäufung gelangt sind.“* [ [85], S. 104].

Entsprechend den verschiedenen Einflüssen kann die Zersetzung der rohen pflanzlichen Rückstände sehr langsam fortschreiten, vorwiegend wenn diese sich nicht verkleinern und nicht mit dem mineralischen Teil des anstehenden Bodens vermischen (vgl. [86]).

[79] beschreiben organische Substanz als einen elementaren Baustein im Bodenbildungsprozess vom Verwitterungsprodukt über den Rohboden hin zum Boden, die in mineralischen Böden zu 85 % aus toter organischer Substanz (Humus), 10 % Pflanzenwurzeln und 5 % Edaphon (Boden(-mikro-)organismen) besteht. Weiterhin führen [79] aus, dass der Anteil an Humus im Boden diesem seine charakteristische dunkle Färbung verleiht *„und alle seine physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften in weitaus stärkeren Maße beeinflussen als gleiche Mengen Tonminerale.“* [ [79], S. 121].

Unter anaeroben Bedingungen, also völligem Luftabschluss durch Wasserüberschuß, kommt es zur Einstellung pflanzlicher Verwesung, worauf eine Vertorfung bzw. Konservierung der pflanzlichen Ausgangssubstanz folgt und damit eine Anreicherung von organischer Substanz anschließt. Ebenso kann die mikrobielle Aktivität in Böden aber auch durch Feuchtemangel und Luftüberschuss gehemmt werden (vgl. [79], [87]). Weiterhin zeigt organische Substanz ihr Optimum für biochemische und chemische Oxidationen im neutralen bis alkalischen Bereich (vgl. [79]).

## 4.1 Organische Ablagerungen

In Küstenregionen stellen Schlicksand, Klei und Darg Ablagerungen dar, die organische Anteile enthalten können, teilweise auch aus Torf bestehen oder Wechsellagerungen mit diesem bilden. Klei ist ähnlich der Mudde ein Oberbegriff für feinkörnige Sedimente, die sich bei Sturmfluten im Schwemmland, bei geringen Wasserbewegungen im Brackwasser von Flussdeltagebieten oder in geschützten Buchtbereichen abgelagert haben, aus schluffigen und tonigen Kornanteilen zusammengesetzt sind und auch pflanzliche wie tierische Reste enthalten können.

Darg bezeichnet Bildungen aus Torf an der mit Röhricht bewachsenen lagunären und brackigen Verlandungszone, die mit Schluff und Ton durchsetzt sind. Schlicksand besteht in seiner Zusammensetzung aus über 50 % feinkörnigen mineralischen Sinkstoffen (Schlick) und organischen Anteilen und hat sich in den inneren, schwach bewegten Bereichen eines Wattenmeeres gebildet (vgl. [88]).

### 4.1.1 Mudden

Mudden (schwedisch: Gyttja und Dy (vgl. [89], [90]) lagern sich nach [91] subhydrisch am Grund von Stillgewässern ab (Unterwasserböden) und werden aus sedimentären, von oben nach unten herabrieselnden, Seesedimenten gebildet. Die DIN 14688-1:2018 [92] beschreibt Gyttja als „*Sediment, das sich in nährstoffreichem Wasser absetzt und hauptsächlich aus mehr oder weniger stark zersetzten Überresten von Pflanzen und Tieren (Detritus) besteht.*“ [ [92], S. 16]. Dy hingegen wird als Sediment definiert, „*das sich in nährstoffarmem Wasser absetzt und hauptsächlich aus abgeschiedenen, kolloidalen Huminstoffen (Braunschlamm) besteht.*“ [ [92], S. 16]. Im Gegensatz zu Torfen besteht der organische Anteil hier aus sehr feinem pflanzlichen und tierischen Plankton, Exkrementen, Algen sowie Wasser- und Uferpflanzen. Es besteht nach [88] ein breites Spektrum an Mudden-Arten. Diese unterscheiden sich nach Art und Anteilen der mineralischen, mineralisch-organogenen und organischen Bestandteilen.

Nach [93] werden Mudden unterteilt in organo-mineralische Mudden mit 5 bis <30 M.-% org. Substanz (Sandmudde, Schluffmudde, Tonmudde, Diatomeenmudde und Kalkmudden) und organische Mudden mit  $\geq 30$  M.-% org. Substanz (vgl. [94]).

Mudden organischer Natur mit blau-schwarzer bis schwarzer Färbung, welche den Fäulnisgeruch von Schwefelwasserstoff aufweisen, heißen auch Faulschlamm (Sapropel), der in eutrophen, aber sauerstoffarmen Gewässern entsteht. Ferner können organische Mudden auch eine gallertartige Konsistenz aufzeigen, ohne erkennbaren Detritus mit einer Farbgebung von grün über gelb bis rotbraun, die dann als Lebermudden bezeichnet werden (vgl. [88], [93] [95], [96]).

#### 4.1.2 Torfe

Da die Verfügbarkeit von Sauerstoff für die meisten zersetzenden Organismen notwendig ist, bestehen nach [97] an wassergesättigten Standorten nur stark eingeschränkte Abbautätigkeiten bzw. gehemmte Aktivitäten, womit der Eintrag von organischer Substanz die Abbaurate übersteigt und eine Anreicherung von unvollständig zersetzter Organik, die für die Moore kennzeichnenden Torf bilden (vgl. [91]).

Nach [91] ist Torf ein an wassergesättigten Standorten von unten nach oben aufwachsendes (sedentäres) Substrat mit einem Trockenmassenanteil organischer Substanz von > 30 % (vgl. DIN 4047-4:1998 [98] und [93]), aus vorwiegend abgestorbenen bzw. nicht vollständig zersetzten Pflanzenteilen und deren Umwandlungsprodukten.

Stehen an der Oberfläche mehr als 0,3 m Torf an, erfolgt die Benennung Moor nach (DIN 4047-4:1998-02 [98]). Im Gegensatz zu Mudden besteht beim Torf ein Zusammenhalt durch Pflanzenfasern bzw. primäres Wurzelwerk (vgl. [88]).

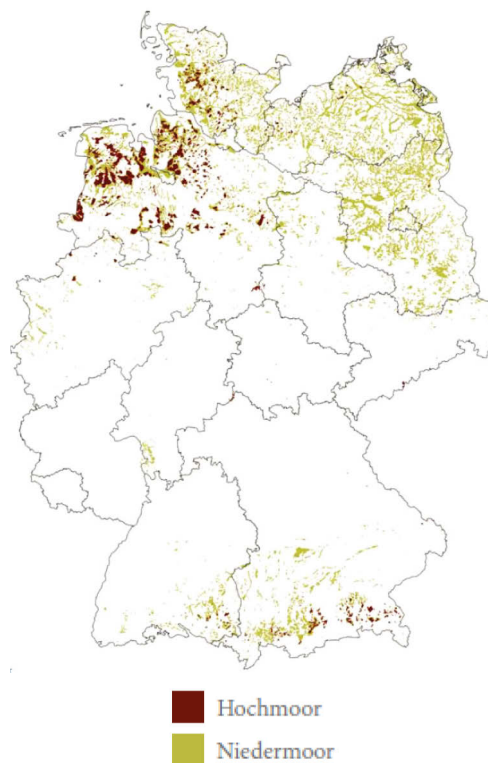
Als Entstehungsorte von Torf sind Hoch- und Niedermoore zu unterscheiden, die wiederum nach den prägenden hydrogenetischen Prozessen charakterisiert werden. Hochmoore (auch: ombrogenes Moor, Torfmoor, Heidemoor, Moosmoor, Fehn oder Filz) liegen über dem Grundwasserspiegel, entstehen an Standorten an denen Stauwasser ansteht, da die jährliche Niederschlagsmenge die Abfluss- bzw. Verdunstungsrate übersteigt (semiterrestrisch), und sind als oligotroph, sauer und artenarm zu beschreiben. Aufgrund der Wasserversorgung, die ausschließlich auf Niederschlag beruht, werden diese auch als Regenwassermoor bezeichnet (vgl. [99], [100], [101], [102]).

Niedermoore (auch: topogenes Moor, Niederungsmoor, Flachmoor oder Riedmoor) hingegen sind an nährstoffreiches Grundwasser oder offene Gewässer gebunden und können sich an oder aus Seen oder verlandeten Flussarmen bilden (subhydrisch). Weiterhin können diese auf Mudden aufliegen oder im Wechsel mit diesen entstehen. Niedermoore haben ein basen- bis kalkreiches Milieu und sind artenreich (vgl. [88], [91], [102]). Zu Beginn der Entstehung sind Niedermoore baumlos. Wird die Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) heimisch, gehen diese in Erlenbruchwälder über (vgl. [82]). Die Abb. 4.1 zeigt die Verbreitung von Hoch- und Niedermooren in Deutschland.

Sind Torfschichten mit Mächtigkeiten < 0,4 m in andere Schichtungen eingebettet, werden diese als Anmoore bezeichnet. Die Zwischenstufe bilden Übergangsmoore, die eine Artenkombination

der Nieder- und Hochmoore aufweisen und subhydrische bis semiterrestrische Bedingungen aufzeigen. Hier bestehen die oberen Torfschichten aus Pflanzenresten von basen- und nährstoffärmeren Standorten (vgl. [93], [91]). In ihrem Nährstoffgehalt nehmen Übergangsmoore eine Mittelstellung ein (vgl. [99]). Unterschieden werden Torfe weiter nach der an der Bildung beteiligten Pflanzenarten (vgl. Abschn. 5).

Grubenfeuchter Torf hat bei einem Wassergehalt von 80 bis 95 % im Durchschnitt etwa eine Feuchtdichte von  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , welche aber je nach Wassergehalt, dem Grad der Zersetzung und dem der mineralischen Anteile stark variieren kann (vgl. [99]). Moorböden unterliegen aufgrund ihres hohen Gehaltes an kolloiden Stoffen Volumenveränderungen, da sie bei Wasserverlust schrumpfen und bei anschließender Wasseraufnahme wieder aufquellen (vgl. auch DIN 19368-19:1997 [103] zur Bestimmung der Moorsackung nach Entwässerung). [99] gibt Schrumpfungsmaße nach Trocknung nach [104] mit bis zu  $> 44 \text{ Vol.-%}$  (zersetzter Wollgrad-Heidetorf) an. Beobachtungen zeigten weiter, dass anthropogen nicht beeinflusste Moore nach Starkniederschlägen bis über  $95 \text{ M.-%}$  Wasser (Wassergehalt  $> 1.900 \text{ %}$ ) enthalten können und daher mit einem vollgesogenen Schwamm vergleichbar sind (vgl. auch [82]). Das Porenvolumen ist ebenfalls abhängig von dem Zersetzungsgrad und schwankt nach [99] zwischen etwa 50 bis 85 %, wovon ein Großteil von Wasser eingenommen wird und auf den Luftanteil ein verhältnismäßig geringer Anteil entfällt. Die Durchlässigkeit von Moorböden ist nach [105] und [99] abhängig vom Zersetzungsgrad und der Dichte des anstehenden Bodens.



**Abb. 4.1:** Moorverbreitung in Deutschland auf Basis der Geologischen Übersichtskarte 1:200.000, BGR, 2011 (aus [106] (verändert), aus [107]).

[99] führt weiter aus, dass Hoch- und Niedermoorböden zwar dieser Gesetzmäßigkeit unterliegen, sich aber trotzdem unterscheiden und bestenfalls Gleichmäßigkeiten bei völlig unzersetzten Torfen aufzeigen. Vergleicht man strukturlosen, kolloiden Schwarztorf tieferer Hochmoorlagen mit gewöhnlichem, stärker zersetztem, schwarzerdigen, aber ascheärmeren Torf aus Niedermoorlagen verlaufen diese Unterschiede. Unzersetzter Moostorf (Weißtorf) im grubenfeuchten Zustand ist für Wasser vergleichsweise leicht durchlässig, wohingegen völlig humifizierter Schwarztorf aus tieferen Lagen der Hochmoore mit höheren Dichten fast so undurchlässig ist wie Ton und in trockener Form fast brikkettartig (vgl. [108]) Diese Unterschiede in der Durchlässigkeit wird man nach [109] (nach [99]) in Niedermoorlagentorfen niemals beobachten können, auch wenn diese unterschiedliche Grade der Zersetzung aufzeigen. Ausnahmen stellen hier nur Niedermoorlagen bei denen stärker zersetzte und schwach durchlässige Mudden anstehen.

Nach [88] unterscheiden sich organische Mudden und Torf von mineralischen Ablagerungen durch eine sehr ausgeprägte Kompressibilität und Kriechfähigkeit, die bedingt sind durch den hohen Wassergehalt, der bei Torfen mehrere 100 bis über 1000 % betragen kann. Nicht vorbelasteter und schwach zersetzter Torf ist der kompressibelste aller Böden und kann unter zusätzlicher geringer Auflast in Form einer Auffüllung bezogene Primärsetzungen von 50 % aufweisen, die dann in sehr lange andauernde Kriechsetzungen übergehen. Im Gegensatz dazu ist die Scherfestigkeit von schwach zersetztem Torf bzw. manchen Mudden relativ hoch bedingt durch Pflanzenfasern und Verzahnungen von tierischen Schalen und Skeletten im Bodenkörper. Weiter beschreibt [88], dass ein Kriechen auch aus Grundwasserabsenkungen resultieren kann, da durch die Luftzufuhr ein Abbau der organischen Bestandteile verstärkt wird (vgl. [31], [33], [34], [36]) bzw. auch die Emission von Treibhausgasen durch den Abbau der Organik einsetzt (vgl. [110]).

[82] bezeichnet Torf als schlechten bis ungeeigneten Baugrund, da Torfschichten selbst in größeren Tiefen, aufgrund ihrer hohen Kompressibilität, Bauwerke gefährden können.

[111] hingegen macht bei Gebäuden minderer Bedeutung Ausnahmen, wenn etwa der höchste Grundwasserstand die Torfschicht nicht erreicht und keine weitere Vermoderung stattfinden kann. Ergänzend ist auch immer der Zersetzungsgrad eines Torfes zu bestimmen.

Nach [93] liegt ein Boden aus Torf vor (Abteilung: Moor), wenn der Anteil der organischen Substanz  $\geq 30$  M.-% ausmacht und die Mächtigkeit  $\geq 3$  dm beträgt. Die DIN 4047-4:1998-2 definiert Moorsubstrat als zusammenfassenden Begriff für Torf und organische Mudden. Ein Torf liegt vor, wenn der organische Anteil 30 M.-% der Trockenmasse übersteigt und aus abgestorbenen Pflanzenteilen infolge Vertorfung entstanden ist.

## 4.2 Prozess der Inkohlung

Infolge biologischer, chemischer und physikalischer Prozesse, sind organische Bestandteile einer ständigen Umwandlung unterworfen, die vom Humus über den Torf zur Kohle reichen. Nach [108] ist Braunkohle Torf aus Waldmooren vorwiegend der Tertiärzeit, Steinkohle hingegen ist Torf älterer Zeiten, insbesondere dem Erdaltertum (Paläozoikum). [112] betrachtet Torf als eine Kohle, die sich noch in ihrer Bildung aus Pflanzenorganismen befindet, wohingegen dieser Umwandlungsprozess der Organik bei Braun- und Steinkohle schon abgeschlossen ist. Die Wandlung von Holzsubstanz zu Torf ist mit einer Zunahme des Kohlenstoffgehaltes, einer Abnahme des Sauerstoff- und Feuchteanteils und damit einer Zunahme des Heizwertes verbunden. Dieser Zusammenhang ist auch beim weiteren Übergang von Torf zur Braun- und dann zur Steinkohle zu beobachten (vgl. [113] bzw. Tab. 4.1).

[114] beschreibt die Grenzen zwischen Torf und Braunkohle sowie zwischen Braunkohle und Steinkohle, welche im komplexen Prozess der Inkohlung aus der Organik entstehen als fließend.

Tab. 4.1: Feuchtigkeit, elementare Zusammensetzung während der Inkohlungsstufen (nach [112])

		Feuchtigkeit		Zusammensetzung			Heizwert der organischen Masse [kWh/kg]
		[M.-%]		der org. Masse			
		grubenfeucht	lufttrocken	C	H	N+O+S	
Holzsubstanz		60	15	50,0	6,0	44,0	4.500
Torf		90	20 bis 80	55,0	6,0	39,0	5.000
		85	20 bis 80	60,0	5,5	34,5	5.700
Braunkohle		35	20	67,0	5,1	27,9	6.500
		50	20 bis 30	70,0	5,0	25,0	6.200
		30	20	72,0	5,0	23,0	6.400
		15	-	76,0	5,0	19,0	7.100
		8	-	78,0	5,0	17,0	7.400
Steinkohle	Flammkohle	4,0	-	80,0	5,0	15,0	7.600
	Gaskohle	2,5	-	83,0	5,0	12,0	7.900
	Kokskohle	1,5	-	87,0	5,0	8,0	8.400
	magere Kohle	1,0	-	91,0	4,5	4,5	8.700
	Anthrazit	0,5	-	96,0	2,0	2,0	8.400

**Tab. 4.2: Veränderungen organischen Materials während der Inkohlung (nach [115] (nach [116], Angaben zur Dichte nach [117])).**

Inkohlungsreihe	Inkohlungsstufe	mittlere Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Prozesse/physikochemische Veränderungen
Torfbildung	Torf	1,45	Humifizierung, Gelbildung, Fermentation, Aufkonzentration refraktärer Substanzen, Bildung von Huminstoffen, ansteigende Aromatizität.
Dehydrierung	Braun- bis Steinkohle	1,35	Dehydrierung, Abspaltung von COOH-Gruppen, Ausgasung von CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O, allgemein abnehmendes O/C-Verhältnis.
Bituminisierung - ca. 60 bis 150 °C	Flammkohle	1,30	Bildung und Rückhaltung von Kohlenwasserstoffen, Depolymerisierung, Abnahme der Dichte, Anstieg der Härte, Porenfüllung aus Bitumen (kann beim Verkoken frei werden), spez. Oberfläche: 25–40 m <sup>2</sup> /g.
Entbituminisierung - ca. 200 °C	Anthrazit	1,30	„Cracken“, Ausgasung von Methan, abnehmendes H/C-Verhältnis, Porosität und spezifische Oberfläche nehmen weiter zu.
Graphitbildung - ca. 300 °C	Anthrazit	1,30 bis 1,70	„Koaleszenz“ und Bildung von „graphitähnlichen“ aromatischen Lamellen, Abgabe von Wasserstoff und Stickstoff, weitere Abnahme der H/C-Verhältnisse, Kondensation, Oberflächen erreichen bis zu 300 m <sup>2</sup> /g, Bildung von vor allem schlitzförmigen Mikroporen.

Das Erscheinungsbild der inkohlten Substanz ist zudem sehr stark abhängig von der Ausgangssubstanz. Inkohltes holzreiches Material sieht als Braunkohle aus wie Holz, wohingegen ligninärmere Pflanzenanteile deutlich schneller destruiert und homogenisiert werden. Das sich anschließende Stadium stellt die Metamorphose zu Graphit, welche das Endglied der Wandlung von belebter zu unbelebter Natur ist, dar (vgl. [114]).



## 5 Klassifizierung von Böden mit organischen Bestandteilen und organischen Böden

### 5.1 Benennung, Beschreibung und Klassifizierung nach DIN EN ISO 14688

Die Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden auf Basis ihrer Eigenschaften ist in der europäischen Norm DIN EN ISO 14688 geregelt, welche in zwei Teile unterteilt ist. Der erste Teil, die DIN EN ISO 14688-1:2018 [92], beschreibt die allgemeine Benennung und Beschreibung anhand von sofort durchführbaren Feldversuchen mittels manueller und visueller Techniken, während mit den Verfahren des zweiten Teils, der DIN EN ISO 14688-2:2018 [118], *„Böden in Gruppen mit ähnlicher Zusammensetzung und ähnlichen geotechnischen Eigenschaften klassifiziert werden. Die Klassifizierung basiert auf den Ergebnissen der Feld- und Laborversuche und dient der Feststellung der Eignung der Böden für bautechnische Zwecke. Die ISO 14688-1 behandelt die Verfahren, die zur Benennung und Beschreibung von Böden angewendet werden sollten im Detail. Die Benennung und Beschreibung von Böden geht der Klassifizierung voraus.“* [ [118], S. 5]

Die Benennung und Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92] erfolgt anhand eines Flussdiagramms. Für Böden mit organischen Anteilen bzw. für Böden mit organischem Geruch werden darin folgende weitere Untersuchungen zur näheren Klassifizierung empfohlen (vgl. hierzu auch [119]):

- Beschreibung der Nebenanteile,
- Beschreibung der Plastizität,
- Beschreibung des organischen Anteils,
- Beschreibung der Farbe,
- Beschreibung der Konsistenz.

Die Grundlage für die Benennung des Bodens nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92] ist die Korngröße. Die Tab. 5.1 zeigt die jeweiligen Korngrößenbereiche mit der entsprechenden Benennung und dem Kurzzeichen.

**Tab. 5.1 Korngrößenfraktionen nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92].**

Bodengruppe	Korngrößenfraktion	Symbol	Korngröße [mm]
sehr grobkörniger Boden	großer Block	lBo	> 630
	Block	Bo	> 200 bis 630
	Stein	Co	> 63 bis 200
grobkörniger Boden	Kies	Gr	> 2,0 bis 63
	Grobkies	cGr	> 20 bis 63
	Mittelkies	mGr	> 6,3 bis 20
	Feinkies	fGr	> 2,0 bis 6,3
	Sand	Sa	> 0,063 bis 2,0
	Grobsand	cSa	> 0,63 bis 2,0
Mittelsand	mSa	> 0,2 bis 0,63	
Feinsand	fSa	> 0,063 bis 0,2	
feinkörniger Boden	Schluff	Si	> 0,002 bis 0,063
	Grobschluff	cSi	> 0,02 bis 0,063
	Mittelschluff	mSi	> 0,0063 bis 0,02
	Feinschluff	fSi	> 0,002 bis 0,0063
	Ton	Cl	≤ 0,002

Die weitere Benennung und Beschreibung organischer Böden nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92] erfolgt nach der Einteilung, welche in Tab. 5.2 gezeigt ist.

**Tab. 5.2: Benennung von organischen Böden nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92]**

Benennung	Klasse	Beschreibung
Torf	faserig	faserige Struktur, leicht erkennbare Pflanzenreste, besitzt eine gewisse Festigkeit
	schwach faserig	Gemisch aus Pflanzenfasern und einem amorphen Pflanzenbrei
	nicht faserig (amorph)	keine erkennbare Pflanzenstruktur; breiige Konsistenz
Mutterboden oder Humus		Pflanzenreste, lebende Organismen und deren Ausscheidungen, anorganische Bestandteile
Gyttia		Sediment, das sich in nährstoffreichem Wasser absetzt und hauptsächlich aus mehr oder weniger stark zersetzten Überresten von Pflanzen und Tieren (Detritus) besteht
Dy		Sediment, das sich in nährstoffarmem Wasser absetzt und hauptsächlich aus abgeschiedenen, kolloidalen Huminstoffen (Braunschlamm) besteht
Anmerkung: Gytija kann ein organischer Boden oder ein Nebenbestandteil sein, z. B. in einem „sehr stark organischem Ton“.		

Eine weitere Klassifizierung von Torf erfolgt über den Zersetzungsgrad, welcher mit dem sogenannten Ausquetschversuch nach [92] bestimmt werden kann. Dabei wird ein nasses Torfstück in der Faust gequetscht und dann je nach Rückständen und Abgepresstem nach den Zersetzungsgraden, welche in Tab. 5.3 dargestellt sind, unterschieden.

**Tab. 5.3: Bestimmung des Zersetzungsgrades von feuchtem Torf durch Ausquetschversuch nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92].**

Begriff	Zersetzungsgrad	Quetsch-Rückstände	Abgepresstes
faserig	gering oder nicht zersetzt	deutlich erkennbar	nur Wasser, keine Feststoffe
leicht faserig	mäßig	Gemisch aus Fasern und nicht faseriger Brei	trübes Wasser, < 50 % Feststoffe
nicht faserig	vollkommen	nicht erkennbar	wässriger Brei, > 50 % Feststoffe

In der DIN EN ISO 14688-2:2018 [118] werden Böden (Korngröße  $\leq 2$  mm) zusätzlich anhand ihres organischen Anteils in [M.-%] der Trockenmasse unterteilt. Die Tab. 5.4 zeigt diese Unterteilung in die Kategorien „schwach organisch“, „mittel organisch“ und „stark organisch“ (vgl. hierzu auch Bezeichnungen nach organischen Anteilen (Glühverlust  $V_{gl}$ ) nach [120]). Im Gegensatz zum Vorgängerdokument, der DIN EN ISO 14688-2:2013 [121] sind hier in der letzten Zeile zusätzlich Torf/Gyttja/Dy und Humus ohne Angabe des organischen Anteils aufgeführt. Die DIN EN ISO 14688-2:2018 [118] merkt hier an: *„Wenn Böden mit organischen Bestandteilen nach ihrem organischen Anteil klassifiziert werden, muss zwischen organischen Böden (Torf/Humus/Gyttja/Dy, siehe ISO 14688-1) und mineralischen Böden mit organischem Anteil [...] unterschieden werden. Das für die Bestimmung des Gehalts an organischen Bestandteilen benutzte Verfahren muss dabei angegeben werden.“* [ [118], S. 14]

**Tab. 5.4: Klassifizierung von Böden  $\leq 2$  mm Korngröße mit organischen Anteilen nach DIN EN ISO 14688-2:2018 [118]**

Bezeichnung	organischer Anteil [M.-%] der Trockenmasse
schwach organisch	2 bis 6
mittel organisch	6 bis 20
stark organisch	> 20
Torf/Gyttja/Dy/Humus	-

Die Bestimmung des organischen Anteils erfolgt erfahrungsgemäß über den Glühverlust nach DIN 18128:2002<sup>1</sup> [122]. Hierbei handelt es sich um einen Versuch, welcher ein Maß für die Abschätzung der organischen Bestandteile eines Bodens für bautechnische Zwecke liefert. Der Versuch nach DIN 18128:2002 [122] beruht auf der Annahme, dass organische Substanzen, welche im Boden enthalten sind, verbrannt werden können. Nach einer Anmerkung in der DIN 18128:2002 [122] handelt es sich dabei allerdings nicht nur um eine Oxidation des organischen

<sup>1</sup> Die DIN EN ISO 14688-2:2018 [111] nennt im Gegensatz zur DIN 1054:2010 [126] keine Bestimmungsmethodik für den organischen Anteil, fordert aber die Angabe des verwendeten Verfahrens.

Kohlenstoffs zu Kohlenstoffdioxid, sondern um verschiedene physikalische und chemische Vorgänge. Als Beispiele werden das Freisetzen von Kristallwasser aus den Mineralien, welches beim Glühen auftritt, die Umwandlung von Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) durch die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) und die Oxidation von Eisenverbindungen des Bodens, genannt. Diese Faktoren können das Ergebnis des Versuches verfälschen (vgl. [111]).

Organische Bestandteile in Böden sind nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92] auch anhand ihres kennzeichnenden Geruches zu erkennen. Dabei werden folgende Unterscheidungen gemacht: Grundsätzlich haben organische Böden im feuchten Zustand einen moderigen Geruch, der durch Erhitzen besonders kenntlich gemacht werden kann. Ein Geruch von Schwefelwasserstoff, der durch das Hinzufügen von Salzsäure verstärkt werden kann, zeigt verwesende faulige Bestandteile im Boden. Bei Böden, die nach dem Anfeuchten einen erdigen Geruch haben, handelt es sich um trockene anorganische Tone.<sup>2</sup>

Weiter enthält die DIN EN ISO 14688-2:2018 [118] Begriffe für die Beschreibung des organischen Anteils nach (Beispielen) einer typischen Farbgebung (s. Tab. 5.5).

**Tab. 5.5: Begriffe für die Beschreibung des organischen Anteils nach DIN EN ISO 14688-2:2018 [118]**

<b>Begriff</b>	<b>Beispiele einer typischen Farbgebung</b>
leicht organisch	grau
organisch	dunkelgrau
stark organisch	schwarz

Nach den zurückgezogenen Vorgängerdokumenten der DIN EN ISO 14688-1:2018 [92], der 4022-1:1987 [123] bzw. 1969 [124] erfolgte die Unterteilung rolliger bzw. bindiger Böden ebenfalls mit zusätzlicher Farbangabe (s. Tab. 5.6) wobei hier zusätzlich Spannen der Humusgehalte genannt wurden (vgl. [125]).

<sup>2</sup> Die olfaktometrische Bodenansprache wurde im Vorgängerdokument, der DIN EN ISO 14688-1:2013 [126] als „Riechversuch“ aufgeführt.

**Tab. 5.6: Humusgehalte von Böden nach Färbung (o.: nach DIN 4022-1:1987 [123], u.: nach DIN 4022-1:1969 [124]).**

Benennung	Sand und Kies		Ton und Schluff	
	Humusgehalt [M.-%]	Farbe [-]	Humusgehalt [M.-%]	Farbe [-]
schwach humos	1-3	grau	2-5	Mineralfarbe
humos	>3-5	dunkel-grau	>5-10	dunkelgrau
stark humos	>5-10	schwarz	>10	schwarz
Benennung	sandige Böden		tonige Böden	
	Humusgehalt [M.-%]	Farbe [-]	Humusgehalt [M.-%]	Farbe [-]
humusarm	≤ 1	deutlich grau	≤ 2	Mineralfarbe
schwach humos	>1-2	tief grau	>2-5	
humos	>2-5		schwarz	>5-10
stark humos	>5-10	>10-15		schwarz
sehr stark humos	>10-15	>15-20		

Die Bodenkundliche Kartieranleitung [93] führt dazu aus, dass die Beurteilung des Humusgehaltes in erster Linie nach dem optischen Eindruck erfolgt und von den folgenden Merkmalen abhängig ist:

- von der Korngröße des Bodens (bspw. wird Sand von dem gleichen Humusgehalt stärker gefärbt als Ton),
- vom Verteilungs- bzw. Humifizierungsgrad des Humus und
- von der originären Farbe des mineralischen Anteils des Bodens.

Daher stellt sich eine sichere Beurteilung des Humusgehaltes oft als schwierig dar. Eine dunkle Farbgebung des Bodens lässt nach [93] nicht unbedingt auf Humus schließen, sondern kann auch durch Metallsulfide, Aschen oder Schlämme verursacht sein. Weiter stellt die [93] eine Tabelle zur Ansprache der Bodenfarbe mit Munsell-Farbtafeln und damit zur Einschätzung des Humusgehaltes ähnlich der DIN 4022-1 (vgl. [123], [124], [79]).

## 5.2 Klassifizierung nach DIN EN ISO 18196

Auf den Grundlagen der DIN EN ISO 14688-2 beruhend erfolgt die Bodenklassifizierung für den Erd- und Grundbau nach der DIN EN ISO 18196:2011 [126]. Die Einteilung der Bodenarten erfolgt dabei in Gruppen mit annähernd gleichem stofflichen Aufbau und ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften. Die Klassifizierung feinkörniger Böden erfolgt anhand der plastischen Eigenschaf-

ten (vgl. [127]) mithilfe des Plastizitätsdiagramms (s. Abb. 5.1), auf Grundlage des Wassergehaltes an der Fließgrenze  $w_L$  [%], dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze  $w_P$  [%] und der sich daraus ergebenden Plastizitätszahl  $I_P$  [%] nach DIN 18122-1:1997 [128].

$$I_P = W_L - W_P \text{ [%]}$$

(Gl. 5.1)

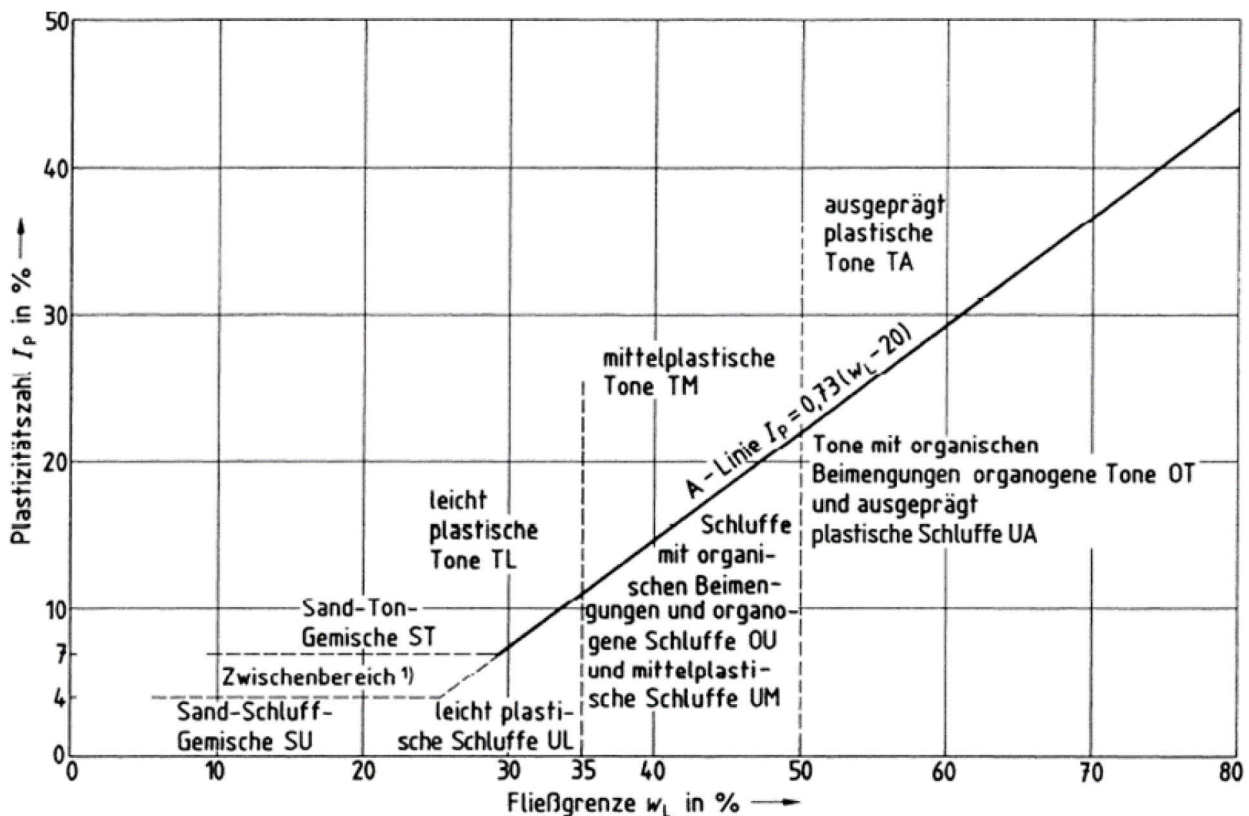


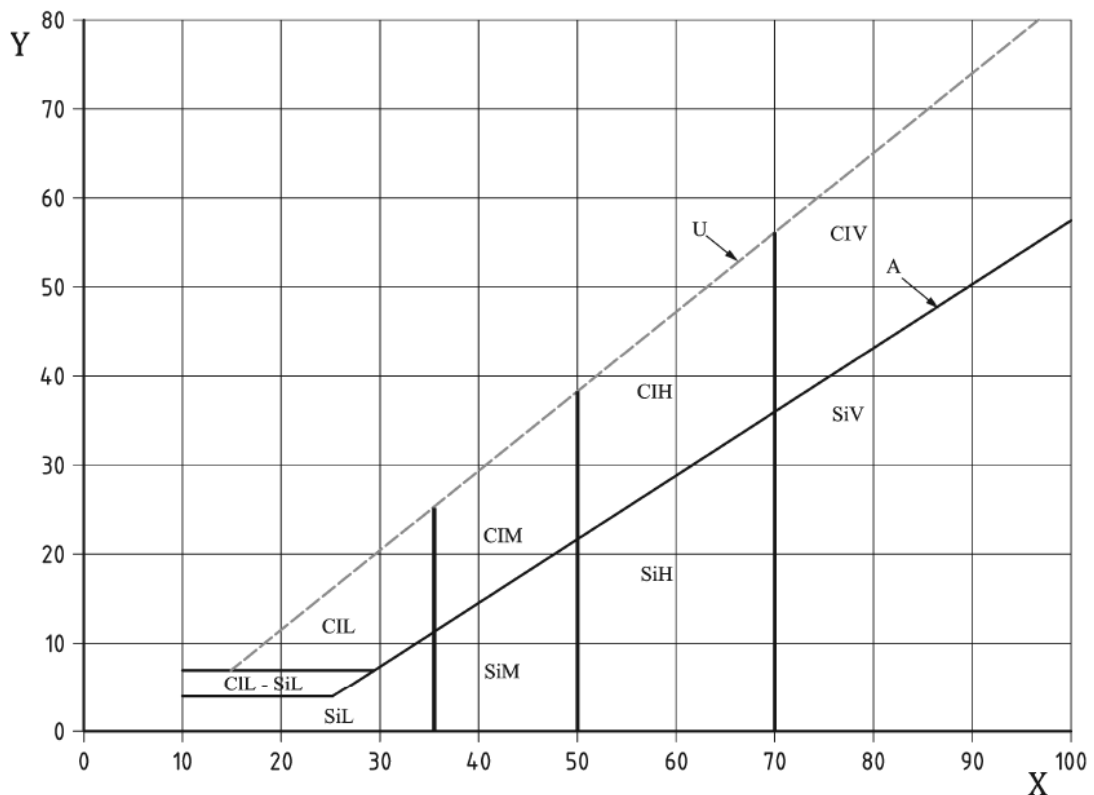
Abb. 5.1: Plastizitätsdiagramm (aus DIN 18196:2011-5 [126]).

Schluffe mit org. Beimengungen und organogene<sup>3</sup> Schluffe (Kurzzeichen: OU) und mittelplastische Schluffe (UM) sowie Tone mit org. Beimengungen, organogene Tone (OT) und ausgeprägt plastische Schluffe (UA) befinden sich im Plastizitätsdiagramm unter der A-Linie.

Weiter enthält auch die DIN EN ISO 14688-2:2018 [118] ein Plastizitätsdiagramm für die Klassifizierung von feinkörnigen Böden nach der Plastizität mit zusätzlicher empirisch bestimmter U-Linie, welche die ungefähre obere Grenze für natürliche Böden markiert (s. Abb. 5.2). Weiter führt die DIN EN ISO 14688-2:2018 [ [118] S. 13] aus: „Der Gehalt an organischen Bestandteilen in Böden kann die Ergebnisse der ermittelten Zustandsgrenzen stärker in Bezug auf die Fließgrenze

<sup>3</sup> unter Mitwirkung von Organismen gebildete Böden

als auf die Plastizitätszahl beeinflussen. Deshalb ergeben sich“ (...) „mit zunehmendem organischem Anteil Böden, die mehr auf der rechten Seite des Diagramms liegen.“(vgl. Abschn. 7.2.4).



#### Legende

X Wassergehalt an der Fließgrenze, $w_L$		Y Plastizitätszahl, $I_p$			
Art des Bodens		Bezeichnung für die Plastizität			
		Wassergehalt an der Fließgrenze			
Cl	Ton	L	niedrig	< 35	
Si	Schluff	M	mittel	35 bis 50	
		H	hoch	50 bis 70	
		V	sehr hoch	> 70	
		O	organisch	zur Klassifizierung für organisches Material (z. B. CIHO) hinzufügen	
U-Linie		$I_p = 0,9 (w_L - 8)$		A-Linie	$I_p = 0,73 (w_L - 20)$

**Abb. 5.2:** Plastizitätsdiagramm (aus DIN EN ISO 14688-2:2018 [118]).

Die erste Version der DIN 18196, die DIN 18196:1970 [129], die zurückgezogen ist und keine Gültigkeit mehr besitzt, beschreibt organische Beimengungen in Böden als ein Substrat von noch nicht zersetzten Rückständen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs oder als eine Substanz, die ihre ursprünglich erkennbare Struktur verloren hat und in eine dunkle formlose Masse übergegangen ist. Nach [129] bestehen Torfböden und einige Mudden fast gänzlich aus organischer Substanz (Anteil der Trockenmasse) wohingegen der Anteil bei vielen organogenen Bodenarten,

die unter der Mitwirkung von Organismen entstanden sind, nur wenige Prozente beträgt und damit die physikalischen Eigenschaften dieser Böden so beeinflusst, dass diese im Plastizitätsdiagramm, wie bereits beschrieben, unterhalb der A-Linie (vgl. ) liegen.

Nach DIN EN ISO 18196:2011-05 [126] ist anhand des Massenanteils an Organik bei der Klassifizierung zwischen organischen Böden (Gruppen-Kurzzeichen: H bzw. F) und organogenen Böden bzw. Böden mit organischen Anteilen (Hauptgruppen-Kurzzeichen: O) zu unterscheiden.

Die organogenen und Böden mit organischen Beimengungen werden unterteilt in die bereits aufgeführten Schluffe mit organischen Beimengungen (OU) und Tone mit organischen Beimengungen und organogene Tone (OT). Weiter werden grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art (OH) („*Beimengungen pflanzlicher Art, meist dunkle Färbung, Modergeruch, Glühverlust bis etwa 20 % Massenanteil*“ DIN EN ISO 18196:2011-05, Tab. 4, Z. 23, Sp. 8 [126]) und grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen (OK) („*Beimengungen nicht pflanzlicher Art, meist helle Färbung, leichtes Gewicht, große Porosität*“ DIN EN ISO 18196:2011-05, Tab. 4, Z. 24, Sp. 8 [126]) genannt.

Bei der Klassifizierung organischer Böden ist zwischen an Ort und Stelle aufgewachsenen Bildungen, Torf (Humus) (Hauptgruppen-Kurzzeichen: H), und unter Wasser abgesetztem Schlamm (Faulschlamm) (Hauptgruppen-Kurzzeichen: F), zu unterscheiden.

Die [126] unterscheidet organische Böden in nicht bis mäßig zersetzte Torfe (Humus) (HN) bzw. zersetzte Torfe (HZ) und fasst unter dem Sammelbegriff Schlamm Faulschlamm, Mudde, Gyttja, Dy und Sapropel (F) zusammen.

Die Böden mit den Gruppen-Kurzzeichen H und F können in getrocknetem Zustand an der Luft brennen oder schwelen, während die Böden mit dem Hauptgruppen-Kurzzeichen O dies nicht können. Zusätzliche Angaben zum Massenanteil an organischen Bestandteilen als die erwähnten werden nicht gemacht.



### 5.3 Bezeichnung der Böden nach DIN 1054

Die DIN 1054:2010 [130] unterteilt Böden auf Grundlage der zurückgezogenen DIN 18196:2006 [131] und der durch Glühverlustmessung bestimmten organischen Anteile nach der folgenden Tabelle mit Bodengruppen nach DIN 18196:2011 [126]).

Tab. 5.7: Bezeichnung der Böden nach DIN 1054:2010 [130]

<p><b><u>Nichtbindige Böden nach DIN 1054:2010</u></b> [130]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kornanteil <math>d &lt; 0,063 \text{ mm} \leq 40 \text{ M.-%}</math> (DIN 18196:2011 [126])</li> <li>- Anteil org. Substanz (Glühverlust <math>V_{gl}</math>) <math>\leq 3 \text{ M.-%}</math> (DIN 1054:2010 [130])</li> <li>- Bodengruppen nach DIN 18196:2011 [126]: GE, GW, GI, SE, SW, SI, GU, GT, SU, ST bzw. GU*, GT*, SU*, wenn der Feinanteil das Bodenverhalten nicht bestimmt.</li> </ul>
<p><b><u>Bindige Böden nach DIN 1054:2010</u></b> [130]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kornanteil <math>d &lt; 0,063 \text{ mm} &gt; 40 \text{ M.-%}</math> (DIN 18196:2011 [126])</li> <li>- Anteil org. Substanz (Glühverlust <math>V_{gl}</math>) <math>\leq 5 \text{ M.-%}</math> (DIN 1054:2010 [130])</li> <li>- Bodengruppen nach DIN 18196 [126]: GU*, GT*, SU*, ST*, UL, UM, UA, TL, TM, TA bzw. GT, SU u. ST (vgl. DIN 1054:2010 [130])</li> </ul>
<p><b><u>Organische und organogene Böden</u></b></p> <p><b>Böden mit organischen Beimengungen (nichtbindig) nach DIN 1054:2010</b> [130]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anteil org. Substanz (Glühverlust <math>V_{gl}</math>) <math>&gt; 3 \text{ M.-%}</math> (DIN 1054:2010 [130])</li> </ul> <p><b>Böden mit organischen Beimengungen (bindig) – <u>Organogene Böden</u> nach DIN 1054:2010</b> [130]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anteil org. Substanz (Glühverlust <math>V_{gl}</math>) <math>&gt; 5 \text{ M.-%}</math> (DIN 1054:2010 [130])</li> <li>- Bodengruppen nach DIN 18196 [126]: OU, OT, OH u. OK</li> </ul> <p><b>Organische Böden</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Torfe und Schlammte nach DIN 18196 [126]</li> <li>- Bodengruppen nach DIN 18196 [126]: HN, HZ, F</li> </ul>

### 5.4 Klassifizierung nach Schweizer Norm bzw. USCS

Die Benennung und Beschreibung von Böden findet in der Schweiz nach der europäischen Norm EN ISO 14688-2:2004 [121] statt. Zusätzlich finden sich weitere Regelungen in der Schweizer Norm SN 670004-2b-NA:2008 [132], die einen nationalen Anhang der EN ISO 14688-2 darstellt. In dieser Norm wird die Klassifikation nach dem amerikanischen USCS (Unified Soil Classification System), welches in der Schweiz üblich und international stark verbreitet ist, beschrieben. Organische Bodenbestandteile werden dabei mit dem Symbol O (Organic) und Torfe mit dem Symbol Pt (Peat) bezeichnet. Dabei wird ein Boden ( $D_{50}^4 \leq 0,063 \text{ mm}$ ) nach USCS dann als organisch bezeichnet, wenn das Verhältnis der Fließgrenze  $w_L$  der Probe, welche bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet wurde ( $w_{L105}$ ), im Vergleich zur Fließgrenze des natürlichen Bodens ( $w_{Lnat}$ ) kleiner als 0,75 [-] ist.

<sup>4</sup> prozentualer Durchgang [M.-%] bei der Siebanalyse

Die Abb. 5.3 zeigt das Flussdiagramm zur Klassifikation nach dem USC-System.

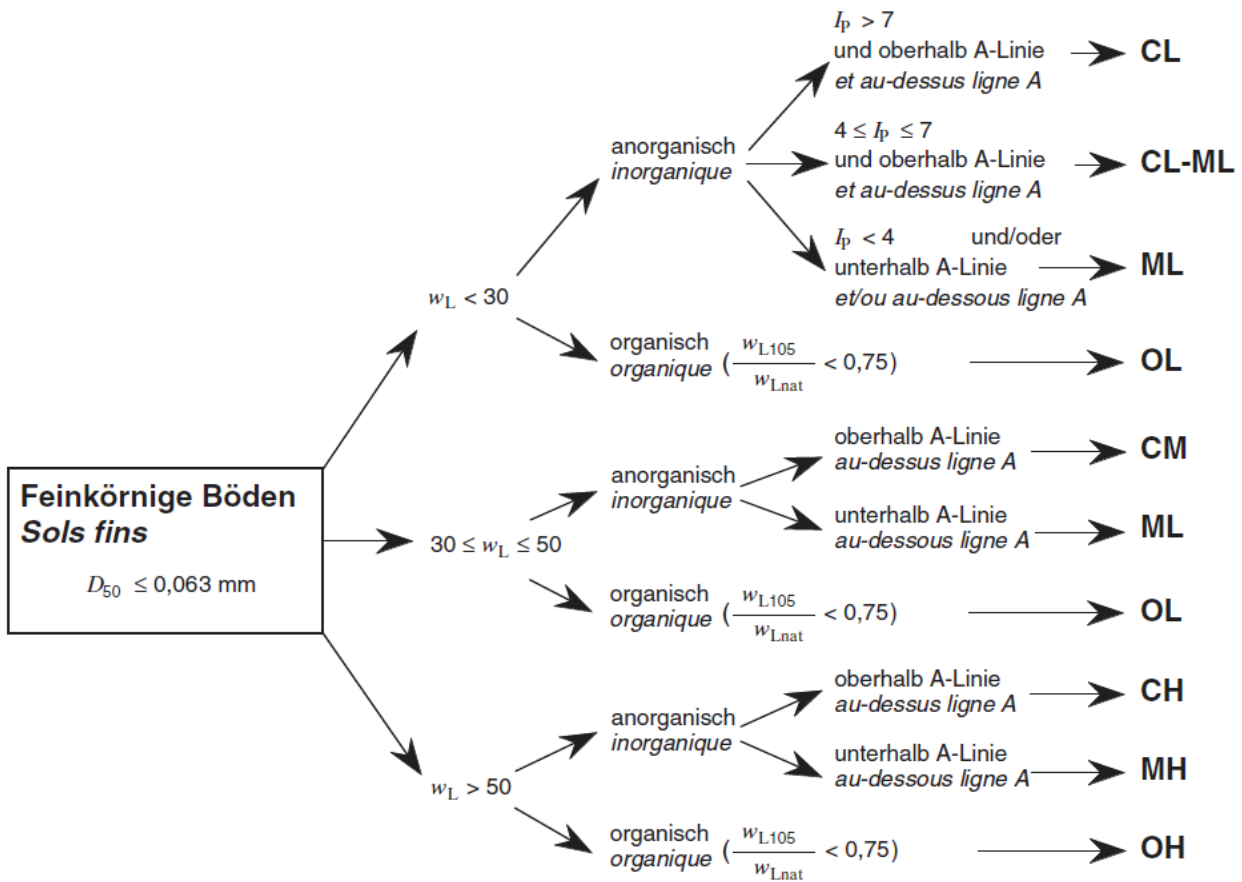
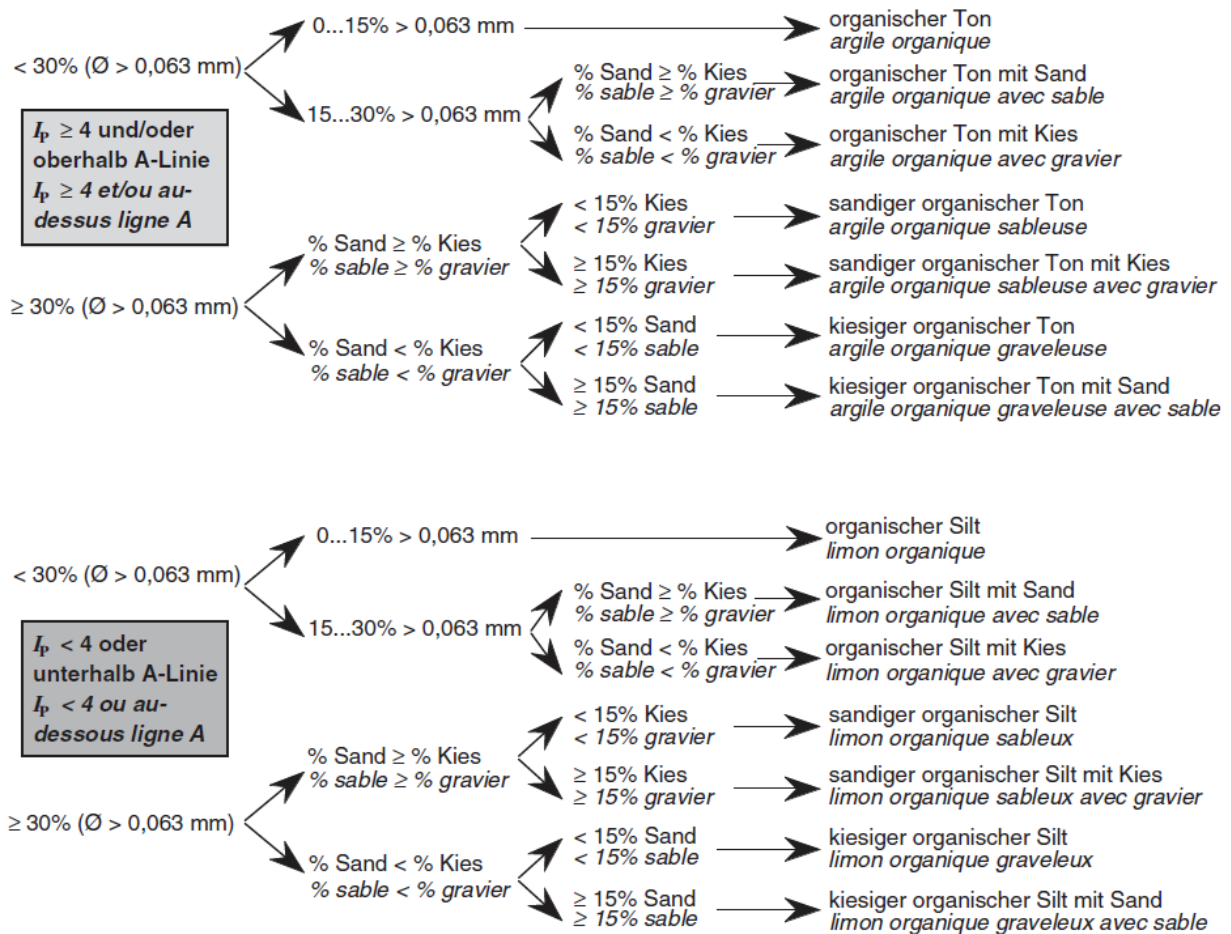


Abb. 5.3: Gruppensymbole für feinkörnige Böden (aus SN 670 004-2b-NA [132])

Die Gruppennamen werden hier nach Fließgrenzen  $w_L < 30$ ,  $30 \leq w_L \leq 50$  und  $w_L \geq 50$  % vergeben. Ergibt das Verhältnis  $w_{L105}$  zu  $w_{Lnat}$  einen Wert  $< 0,75$  ist der untersuchte Boden entsprechend der natürlichen Fließgrenze  $w_L$  als leichtplastisch (OL,  $w_L \leq 50$  %) oder hochplastisch (OH,  $w_L \geq 50$  %) einzustufen (Plastizität: Low (L), Medium (M) bzw. High (H)).

Weitere Unterteilungen der organischen Bodenarten erfolgen wie in Abb. 5.4 dargestellt, anhand der Plastizitätszahl  $I_p$  und der Korngrößenverteilung. Torf (Pt) wird hier einzeln aufgeführt.



**Pt** Organische Beimengungen überwiegend, dunkle Farbe  
*Matière organique prédominante de couleur foncée* Torf  
*tourbe*

**Abb. 5.4:** Gruppennamen der feinkörnigen, organischen Böden (aus SN 670 004-2b-NA [132])

Neben der Methode der Bestimmung des Verhältniswertes der Fließgrenzen sind in der Schweizer Norm SN 670370a:2008 [133] noch die Bestimmung des organischen Anteils anhand der Verfärbung mit Natronlauge und die Bestimmung des organischen Anteils anhand des Glühverlustes beschrieben. Die Bestimmung des Glühverlustes unterscheidet sich dabei nicht von dem in der DIN 18128:2002 [122] beschriebenen Verfahren (s. Abschn. 5.6).

Beim Verfahren „Verfärbung mit Natronlauge“ wird Bodenmaterial (150 g) in ein Standglas mit 250 ml dreiprozentiger Natronlauge gegeben. Nach 24 h lässt sich anhand der Verfärbungsstufe (s. Tab. 5.8) der organische Anteil abschätzen (vgl. [134]).

**Tab. 5.8: Bestimmung der organischen Anteile mit Natronlauge (nach SN 670370a:2008 [133]).**

Verfärbung der Natronlauge	Stufe	... organisch
leicht gelbliche Tönung	1	nicht
hellgelb	2	leicht
gelb	3	mittel
braun	4	mittel-stark
dunkelbraun bis schwarz	5	stark

## 5.5 Zersetzungsgrad nach DIN 19682-12

Die DIN 19682-12:2007 [135] regelt ein Verfahren zur Bestimmung der Zersetzungsstufen und des Zersetzungsgrades von Torfen. Der Zersetzungsgrad (H1-10), der auf das Klassifizierungssystem nach von Post (vgl. [136], [137]) (auch Humositätsgrad (hg)) zurückgeht, welches Torfe nach ihrer Herkunft, dem Zersetzungsgrad und der Farbe nach dem Quetschversuch unterteilt, ist hiernach nicht auf vererdete, vermulmte und vermurschte Torfe anwendbar (vgl. [135]). Die für die Bodenkartierung vereinfachte Unterteilung des Zersetzungsgrades (z1-5) (vgl. auch Zersetzungsgrade nach [138]) wird vorwiegend bei trockenen Torfen angewendet (s. Tab. 5.9).

**Tab. 5.9: Bestimmung der Zersetzungsstufen und des Zersetzungsgrades von pedogen nicht veränderten Torfen (aus DIN 19682-12:2007-11 [135]).**

Zersetzungsstufe		Merkmale trockener und zersetzter Torfe <sup>2)</sup>		Zersetzungsgrad nach VON POST <sup>1)</sup>	Merkmale feuchter, grubenfrischer Torfe (nach VON POST ohne Angaben zum Dy-Gehalt)		
Kurzzeichen	Bezeichnung	Farbe des Torfes <sup>3)</sup>	strukturierte Pflanzenreste im Torf	Kurzzeichen	Pflanzenstrukturen im Torf	beim Quetschen zwischen den Fingern hindurchgehend	Rückstand nach dem Quetschen
z1	sehr schwach	weißlich bis gelb	einzigster erkennbarer Torfbestandteil	H 1	deutlich	farbloses, klares Wasser	nicht breiartig
		ziemlich hellbraun		H 2		schwach gelbbraunes, fast klares Wasser	
z2	schwach	dunkelbraun		H 3		braunes, deutlich trübes Wasser	
				H 4		braunes, stark trübes Wasser	
z3	mittel	ziemlich dunkelbraun bis schwarz	nahezu einziger erkennbarer Torfbestandteil	H 5	etwas undeutlich	stark trübes, Wasser, daneben etwas Torfsubstanz	etwas breiartig
			über 2/3 der Torfsubstanz	H 6		bis 1/3 der Torfsubstanz	stark breiartig
z4	stark		etwa 1/2 der Torfsubstanz	H 7	noch einigermaßen erkennbar	Etwa 1/2 der Torfsubstanz	Pflanzenstrukturen deutlicher als vorher
			etwa 1/3 der Torfsubstanz	H 8	sehr undeutlich	etwa 2/3 der Torfsubstanz	besonders aus widerstandsfähigeren Resten, z. B. Fasern, Holz
z5	sehr stark		nur sehr wenig der Torfsubstanz	H 9	fast nicht mehr erkennbar	fast die gesamte Torfsubstanz	
			keine pflanzlichen Strukturen	H 10	nicht mehr erkennbar	die gesamte Torfsubstanz	kein Rückstand

<sup>1)</sup> Auch als Humositätsgrad (hg) bezeichnet.  
<sup>2)</sup> Stufen analog zur VON POST'schen Skala (für schwach zersetzte Torfe nicht vergleichbar mit der fünfstufigen Skala der DIN 19682-12:1997-04).  
<sup>3)</sup> Nur gleichartige Torfe besitzen bei gleicher Zersetzung auch die gleiche Farbe. So sind Niedermoor torfe in der Regel dunkelbraun bis schwarz, Hochmoor torfe, besonders Cymbifolia-Torfe, oft mehr rötlichbraun, Cuspidata-Torfe eher gelblich- oder gelbbraun.

Vgl. zudem [139] nach [140] mit dem „R-Wert“ (Prozentanteil der strukturlosen Masse), Korrelation von [141] mit R- und H-Wert und die zurückgezogene TGL 24300/04:1986 [142] bzw. TGL 24300/06:1977 [143] mit einer 3-stufigen Unterteilung des z-Wertes für trockene Torfe (vgl. auch [91]).

## 5.6 Bestimmung des Humusgehaltes

Nach bodenkundlicher Fachliteratur wird unter „Humus“ die in den Boden integrierte organische Bodensubstanz (OBS) verstanden (vgl. [93], [77], [144]), welche nach [144] durch Untersuchungen des Gehaltes an organischem Kohlenstoff im Boden ( $C_{org}$ ) nachweisbar ist (vgl. Abschn. 7.2).

Die nach [145] aufgeführten Verfahren sind:

- Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse (Differenzmethode).

Hier wird die Probe im Sauerstoffstrom bei Temperaturen von 900 bis 1.500 °C geglüht bzw. verbrannt. Mittels Wärmeleit- oder Infrarot-Detektor wird das freigesetzte Kohlendioxid ( $CO_2$ ) gemessen. Unterschieden werden die Verfahren A (Zerstörung anorganischer Kohlenstoffverbindungen, Behandlung mit nichtoxidierenden Säuren vor dem Glühen der Probe) und B (parallele Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffes und rechnerischer Fehlerausgleich).

- Direkte Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 550°C und Gasanalyse.

Bei dieser Bestimmung wird die Probe im Sauerstoffstrom bei einer Temperatur von 550°C geglüht bzw. verbrannt. Das dabei entweichende Kohlendioxid ( $CO_2$ ) wird mit einem Wärmeleit- oder Infrarot-Detektor gemessen, woraus die Berechnung des Gehaltes an organisch gebundenem Kohlenstoff (TOC) erfolgt. Nach [145] werden anorganische Kohlenstoffverbindungen bei dieser Verbrennungstemperatur nicht erfasst bzw. können vernachlässigt werden.

Nach [93] wird der Gehalt an organischer Bodensubstanz (OBS) in 8 Stufen, h0 bis h7, humusfrei bis organische Horizonte, unterteilt. Die im Labor ermittelten Werte für organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) werden dann durch Multiplikation mit dem Faktor 1,724 in organische Bodensubstanz (Humus) umgerechnet. Bei Torfen und Auflagehumus wird nach [93] der Faktor 2,0 verwendet (vgl. folgende Tab. 5.10 und Abschn. 7.2).

**Tab. 5.10: Humusstufen nach [93] und entsprechende  $C_{org}$ -Werte.**

Stufe [Kurzzeichen]	Gehalt organischer Substanz (Humus) ( $C_{org} \times 1,724$ bzw. $2,0$ ) [M.-%]	entsprechender $C_{org}$ -Wert (Humus $\times 1,724^{-1}$ bzw. $2,0^{-1}$ ) [M.-%]	Bezeichnung
h0	0	-	humusfrei
h1	<1	<0,58	sehr schwach humos
h2	1 bis < 2	0,58 bis < 1,16	schwach humos
h3	2 bis < 4	1,16 bis < 2,32	mittel humos
h4	4 bis < 8	2,32 bis <4,64	stark humos
h5	8 bis < 15	4,64 bis <8,69	sehr stark humos
h6	15 bis < 30	8,70 bis < 15,0 bzw. 17,40	extrem humos, anmoorig
h7	$\geq 30$	$\geq 15$ bzw. 17,40	organisch, Torf

## 5.7 Klassifizierung nach ASTM International

Bei der ASTM International (American Society for Testing and Materials International) handelt es sich um eine internationale Standardisierungsorganisation mit Sitz in Pennsylvania, USA. Die in Tab. 5.11 dargestellten Normen regeln Versuche und Methoden zur Beschreibung und Klassifikation von Torfen und anderen organischen Böden.

**Tab. 5.11: ASTM Normen zur Bestimmung von Eigenschaften bzw. zur Klassifizierung von Torf.**

Bezeichnung	Englischer Titel	Inhalt
D 1997:2013 [146]	Standard Test Method for Laboratory Determination of the Fiber Content of Peat Samples by Dry Mass	Bestimmung des Fasergehaltes von Torf durch Auswaschen mit einer Lösung aus Polyphosphaten
D 2944:2014 [147]	Standard Method of Sampling Processed Peat Materials	Entnahme von Torfproben
D 2974:2014 [148]	Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils	Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung und Bestimmung des Glühverlustes
D 2976:2015 [149]	Standard Test Method for pH of Peat Materials	Bestimmung des pH-Wertes mittels Messgerät
D 2980:2017 [150]	Standard Test Method for Saturated Density, Moisture-Holding Capacity, and Porosity of Saturated Peat Materials	Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit und Porosität von Torfen
D 4427:2018 [151]	Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing	Klassifikation von Torfen anhand ihrer Zusammensetzung
D 4531:2015 [152]	Standard Test Method for Bulk Density of Peat and Peat Products	Bestimmung der Rohdichte durch Abwiegen von Bohrkernen und durch Tauchwägung

Bis auf die ASTM D 4427:2018 [151], welche Hinweise zur Klassifikation zu Torfen gibt, handelt es sich bei allen anderen in Tab. 5.11 dargestellten Normen um Leitfäden zur Bestimmung von Eigenschaften oder Zusammensetzungen. Torf wird in dieser Norm definiert als eine natürlich vorkommende Substanz mit großem organischen Anteil, welcher hauptsächlich aus Pflanzenresten besteht und sich durch einen Ascheanteil von  $< 25$  M.-% (Glühverlust  $> 75$  M.-%) von den übrigen organischen Böden unterscheidet (vgl. Tab. 5.15).

Als Grundlage für die Klassifizierung dienen dabei folgende Eigenschaften:

▪ **Wasserbinde –bzw. Wasseraufnahmevermögen (Absorbency),**

welches nach ASTM D 2980:2017 [150] bestimmt wird und nach Tab. 5.12 unterschieden wird.

Tab. 5.12: Wasseraufnahmevermögen nach ASTM D 4427:2018 [151]

Bezeichnung	Wasseraufnahmevermögen (Absorbency) [M.-%]
Extremely Absorbent	$> 1.500$
Highly Absorbent	$800 \leq \text{Wasseraufnahme} \leq 1.500$
Moderately Absorbent	$300 \leq \text{Wasseraufnahme} \leq 800$
Slightly Absorbent	$< 300$

Das Wasseraufnahmevermögen wird für die Klassifizierung nach DIN EN ISO 14688-1 und -2:2018 (vgl. [91] und [118]) nicht betrachtet. Die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach deutscher Norm ist in der DIN 18132:2012 [153] geregelt. Unterteilt wird das Wasseraufnahmevermögen eines Bodens für bautechnische Zwecke nach [153] in die Bereiche sehr niedrig, niedrig, mittel, hoch und sehr hoch. Mit sehr hoch werden hier Wasseraufnahmevermögen größer als 130 M.-% bezeichnet. Eine genauere Klassifizierung von Torfen mit höheren Wasseraufnahmevermögen, wie in der ASTM D 4427:2018 [151] aufgeführt, wäre somit nicht möglich (vgl. hierzu auch [154]).

- **Säuregehalt bzw. pH-Wert (Acidity).**

Entsprechend dem Säuregehalt bzw. pH-Wert, welcher mittels pH-Messgerät nach ASTM D 2976:2015 [149] bestimmt wird, werden organische Böden folgendermaßen aufgeteilt:

**Tab. 5.13: Bezeichnung des pH-Wertes nach ASTM D 4427:2018 [151].**

Bezeichnung	pH-Wert [-]
Highly Acidic	< 4,5
Moderately Acidic	4,5 – 5,5
Slightly Acidic	5,5 – 7,0
Basic	> 7,0

In der DIN EN ISO 14688-1 und -2:2018 (vgl. [92] und [118]) wird auf eine Unterscheidung nach dem pH-Wert des Bodens nicht eingegangen. Stattdessen wird der Kalkgehalt betrachtet, welcher als Feldversuch durch die Reaktion des Bodens mit Salzsäure abgeschätzt werden kann.

- **Glühverlust (Ash Content)**

Anhand des Aschegehaltes, dessen Bestimmung in der ASTM D 2974:2014 [148] geregelt ist, werden Torfe nach den in Tab. 5.14 dargestellten Kriterien unterschieden, wobei hier zwischen den Glühtemperaturen 440 °C und 750 °C unterschieden wird. Eine Bestimmung des Aschegehaltes bei einer Glühtemperatur von 440 °C ist nach [148] ausreichend für geotechnische und allgemeine Klassifikationszwecke, wohingegen eine höhere Glühtemperatur von 750 °C zu gebrauchen ist, wenn der Torf als Brennstoff verwendet und dementsprechend bewertet werden soll. Ferner stellt der Aschegehalt das Gegenteil des allgemein für Vergleiche herangezogenen Glühverlustes, in dem der verglühte Teil der Probe auf die Ursprungsprobe (getrocknete Probe) bezogen wird, dar. Der Glühverlust, nach ASTM D 2974:2014 [148] als „organic matter“ bezeichnet, ergibt sich aus (Gl. 5.2).

---


$$\text{organic matter} = 100 - D \text{ [M. - \%]} \quad [148] \quad (\text{Gl. 5.2})$$


---

darin ist:

D = ash content



**Tab. 5.14: Aschegehalt mit Umrechnung in Glühverlust nach ASTM D 4427:2018 [151].**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Ash Content (Aschegehalt)</b> [M.-%]	<b>organic matter (org. Anteile bzw. Glühverlust)</b> [M.-%]
Low Ash	< 5,0	> 95,0
Medium Ash	5,0 ≤ Aschegehalt ≤ 15,0	85,0 ≤ Glühverlust ≤ 95,0
High Ash	> 15,0	< 85,0

Weiter ergibt sich nach ASTM D 4427:2018 [151] die bereits aufgeführte Unterteilung nach Tab. 5.15, womit Torfe einen Aschegehalt von < 25,0 M.-% bzw. einen Glühverlust von > 75,0 M.-% aufweisen. Die sonstigen organischen Böden zeigen höhere Aschegehalte bzw. geringere Glühverluste.

**Tab. 5.15: Unterteilung organische Böden nach ASTM D 4427:2018 [151].**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Ash Content (Aschegehalt)</b> [M.-%]	<b>organic matter (org. Anteile bzw. Glühverlust)</b> [M.-%]
other organic soils (sonstige organische Böden)	≥ 25,0	≤ 75,0
Peat (Torf)	< 25,0	> 75,0

#### ▪ **Pflanzliche Zusammensetzung (Botanical Compostion)**

Hierbei werden die Torfe nach der dominierend enthaltenen Pflanzengattung, die an nicht zersetzten Bestandteilen bzw. Fasern erkennbar ist, angesprochen (vgl. [93]). Voraussetzung für die Benennung der botanischen Herkunft (bspw. Sphagnum Peat (Sphagnum-Torf) oder Taxodium Peat (Zypressen-Torf)) ist, dass mindestens 75 M.-% der Fasern dem Pflanzenmaterial zugewiesen werden können. Liegt mehr als ein pflanzlicher Organiklieferant vor (bspw. Reed-Sedge Peat (Schilf-Riedgras-Torf) oder Spruce-Moss Peat (Fichten-Moos-Torf)) ist es notwendig, dass insgesamt mindestens 75 M.-% der Fasern von diesen stammen. Die Benennung erfolgt dann beginnend mit dem höchsten vorliegenden Anteil.

Für Torfe mit weniger als 33 M.-% Fasergehalt wird von der Ansprache mit der pflanzlichen Herkunft abgeraten, es sei denn die Herkunft eines signifikanten Teiles der nicht faserigen Fraktion kann eindeutig zugewiesen werden (z. B. Algal Peat (Algentorf bzw. Meertorf)).

#### ▪ **Fasergehalt (Fiber Content).**

Torfe werden nach der [151] anhand ihres Fasergehaltes, in die Tab. 5.16 dargestellten Untergruppen eingeteilt.

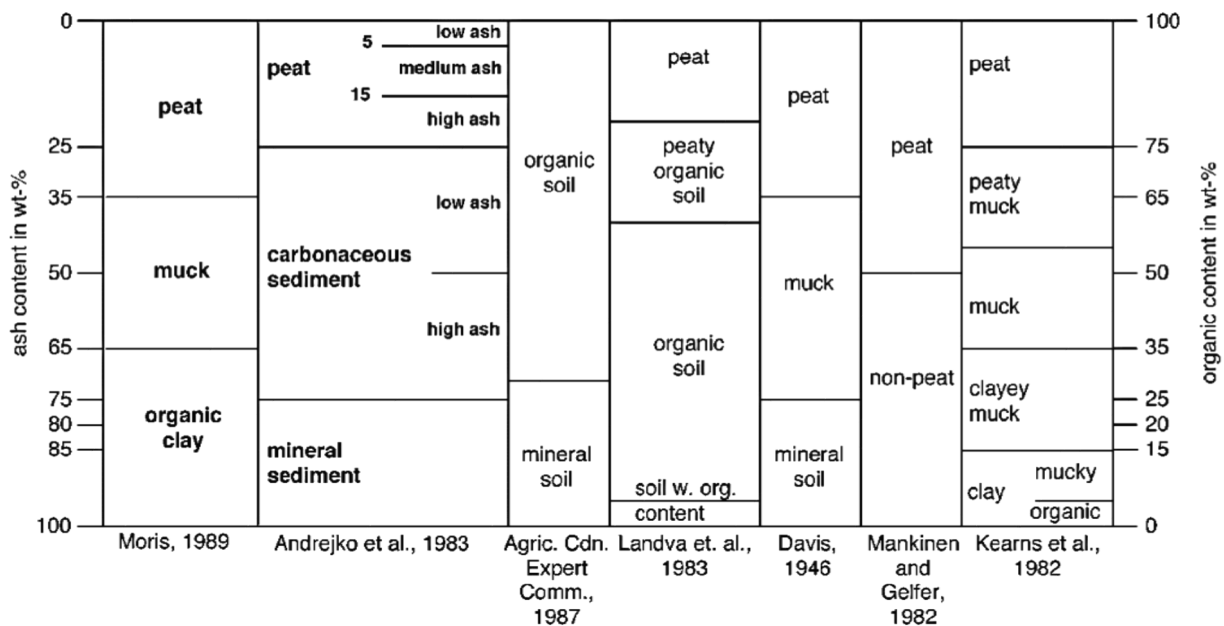
**Tab. 5.16: Fasergehalt nach ASTM D 4427:2018 [151].**

Bezeichnung	Fasergehalt (Fiber Content) [M.-%]
Fibric	> 67,0
Hemic	33,0 ≤ Fasergehalt ≤ 67,0
Sapric	< 33,0

In der europäischen Norm wird der Zersetzungsgrad über den Fasergehalt (s. Ausquetschversuch Tab. 5.3) bestimmt. Der Laborversuch zur Bestimmung des Fasergehaltes durch Siebung ist in der ASTM D 1997:2013 [146] geregelt.

## 5.8 Weitere Klassifizierungen

Die Abb. 5.5 zeigt eine Zusammenfassung von Klassifizierungssystemen verschiedener Autoren (vgl. [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161]) nach dem Anteil des Aschegehalts (ash content) bzw. des organischen Anteils (organic content – hier: Glühverlust) in [M.-%] der Trockensubstanz (vgl. [162]). Danach wird Boden erst ab einem Aschegehalt von  $\geq 50$  M.-% [160] als Torf klassifiziert. [156] ergänzen, dass der Ausdruck „muck“ für die Beschreibung von „Unter-Torfen“ („sub-peats“) und eine Vielzahl von Böden bzw. Sedimenten mit  $\geq 26$  M.-% bzw.  $< 85$  M.-% Ascheanteil verwendet wird und insbesondere in der Geologie andere Definitionen aufzeigt. [157] unterscheiden abweichend von den anderen Klassifikationssystemen nur in mineralische ( $< 30$  M.-% Ascheanteil) und organische Böden ( $> 30$  M.-% Ascheanteil). Vgl. zudem [163], [164] und [165].

**Abb. 5.5: Klassifizierung nach verschiedenen Systemen auf Grundlage des Aschgehaltes/organischen Anteils in M.-% der Trockensubstanz (aus [166]).**

## **5.9 Zusammenfassung**

Insgesamt sind die Klassifizierungen nach den deutschen Regelwerken als sehr unscharf zu bezeichnen. Eine genaue Klassifizierung von Torf auf Grundlage des organischen Anteils besteht nicht. Weiter wird Torf als organischer Boden benannt. Die Regelungen der ASTM hingegen zeigen ein deutlich genaueres Klassifizierungssystem, wobei hier Torfe erst ab einem Gehalt an organischen Bestandteilen von  $> 75$  M.-% als diese gelten. Siehe hierzu weiter Abschn. 6.4 zur Klassifizierung der Versuchstorfe.

## **5.10 Behandlung von Bodenaushub mit organischen Bestandteilen**

Auf die Behandlung von Bodenaushub mit organischen Bestandteilen wird im Rahmen dieser Arbeit auf [167] verwiesen, die in ihrem Bericht „Leitfaden zum Umgang mit organikhaltigem Bodenaushub bei kleinen und mittleren Bauvorhaben“ mit Leitfaden und Anhängen auf diesen Sachverhalt insbesondere in Bayern und auch den übrigen Ländern eingehen.



## 6 Versuchsböden

### 6.1 Auswahl und Herkunft

Für die Untersuchungen wurden gezielt regionale Böden mit organischen Bestandteilen ausgewählt, welche in Zusammenhang mit Setzungsschäden an Bauwerken stehen. Hinzukommend wurde ein (weicher) rheinischer Schluff in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen, da dieser mit qualifizierten erdbautechnischen Maßnahmen auch für höhere Bauwerkslasten als Baugrund nutzbar gemacht werden kann.

Das Probenmaterial der Versuchsböden Torf 1 (T1), Torf 2 (T2), Torf 3 (T3) und Schluff 1 (S1) stammt aus verschiedenen Städten des rheinischen Braunkohlereviere (Bedburg, Jülich und Linich) und wurde im Rahmen von Untersuchungsschürfen entnommen.

### 6.2 Homogenisierung der Versuchsböden

Aufgrund des ausschließlich auf Laborversuchen basierenden Versuchsprogramms, musste das durch die Fa. RWE Power AG, Köln gestellte Probenmaterial für die Versuche von seiner inhomogenen Form in eine homogene Probenmasse überführt werden.

Die Homogenisierung bzw. Aufbereitung („Remoulding“) des Probenmaterials, welches in 10 und 15 l Gebinden angeliefert wurde, erfolgte durch eine Aussortierung der größeren sichtbaren Bestandteile, hauptsächlich organischen Ursprungs in Form von nicht vollständig zersetzten wassergesättigten Pflanzenfasern und Holzresten aber auch vereinzelt Kieskörner (Mittelkies-Größe nach DIN 18196:2011-05 [126]). Insgesamt betrug der Anteil des aussortierten Materials bei den Versuchstorfen T1, T2 und T3 etwa 2,1, 1,7 und 0,8 M.-% des feuchten Ausgangsmaterials.

### 6.3 Ergebnisse der Untersuchungen an den Versuchsböden

#### 6.3.1 Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17982-4

Die Korngrößenverteilung der Böden wurde nach der DIN EN ISO 17982-4:2017-04 [168] in Abhängigkeit von der Korngröße durch Siebung (Korngröße Siebkorn  $> 0,063$  mm) und Sedimentation (Korngröße Schlammkorn  $< 0,125$  mm) bestimmt.

Die homogenisierten Versuchstorfe zeigen besonders im gröberen Bereich unterschiedliche Kornverteilungen. Der T1 weist mit einem Feinkieskornanteil von 4,11 M.-% und einem Sandkornanteil von 40,57 M.-%, die höchsten Siebkornanteile auf, und mit Schluff- bzw. Tonanteilen von 47,68 bzw. 7,85 M.-%, die geringsten Schlämmerkornanteile.

Die Sieblinien der Torfe T2 und T3 verlaufen hingegen mit Kies- bzw. Sandanteilen von 2,08 und 0,21 M.-% bzw. 28,18 und 8,18 M.-% deutlich flacher im Siebkornbereich. Im feinen Bereich der Sieblinien, den Schlämmerkornanteilen, ergeben sich näher zusammenliegende Anteile (vgl. Tab. 6.1). Der nicht homogenisierte Schluff S1 zeigt Feinsandanteile vom 9,00 M.-% und Schlämmerkornbestandteile mit Schluff- bzw. Tonanteilen von 80,97 bzw. 10,03 M.-%.

Tab. 6.1: Kornverteilungen der Versuchsböden nach [168].

Versuchsboden [Bez.]	Siebkorn				Schlämmerkorn			
	Kies [M.-%]	Sand [M.-%]			Schluff [M.-%]			Ton [M.-%]
		fein	grob	mittel	fein	grob	mittel	
T1	4,11	12,57	13,12	14,88	28,12	13,94	5,62	7,85
T2	2,08	7,27	9,46	11,45	38,44	14,36	5,20	11,82
T3	0,21	0,43	1,64	6,09	53,77	16,54	6,57	14,76
S1	0,00	0,00	0,00	9,00	54,14	22,13	4,70	10,03

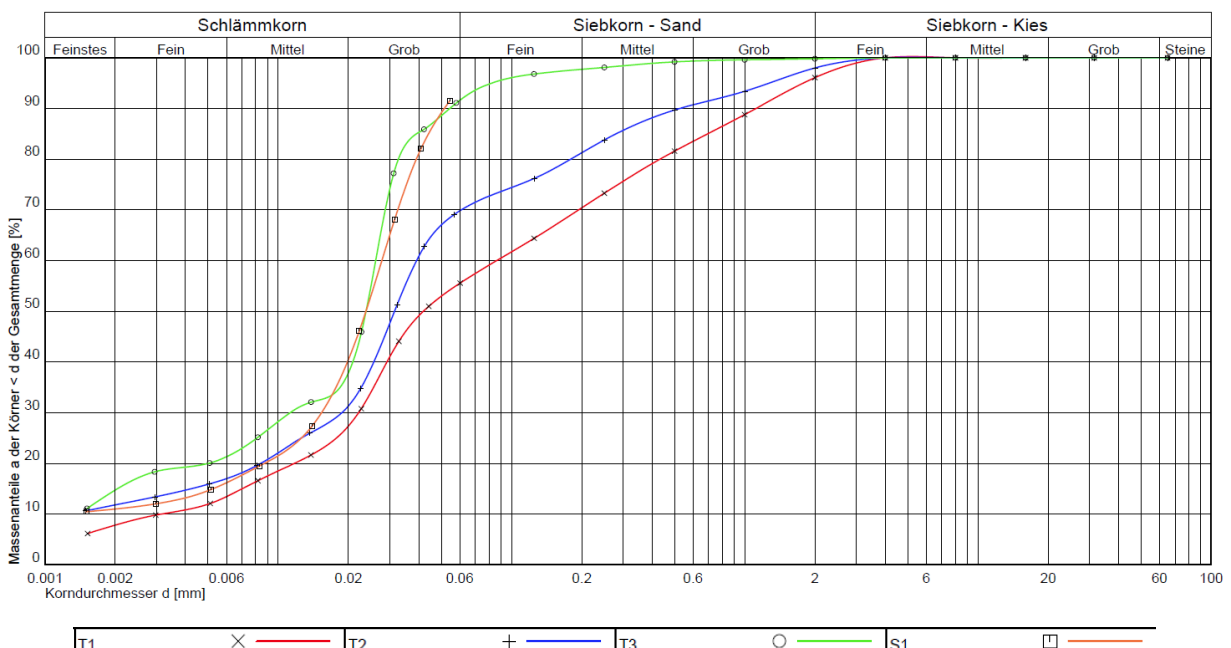


Abb. 6.1: Kornverteilungslinien der Versuchsböden.

Zur Verwertbarkeit von Schlämmanalysen organischer Böden bzw. Böden mit org. Anteilen existieren unterschiedliche Ansichten. Die zurückgezogene TGL 11462/07:1969 [169] bspw. beschränkte die Anwendung der Sedimentationsanalyse auf Böden mit max. 10 M.-% organischer Substanz.

Die sich aus den Sieblinien der Versuchsböden ergebenden Durchlässigkeitsbeiwerte belaufen sich nach empirischer Schätzformel [170] auf  $1,279 \cdot 10^{-7}$  bis  $1,753 \cdot 10^{-8}$  m/s (s. Tab. 6.2), wobei der T1 mit den höchsten Siebkornanteilen den höchsten Durchlässigkeitsbeiwert zeigt und der T3 aufgrund des hohen Tonanteils (14,76 M.-%) den geringsten  $k_f$ -Wert. Die Kornverteilung des S1 weist ebenfalls einen sehr niedrigen Beiwert in Höhe von  $6,510 \cdot 10^{-8}$  aus.

**Tab. 6.2:  $k_f$ -Werte der Versuchsböden nach den Kornverteilungen.**

Versuchsboden [Bez.]	$k_f$ -Wert nach [170] [m/s]
T1	$1,279 \cdot 10^{-7}$
T2	$5,925 \cdot 10^{-8}$
T3	$1,753 \cdot 10^{-8}$
S1	$6,510 \cdot 10^{-8}$

### 6.3.2 Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-1

Die gravimetrischen Wassergehalte der Versuchsböden wurden nach DIN EN ISO 17892-1:2015 [171] mit einer Trocknungstemperatur von 105 °C bestimmt. Abweichend dazu wurden die Wassergehalte des T1 noch zusätzlich mit einer Trocknungstemperatur von 60 °C untersucht.

Weiter wird in dieser Arbeit der Begriff Wasseranteil  $w_A$  neben dem in der Bodenmechanik geläufigen und nach DIN EN ISO 17892-1:2015-03 [171] geregelten Wassergehalt  $w$  in [M.-%], welcher sich auf die Masse eines Bodens nach Trocknung (Trockenmasse  $m_d$ ) bezieht, verwendet. Durch diesen ( $w_A$ ) wird der Anteil des Wassers an der Feuchtmasse ( $m_f$ ) des Bodens in [M.-%] wiedergegeben:

---


$$w_A = \frac{w}{m_f} [M. - \%] \quad (\text{Gl. 6.1})$$


---

Darin sind:

$w$  = Masse des Wassers [g]

$m_f$  = Masse der feuchten Probe [g]

Die Tab. 6.3 zeigt eine Zusammenstellung der ermittelten Wassergehalte /-anteile bzw. die sich daraus ergebenden Feststoffanteile.

**Tab. 6.3: natürliche Wassergehalte, -anteile und Feststoffanteile der Versuchsböden.**

Versuchsreihe [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Trocknungstemperatur [°C]	natürlicher Wassergehalt $w_n$ [M.-%]	natürlicher Wasseranteil $w_{An}$ [M.-%]	natürlicher Feststoffanteil [M.-%]
T1-60°C	8	60	224,46	69,18	30,82
V1 <sup>1</sup> [%]	-	-	n.b.	2,77	n.b.
T1-105°C	8	105	218,30	68,58	31,42
V [%]	-	-	n.b.	2,11	n.b.
T2-105°C	8	105	125,15	55,56	44,44
V [%]	-	-	4,63	2,03	n.b.
T3-105°C	8	105	97,69	49,40	50,59
V [%]	-	-	n.b.	1,56	n.b.
S1-105°C	4	105	20,16	16,77	83,23
V [%]	-	-	n.b.	2,53	n.b.

<sup>1</sup> s. Erklärungen Abschn. A. 1, n.b.: nicht berechnet

Der T1 zeigt mit einem natürlichen Wasseranteil  $w_{An}$  nach Bestimmung bei 105 °C von 68,58 M.-% ( $w_n=218,30$  %) den mit Abstand höchsten Wert der Versuchsböden, woran der T2 mit 55,56 M.-% ( $w_n=125,15$  %) und der T3 mit 49,40 M.-% ( $w_n=97,69$  %) folgen. Der Schluff S1 zeigt im Mittel einen vergleichsweise niedrigen natürlichen Wasseranteil von nur 16,77 M.-% ( $w_n=20,16$  %).

Nicht den Erwartungen entsprechend fielen die Wassergehaltsbestimmungen an den Teilproben des T1 bei 60 °C aus. Hier zeigten sich im Mittel höhere Gehalte ( $w_n=224,46$  M.-%,  $w_{An}=69,81$  M.-%) als bei den Bestimmungen bei 105 °C. Zurückzuführen ist dies auf die, ungeachtet erfolgter Homogenisierung, bestehende Inhomogenität des Versuchsbodens respektive der darin enthaltenen Organik. Insgesamt zeigen die Versuchsreihen mit Variationskoeffizienten  $V < 3$  % geringe Abweichungen. Die höchsten Abweichungen zeigen hier die Versuche am T1 mit  $V=2,11$  bis 2,77 %. Entsprechend der Wassergehalte zeigen die Torfe Feststoffanteile von 31,47 bis 50,59 M.-%. Der Schluff hingegen weist gemäß dem geringen Wassergehalt einen hohen Feststoffanteil von 83,23 M.-% aus. Die Abb. 6.2 zeigt eine Darstellung der Versuche zur Wassergehaltsbestimmung mit Mittelwerten (MW).



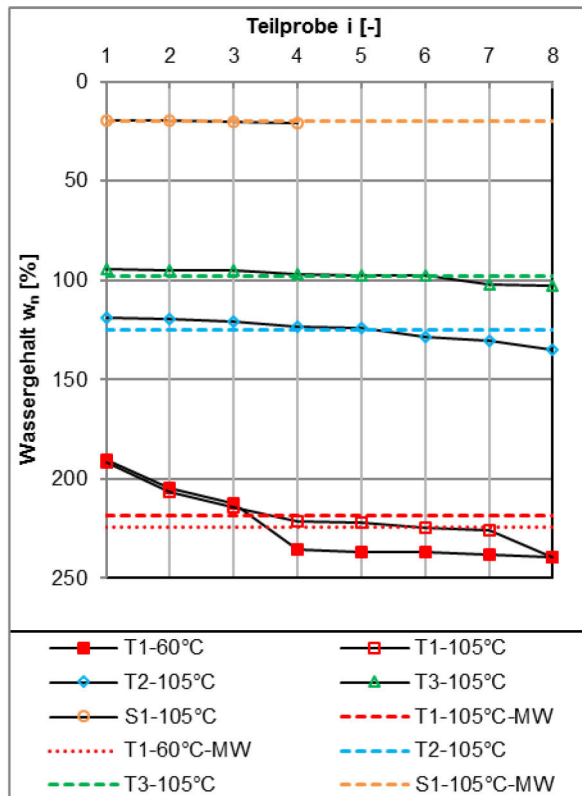


Abb. 6.2: Natürliche Wassergehalte  $w_n$  der Versuchsböden.

### 6.3.3 Wasseraufnahme nach DIN 18132

Die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens wurde nur an den Versuchstorfen T1 bis T3 nach DIN 18132:2012 [153] durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgte in der nach Norm kurzen Variante (Versuchsdauer  $\leq 1$  h) mit Probenmassen der Einzelversuche von 0,2 oder 1 g. Entgegen der Norm wurden zusätzlich Versuche an Proben durchgeführt, die bei niedrigerer Trocknungstemperatur (60 °C) getrocknet wurden. Die Tab. 6.4 zeigt eine Zusammenstellung der Wasseraufnahmevermögen der einzelnen Versuchsreihen/Versuche in Wassergehalt  $w$  bzw. Wasseranteil  $w_A$  bei der letzten Ableseung ( $t=60$  min) der Versuche.

Die Abb. 6.3 zeigt eine halblogarithmische Darstellungen der Zeit-Wassergehaltlinien. Zu erkennen ist, dass die bei 60 °C getrockneten Versuchsreihen wesentlich höhere Wasseraufnahmen zeigen als die bei 105 °C getrockneten Reihen. Sehr deutlich zeigt sich dieser Unterschied bei den T1-Reihen die nach Trocknung bei 60 °C anteilige Wasseraufnahmen von  $w_A=52,71$  bis 55,97 M.-% ( $w=112,98$  bis 127,74 %) ausweisen und nach Trocknung bei 105 °C lediglich 7,47 M.-% ( $w=8,22$  %). Ähnlich verhalten sich die Versuchsreihen des T2 mit geringfügig höheren Wasseraufnahmen nach Trocknung bei 105 °C ( $w_A=11,95$  M.-%,  $w=13,60$  %).

Tab. 6.4: Wasseraufnahmevermögen der Versuchsreihen.

Versuchsreihe / Versuch [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Einwaage [g]	Wasseraufnahme nach t=60 min als MW	
			w [M.-%]	w <sub>A</sub> [M.-%]
T1-60°C-0,2g	4	0,2	112,28	52,71
V [%]	-	-	n. b.	6,21
T1-60°C-1,0g	2	1,0	127,74	55,97
V [%]	-	-	n. b.	5,85
T1-105°C-1,0g	6	1,0	8,22	7,47
V [%]	-	-	n. b.	49,17
T2-60°C-0,2g	4	0,2	101,67	50,40
V [%]	-	-	n. b.	2,06
T2-60°C-1,0g	2	1,0	103,92	50,95
V [%]	-	-	n. b.	1,82
T2-105°C-1,0g	4	1,0	13,60	11,95
V [%]	-	-	n. b.	14,31
T3-60°C-0,2g	2	0,2	92,12	47,95
V [%]	-	-	n. b.	5,83
T3-60°C-1,0g	1	1,0	85,63	46,13
V [%]	-	-	n. b.	-
T3-105°C-0,2g	2	1,0	73,95	42,51
V [%]	-	-	n. b.	4,28
T3-105°C-1,0g	1	1,0	80,84	44,70
V [%]	-	-	n. b.	-
n. b.: nicht berechnet				

Abweichend zeigen sich die Versuchsreihen des T3, die anteilige Wasseraufnahmen  $w_A$  von 46,13 bis 47,95 M.-% ( $w=85,63$  bis  $92,12$  M.-%) nach Trocknung bei 60 °C anzeigen bzw.  $w_A$  42,51 bis 44,70 M.-% ( $w=73,95$  bis  $80,84$  M.-%) nach Trocknung bei 105 °C und sich damit nur geringfügig unterscheiden. Für die Einzelwerte der Zeitstufen s. Abschn. A. 2.

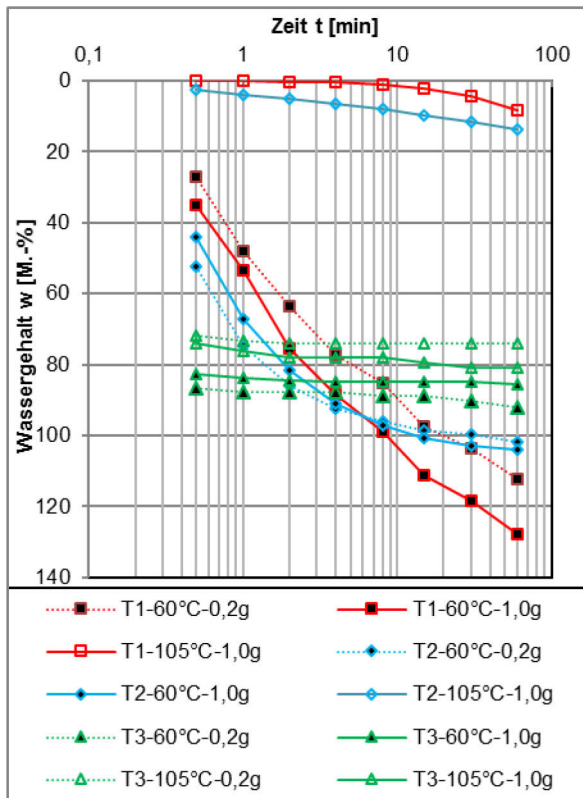


Abb. 6.3: Zeit-Wassergehaltlinien (log t-w-Linien) der Versuchsböden.

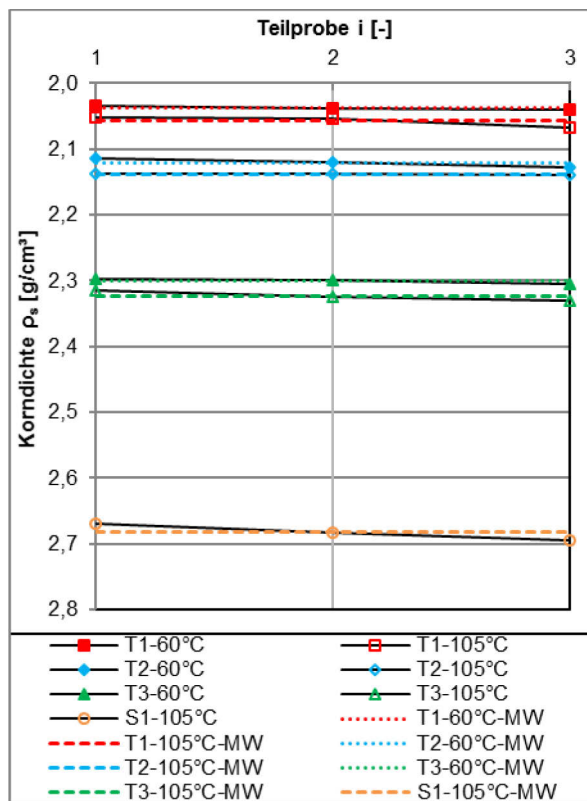
### 6.3.4 Korndichte nach DIN 18124

Die Korndichten  $\rho_s$  der Versuchstorfe wurden nach Trocknung bei 60 und 105 °C im Heliumpyknometer nach DIN 18124:2011 [172] durchgeführt. Die nach 105 °C Trocknungstemperatur bestimmten Korndichten zeigen insgesamt geringfügig höhere Werte (ca. 0,84 bis 1,04 %) als die nach Trocknung bei 60 °C bestimmten Werte. Weiterhin zeigen sich insgesamt Korrelationen der Korndichten zu den bestimmten Wassergehalten der Versuchsböden (vgl. Tab. 6.5 und Abb. 6.4).

Tab. 6.5: Korndichten der Versuchsböden.

Versuchsreihe [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Trocknungstemperatur [°C]	Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-60°C	3	60	2,038
V [%]	-	-	0,12
T1-105°C	3	105	2,057
V [%]	-	-	0,43
T2-60°C	3	60	2,121
V [%]	-	-	0,31
T2-105°C	3	105	2,139
V [%]	-	-	0,06
T3-60°C	3	60	2,300
V [%]	-	-	0,18
T3-105°C	3	105	2,324
V [%]	-	-	0,35
S1-105°C	3	105	2,682
V [%]	-	-	0,47

Die niedrigste Korndichte der Torfe zeigt der T1 mit 2,038 bzw. 2,057 g/cm<sup>3</sup>, gefolgt vom T2 und T3 mit jeweils 2,121 bzw. 2,139 g/cm<sup>3</sup> und 2,300 bzw. 2,324 g/cm<sup>3</sup>. Der S1 zeigt hierzu eine verhältnismäßig hohe und einem fast reinem Schluff entsprechende Korndichte von 2,682 g/cm<sup>3</sup>.

Abb. 6.4: Korndichten  $\rho_s$  der Versuchsböden.

### 6.3.5 Kalkgehalt nach DIN 18129

Die Bestimmung des Kalkgehaltes erfolgte nach DIN 18129:2011 [173] mit gasometrischer Messung nach Scheibler und wurde an den Torfen T1 und T2 nach Trocknung bei 60 bzw. 105 °C durchgeführt. Bei dem Torf T3 und dem Schluff erfolgte die Bestimmung nur nach Trocknung bei 105 °C.

Der T1 zeigt hier mit 42,71 bzw. 34,41 M.-% einen im Vergleich zu den anderen Böden, sehr hohen Kalkgehalt. Weiterhin zeigen die ermittelten Werte der bei 105 °C getrockneten Teilproben die höchsten Variationskoeffizienten ( $V=16,93$  %) der Versuchsreihen (vgl. Tab. 6.6 und Abb. 6.5).

Die Torfe T2 und T3 weisen mit Gehalten von 1,09 bzw. 1,36 M.-% deutlich geringere Kalkanteile aus als der T1. Demgegenüber zeigt der S1 einen höheren Kalkanteil von 5,84 M.-%.

Tab. 6.6: Kalkgehalte der Versuchsböden.

Versuchsreihe [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Trocknungstemperatur [°C]	Kalkgehalt $V_{Ca}$ ( $CaCO_3$ ) [M.-%]
T1-60°C	9	60	42,71
V [%]	-	-	3,16
T1-105°C	9	105	35,41
V [%]	-	-	16,93
T2-60°C	3	60	1,09
V [%]	-	-	13,70
T2-105°C	3	105	1,36
V [%]	-	-	7,47
T3-105°C	3	105	0,82
V [%]	-	-	10,34
S1-105°C	3	105	5,84
V [%]	-	-	3,47

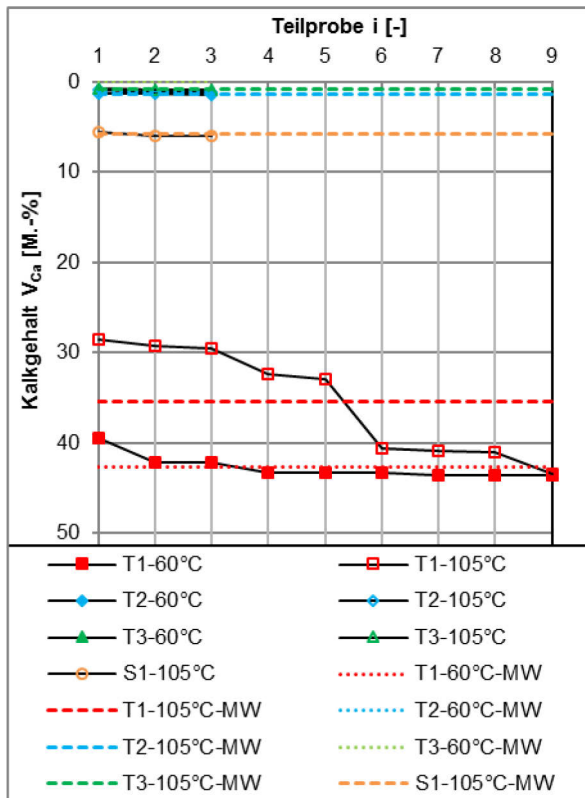


Abb. 6.5: Kalkgehalte  $V_{Ca}$  der Versuchböden.

## 6.3.6 Bestimmung der organischen Anteile

### 6.3.6.1 Glühverlust nach DIN 18128

Die Bestimmung der Glühverluste der Versuchsböden erfolgte nach Trocknung bei 105 °C (T1 zusätzlich bei 60 °C) im Muffelofen nach DIN 18128:2002-12 [122] bei 550 °C durch Glühen bis zur Massekonstanz. Die Tab. 6.7 zeigt eine Zusammenstellung der Glühverluste der Versuchsböden, den Feststoffanteilen auf Grundlage der Wasseranteile nach Abschn. 6.3.2 und den aus den Glühverlusten ermittelten mineralischen und organischen Feststoffanteilen.

Tab. 6.7: Glühverluste  $V_{gl}$  und Feststoffanteile der Versuchsböden.

Versuchsreihe [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Trocknungstemperatur [°C]	Glühverlust $V_{gl}$ [M.-%]	Feststoffanteil <sup>1</sup> [M.-%]	Feststoffanteil mineralisch <sup>1</sup> [M.-%]	Feststoffanteil organisch <sup>1</sup> [M.-%]
T1	8	60	35,54	30,82	19,97	10,95
V [%]	-	-	9,81	-	-	-
T1	8	105	33,63	31,42	20,85	10,57
V [%]	-	-	6,01	-	-	-
T2	8	105	25,74	44,44	33,01	11,43
V [%]	-	-	9,97	-	-	-
T3	8	105	17,46	50,59	41,76	8,83
V [%]	-	-	6,27	-	-	-
S1	4	105	1,87	83,23	81,67	1,56
V [%]	-	-	5,26	-	-	-

<sup>1</sup> Feststoffanteil auf Basis der Wasseranteile (bez. auf die Feuchtmasse), Feststoffanteile mineralisch/organisch unter der Annahme, dass der Glühverlust ausschließlich organische Anteile anzeigt.

Der T1 zeigte hier, korrelierend mit den bestimmten Wasseranteilen, den höchsten mittleren Glühverlust von 33,63 bzw. 35,54 M.-%. Der Glühverlust nach Trocknung bei 60 °C zeigt mit 35,54 M.-% einen um > 5 % (rel. D.) höheren Wert als die bei 105 °C getrockneten Versuchsprouben. Der T2 und der T3 dagegen zeigen mittlere Glühverluste von 25,74 und 17,46 M.-%, die damit um 23,46 und 48,08 % (rel. D.) niedriger ausfallen als die des T1 (bestimmt nach Trocknung bei 105°C).

Basierend auf den Werten der Glühverluste der Versuchsreihen, vorausgesetzt der Annahme, dass diese nur organische Anteile anzeigen, und den mittleren Wasseranteilen der Versuchstorfe, ergeben sich mineralische bzw. organische Feststoffanteile dieser von 19,93 bis 41,76 bzw. 8,83 bis 11,43 M.-% (vgl. die Abb. 6.6) für die untersuchten Torfe T1 bis T3. Der Glühverlust des S1 resultiert vermutlich aus der Auslösung von Kristallwasser.

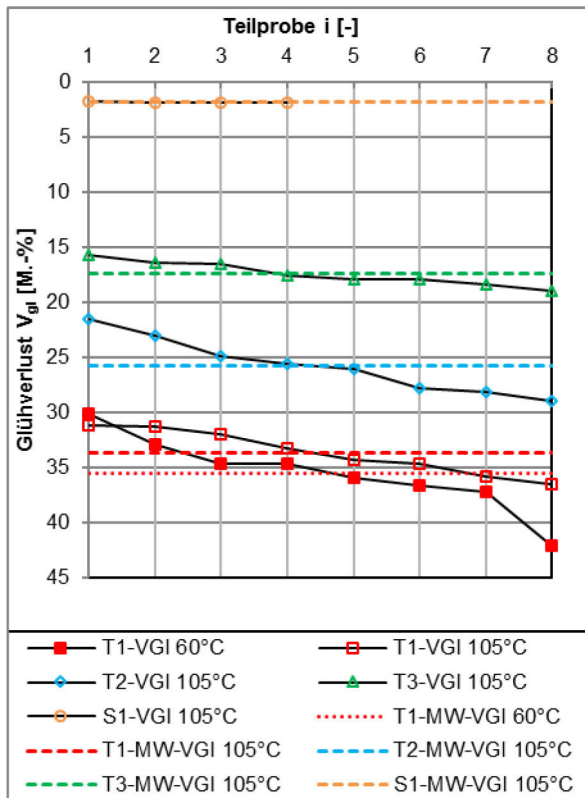


Abb. 6.6: Glühverluste  $V_{gl}$  der Versuchsböden.

### 6.3.6.2 Organischer Kohlenstoff $C_{org}$ nach DIN 19539

Die Tab. 6.8 zeigt eine Zusammenstellung der an den Versuchsböden durchgeführten TOC-Bestimmungen nach DIN 19539:2016 [174] mit der direkte Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung bei 400°C und Gasanalyse (vgl. Abschn. 5.6 und 7.2).

Tab. 6.8: TOC<sub>400</sub> bzw.  $C_{org}$  und Humusgehalte nach DIN 19539:2016 [174].

Ver-suchs-reihe	Anzahl d. Versuche	Trock-nungs-temperatur	TOC <sub>400</sub> bzw. $C_{org}$	Humus (TOC <sub>400</sub> · 1,72)
[Bez.]	[n]	[°C]	[M.-%]	[M.-%]
T1	3	105	24,30	41,80
V [%]	-	-	1,09	1,09
T2	3	105	13,27	22,82
V [%]	-	-	2,30	2,30
T3	3	105	8,31	14,30
V [%]	-	-	0,91	0,91
S1	3	105	<0,10	-
V [%]	-	-	-	-



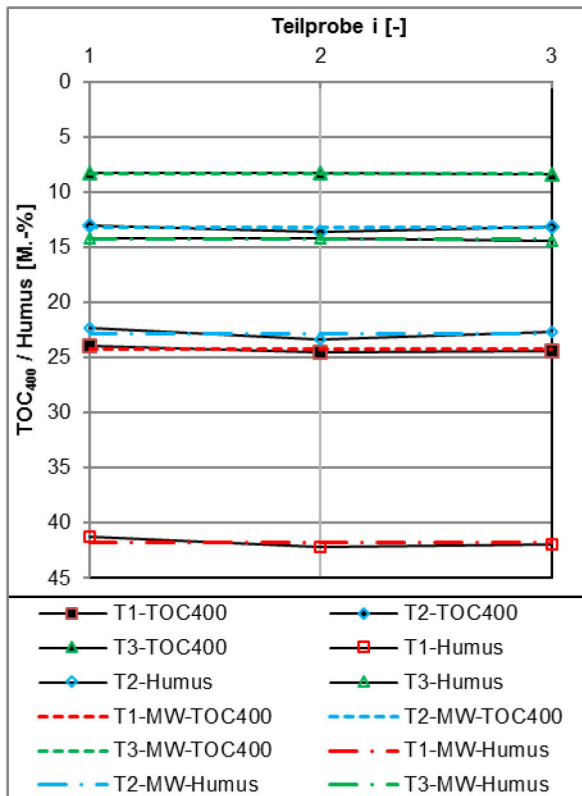


Abb. 6.7: TOC<sub>400</sub> bzw. C<sub>org</sub> / Humusgehalte der Versuchsböden.

Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft führt zum Umrechnungsfaktor 1,72 [-] aus: „Die Anwendung dieses Umrechnungsfaktors (1,72 [-]) für alle Böden unabhängig von Standortfaktoren und Bewirtschaftung ist deshalb nicht korrekt und zudem überflüssig. Die direkte Angabe des C<sub>org</sub>-Gehalts als Maß für den Humusgehalt ist einfacher und eindeutiger.“ [175]

Die ermittelten C<sub>org</sub>- bzw. Humusgehalte stellten sich erwartungsgemäß entsprechend der ermittelten Glühverluste in der Form dar, dass sich die größten Anteile im T1 mit C<sub>org</sub>/Humus von 24,30/41,80 M.-% nachweisen ließen. Vergleichend liegen diese absolut fast doppelt so hoch wie beim T2 bzw. 3-fach so wie beim T3. Die rel. Differenz bez. auf den C<sub>org</sub> des T1 beträgt -45,39 und -65,80 % (T2 bzw. T3).

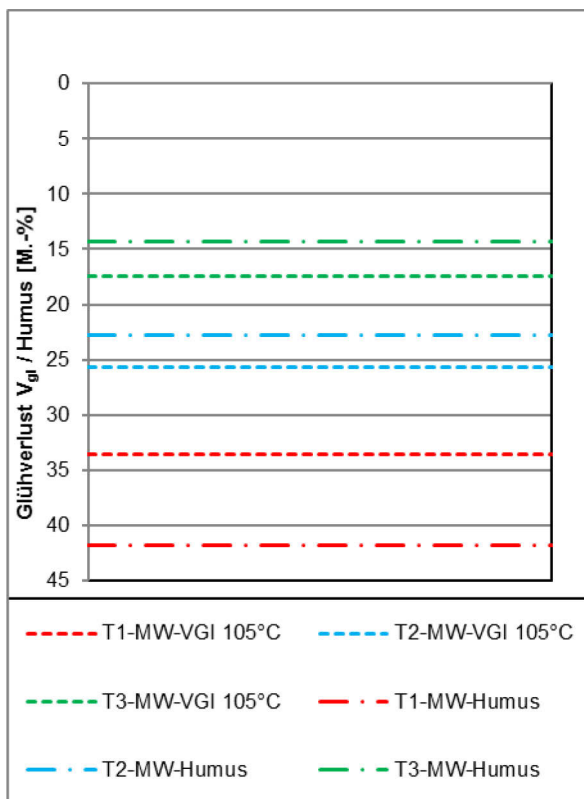
### 6.3.6.3 Vergleich der Untersuchungsergebnisse Glühverlust $V_{gl}$ und Humus

Vergleicht man die Versuche zur Bestimmung des organischen Anteils der Versuchstorfe (s. Tab. 6.7 und Tab. 6.8) ergeben sich vor besonders beim T1 deutliche Abweichungen von -19,54 bis 24,48 % (s. Tab. 6.9).

**Tab. 6.9: Vergleich der Untersuchungsergebnisse Glühverlust  $V_{gl}$  und Humus.**

Versuchsreihe Vergleich [Bez.]	rel. Differenz [%]	abs. Differenz [M.-%]
T1		
$V_{gl(105)}$ bez. auf Humus	-19,54	8,17
Humus bez. auf $V_{gl(105)}$	24,28	8,17
T2		
$V_{gl}$ bez. auf Humus	12,81	2,92
Humus bez. auf $V_{gl}$	-11,35	2,92
T3		
$V_{gl}$ bez. auf Humus	22,10	3,16
Humus bez. auf $V_{gl}$	-18,10	3,16

[176] erklärt die Abweichungen von Humus- zu  $V_{gl}$ -Werten mit der wesentlich geringeren Proben- einwaage (bei Untersuchungen von [176]: 0,2 g) bei TOC-Versuchen im Vergleich zu Versuchen zur Bestimmung des Glühverlustes (hier: > 100 g).



**Abb. 6.8: Glühverluste  $V_{gl}$  und Humusgehalte der Versuchsböden.**

Die Probeneinwaage der oben aufgeführten TOC-Versuche der Versuchsböden betrug etwa 0,1 g. Dadurch bedingt können sich erhebliche Schwankungen in den Ergebnissen ergeben.

Nach [177] ist bei carbonathaltigen Böden, welche zur Bestimmung der organischen Substanzen bei Temperaturen > 650 °C im Sauerstoffstrom oxidiert werden, dass durch Dissoziation von Carbonaten freigesetzte CO<sub>2</sub> abzuziehen. Die Bestimmung des Humusgehaltes wird dann durch Multiplikation mit dem Faktor 2,0 [-] berechnet, wobei auch teilweise der Faktor 1,724 [-] verwendet wird. Nach Auskunft des Labors, welches die Untersuchungen durchgeführt hat, ist davon auszugehen, dass hier nur organischer Kohlenstoff detektiert wurde.

### 6.3.7 Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1

Die Tab. 6.10 zeigt die nach DIN 18122-1:1997 [128] mit dem Fließgrenzengerät nach A. Casagrande bestimmten Fließgrenzen  $w_L$  (liquid limit) der Versuchsböden nach dem Mehrpunktverfahren (s. Abb. 6.9).

Die Durchführung der Versuche erfolgte ausschließlich mit einem Furchendrucker, da die Ausbildung einer ordnungsgemäßen Furche mit einem Furchenzieher aufgrund von faserigen Anteilen in den Versuchstorfen nicht möglich war.

Tab. 6.10: Konsistenzgrenzen der Versuchsböden.

Versuchsboden [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Trocknungstemperatur [°C]	Fließgrenze <sup>1</sup>	Verhältniswert	Wasseranteil/ Feststoffanteil an der Fließgrenze $w_L$	Ausrollgrenze
			$w_{Lnat}/w_{L60}$ $w_{Lnat}/w_{L105}$ [%]	$w_{L60}/w_{Lnat}$ / $w_{L105}/w_{Lnat}$ [-]	[M.-%]	$w_P$ [%]
T1	4	-	232,6	-	69,93/30,07	143,33
T1	4	60	133,0	0,57	57,08/42,92	-
T1	4	105	61,5	0,26	38,08/61,92	-
T2	4	-	127,9	-	56,12/43,88	93,26
T2	4	60	89,7	0,70	47,29/52,71	--
T2	4	105	55,7	0,44	35,77/64,23	-
T3	4	-	112,7	-	52,99/47,01	82,22
T3	4	60	62,4	0,55	38,42/61,58	-
T3	4	105	52,2	0,46	34,30/65,70	-
S1	4	-	21,60	-	17,76/82,24	18,62
S1	4	60	21,57	1,00	17,76/82,24	-
S1	4	105	20,4	0,94	16,94/83,06	-

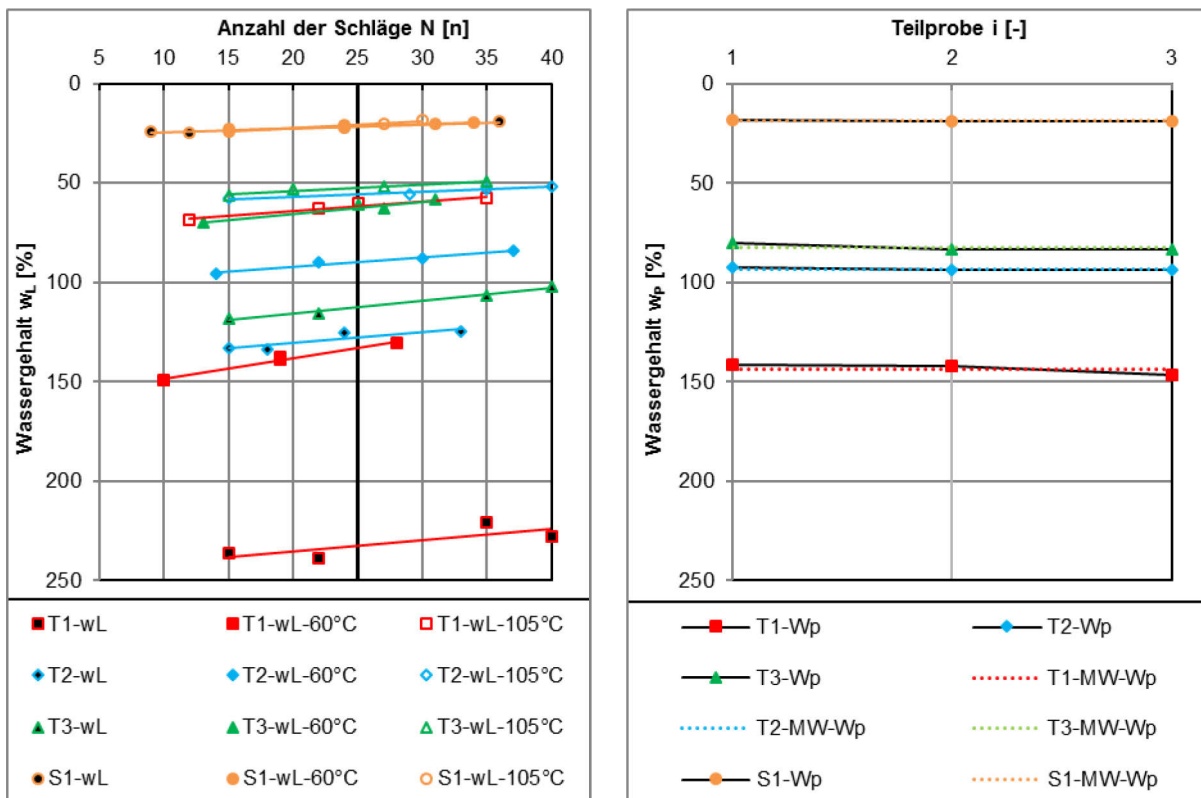
<sup>1</sup> mit der Wertung der Schlagzahl  $N < 15$  Schläge (entgegen der DIN 18122-1:1997 [128]) (vgl. Abb. 6.9)

Ergänzend zu den Fließgrenzenbestimmungen nach DIN 18122-1:1997 [128] wurden Bestimmungen der Fließgrenzen nach Trocknung bei 60 und 105 C° ( $w_{L60}$  und  $w_{L105}$ ) durchgeführt (s. Tab. 6.10, vgl. hierzu Untersuchungen von [176]).

Die Bestimmung der Ausrollgrenzen  $w_P$  (plastic limit) der Versuchsböden erfolgte einzig ohne vorherige Trocknungsbehandlung. Diese stellte sich schon ohne Trocknungsbehandlung sehr

schwierig dar, weil eine Herstellung der nach Norm geforderten 3 mm dicken Walzen ohne ein Zerbrechen/Zerbröckeln vor der geforderten Dicke nur selten gelang. Vorversuche zeigten, dass eine Bestimmung der Ausrollgrenze nach Trocknungsbehandlung nicht mehr möglich war, da die Proben schon deutlich schneller anfangen zu bröckeln als die nicht behandelten. Vgl. hierzu [178], der mit seinen Untersuchungen die Anwendbarkeit der Ausrollgrenze  $w_P$ , insbesondere für schwach zersetzte Torfe, anzweifelt. [120] geben für organische Böden eine Fließgrenze  $w_L > 200\%$ , eine Ausrollgrenze  $w_P > 100\%$  und damit eine Plastizitätszahl  $I_P$  von etwa 100 % an.

Die Versuchstorfe sind nach ihren Fließgrenzen  $w_{Lnat}$  von 112,7 bis 232,6 % nach DIN 14688-2:2018 [121] als ausgeprägt plastisch (H) (s. Tab. 6.11) zu beschreiben und mit Plastizitätszahlen  $I_P$  von 30,44 bis 89,26 % unter der verlängerten A-Linie im Plastizitätsdiagramm (vgl. Abschn. 7.2.4 ) einzuordnen.



**Abb. 6.9:** l.: Fließgrenzenversuche an den getrockneten (60/105°C) und den nicht getrockneten Versuchsböden, r.: Ausrollgrenzenversuche der Versuchsböden.

Der S1 ist demgegenüber als leicht plastisch (L) ( $w_L=21,6\%$ ) zu klassifizieren und mit einer Plastizitätszahl von 2,95 % unter der A-Linie als UL einzuordnen.

**Tab. 6.11: Plastizitätsbereiche nach DIN 14688-2:2018 [118].**

Wassergehalt an der Fließgrenze $w_L$ [%]	Plastizität [Bez.]
< 35	leicht (L)
35 bis 70	mittel (M)
> 70	ausgeprägt (H)

**Tab. 6.12: Plastizitäts-, Konsistenzahlen und Zustandsformen der unbehandelten Versuchsböden**

Versuchsboden [Bez.]	Plastizitätszahl $I_p$ [%]	Konsistenzahl $I_c$ [-]	Zustandsform [Bez.]
T1	89,26	0,16	breiig
T2	34,64	0,08	breiig
T3	30,44	0,49	sehr weich
S1	2,95	0,48	sehr weich

Vergleicht man die nach Trocknung durchgeführten Fließgrenzen  $w_{L60}$  bzw.  $w_{L105}$  mit den Werten der Fließgrenzen, die an nicht behandelten Proben gewonnen wurden, ergeben sich enorme Spannen zwischen den Wassergehalten  $w$ .

Der T1 zeigt nach Trocknung bei 60 ° eine auffallend geminderte Fließgrenze  $w_{L60}$  von nur 133,0 % und nach Trocknung bei 105 °C eine Fließgrenze von nur noch 61,5 %. Damit hat sich hier der Wasseranteil  $w_A$  um in die fließende Form überzugehen von knapp 70,0 % um etwa die Hälfte (Wasseranteil  $w_A$   $w_{L105} = 38,0$  %) reduziert. Die Versuchstorfe T2 und T3 zeigen ein ähnliches Verhalten mit deutlich geminderten Fließgrenzen  $w_{L60}/w_{L105}$  von 89,7/55,7 % und 62,4/52,2 % nach Trocknung (vgl. [179], [180]).

Nach dem Flussdiagramm der Schweizer Norm SN 670 004-2b-NA: [132] bzw. USCS (vgl. Abschn. 5.4) sind die Versuchstorfe mit  $w_L > 50$  % bzw.  $w_{L105}/w_{L1nat} \ll 0,75$  als OH-Böden zu klassifizieren. Der S1 dagegen zeigt sehr geringe Empfindlichkeiten gegenüber der Trocknungsbehandlung mit fast gleichbleibenden Wassergehalten an der Fließgrenze von  $w_{L60}/w_{L105} = 21,57/20,4$  % (die Schwankungen können hier mit versuchstechnischen Abweichungen begründet werden).

### 6.3.8 Proctorversuche nach DIN 18127

Die Abb. 6.10 zeigt die an den Versuchstorfen T1 und T2 durchgeführten Proctorversuche nach DIN 18127:2012 [181]. Die Böden zeigten bei Wassergehalten von etwa 10 bis 20 M.-% die höchsten Trockendichten  $\rho_d$  im Bereich von ca. 0,90 g/cm<sup>3</sup>. Anzumerken ist hier, dass die Proctorversuche aufgrund der Zerstörung des Bodengefüges durch Trocknung (vgl. Fließgrenzen-

und Wasseraufnahmeversuche, der Boden wurde hier bei 60°C getrocknet) als nicht repräsentativ anzusehen ist. Die ursprünglichen Merkmale bzw. die Zusammensetzung eines Bodens werden durch die Probenaufbereitung weitestgehend zerstört, was dann mit veränderten bodenmechanischen Eigenschaften einhergeht. Vgl. auch mit [182], die an Böden mit organischen Bestandteilen im Gegensatz zu mineralischen Böden kein ausgeprägtes Proctor-Optimum feststellen konnten. Weiter besteht nicht nur ein Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsvermögen und dem organischen Anteil eines Bodens – nach [183] ist dieses auch von der Entstehungsgeschichte der organischen Anteile abhängig und damit nicht direkt übertragbar.

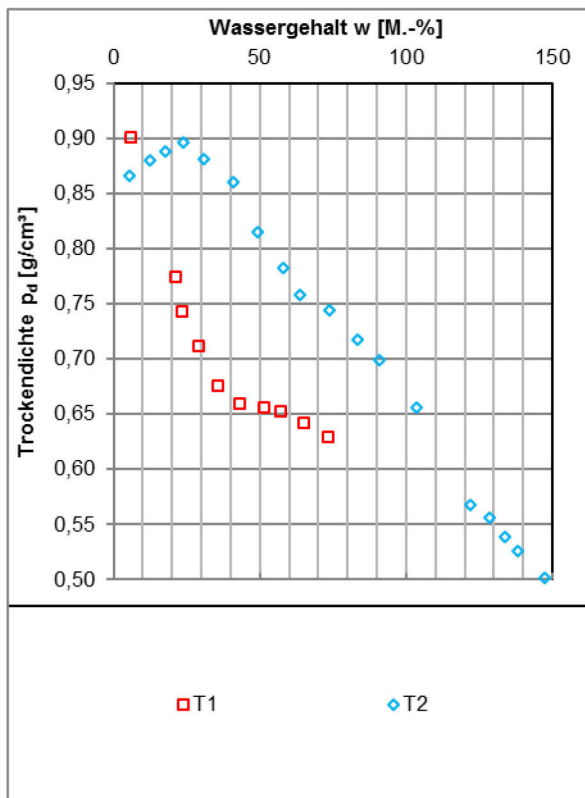


Abb. 6.10: Ergebnisse der Proctorversuche an den Versuchsböden T1 und T2.

### 6.3.9 Bestimmung des Sulfatgehaltes DIN EN ISO 10304

Der Sulfatgehalt des Versuchstorfes T1 wurde aufgrund der Quellhebungen, die sich nach der Behandlung mit Mischbindemitteln bzw. Branntkalk zeigten, auf seinen Sulfatgehalt hin untersucht. Die Untersuchungen wurden nach DIN EN ISO 10304:2009 [184] mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie durchgeführt und ergaben einen Sulfatgehalt von 1,49 M.-%.

Tab. 6.13: Sulfatgehalt Versuchstorf T1

Versuchs- boden	Anzahl d. Versuche	Sulfat- gehalt [SO <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>
[Bez.]	[n]	[M.-%]
T1	3	1,49
V [%]	-	11,02

### 6.3.10 In situ Bodenkenngrößen

Zusätzlich zu dem Probenmaterial aus den Schurfgruben wurde jeweils ein Stechzylinder, der aus dem ungestörten Boden entnommen wurde, untersucht. Diese Proben dienen der Bestimmung der originären in situ Bodenkenngrößen der Versuchsböden (Feucht- und Trockendichte und Wassergehalt).

Die Versuchstorfe zeigten sehr geringe Feucht- bzw. Trockendichten von 1,24 bis 1,44 g/cm<sup>3</sup> bzw. 0,38 bis 0,73 g/cm<sup>3</sup> mit natürlichen Wassergehalten, die den mittleren bestimmten Wassergehalten der homogenisierten Proben entsprechen. Die ebenfalls am homogenisierten Probenmaterial bestimmten Korndichten liegen im Bereich von 2,057 bis 2,682 g/cm<sup>3</sup> womit sich folglich sehr hohe in situ Porenzahlen  $e$  bzw. Porenräume  $n$  von 4,35 bis 2,19 [-] bzw. 0,81 bis 0,69 [-] ergeben.

Die bestimmten Sättigungszahlen  $S_r$  der Versuchstorfe liegen mit 1,05 bis 1,04 [-] deutlich über 1,0, womit Zweiphasengemische vorliegen. Der Versuchsschluff S1 hingegen zeigt entsprechend deutlich abweichende Werte mit einer bspw. niedrigeren Porenzahl von 0,61 [-].

Tab. 6.14: in situ Bodenkenngrößen der Versuchsböden

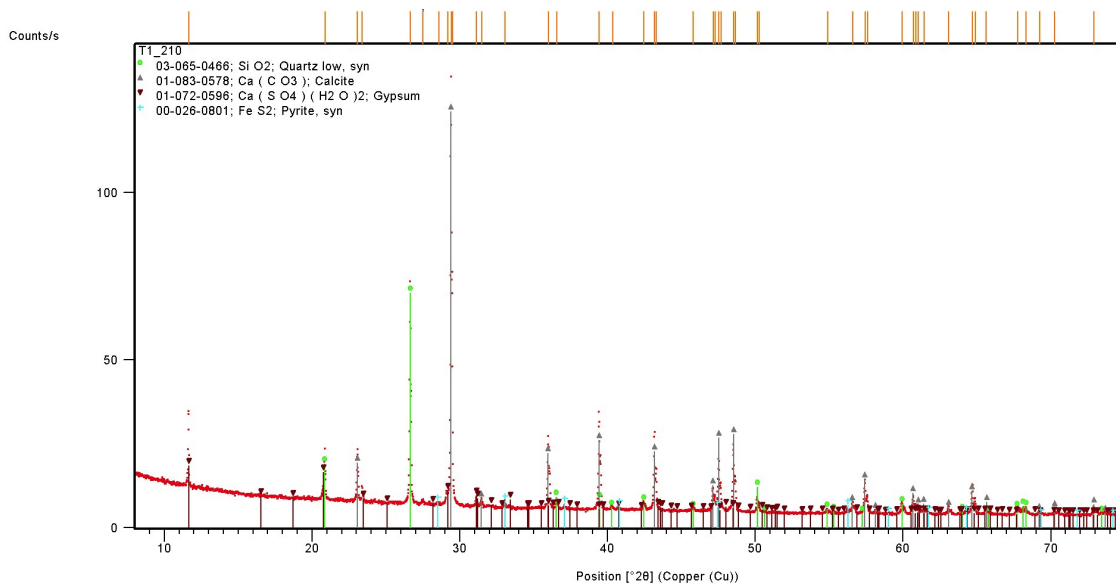
Ver- suchs- boden	Feucht- dichte	Trocken- dichte	Wasser- gehalt $w$	Wasser- anteil $w_A$	Korn- dichte $\rho_s$	Poren- zahl $e$	Poren- raum $n$	Sätti- gungs- zahl $S_r$
[Bez.]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]	[-]	[-]
T1	1,24	0,38	222,14	68,96	2,057	4,35	0,81	1,05
T2	1,38	0,62	123,24	55,21	2,139	2,47	0,71	1,07
T3	1,44	0,73	97,88	49,46	2,324	2,19	0,69	1,04
S1	2,02	1,67	20,87	17,27	2,682	0,61	0,38	0,92

### 6.3.11 Röntgenanalytik

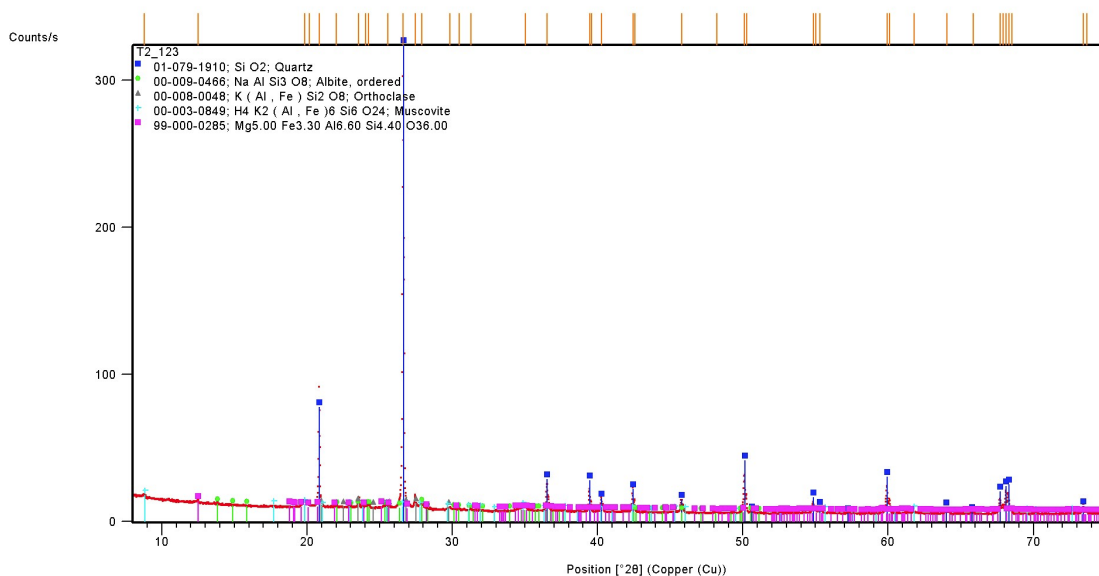
#### 6.3.11.1 Röntgenbeugungsanalyse (RBA)

Daneben wurden die Versuchsböden einer Röntgenbeugungsanalyse (RBA) (auch: Röntgendiffraktometrie, engl.: X-ray diffraction (XRD)) unterzogen. Diese stellt nach [185] eine grundlegende Methode zur mineralogischen Bestimmung von Sedimenten dar. Das Prinzip dieser Analyse beruht auf der Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlung mit Kristallgittern. Die Röntgenstrahlung

wird unter einer bestimmten Geometrie auf die Probe gestrahlt, welche diese wiederum unter einem bestimmten Winkel an ihren Gitterebenen reflektiert bzw. beugt. Die Reflexions- oder Beugungswinkel, die sog.  $2\theta$ -Winkel, sind charakteristisch für einen Kristall und geben zudem die Abstände der Gitterebenen wieder (vgl. [186], [187]). Die Intensitäten der Beugungspeaks sind weiter proportional zu den Phasengehalten, die mit Fitverfahren quantifiziert werden können [188]. Neben dem dominierenden Mineralanteil, Quarz, wurden an den verschiedenen Proben u. a. Calcit, Albit, Gips, Orthoklas und Dolomit nachgewiesen (s. Abb. 6.11 bis Abb. 6.14). Eine genauere Zusammensetzung der Versuchsböden zeigen die Ergebnisse der quantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse.



**Abb. 6.11:** Diffraktogramm Versuchstorf T1.



**Abb. 6.12:** Diffraktogramm Versuchstorf T2.



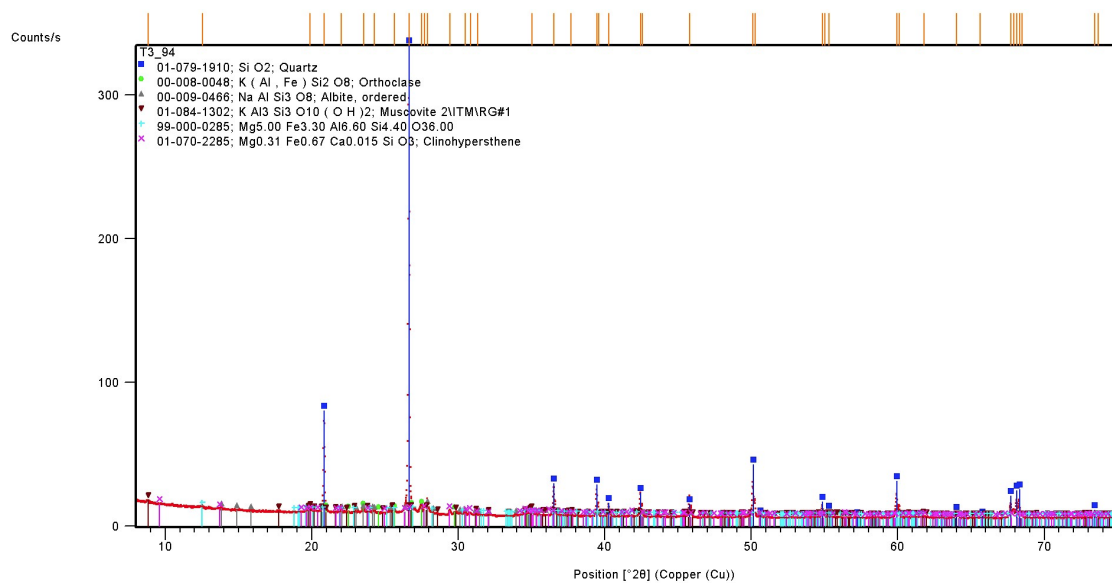


Abb. 6.13: Diffraktogramm Versuchstorf T3.

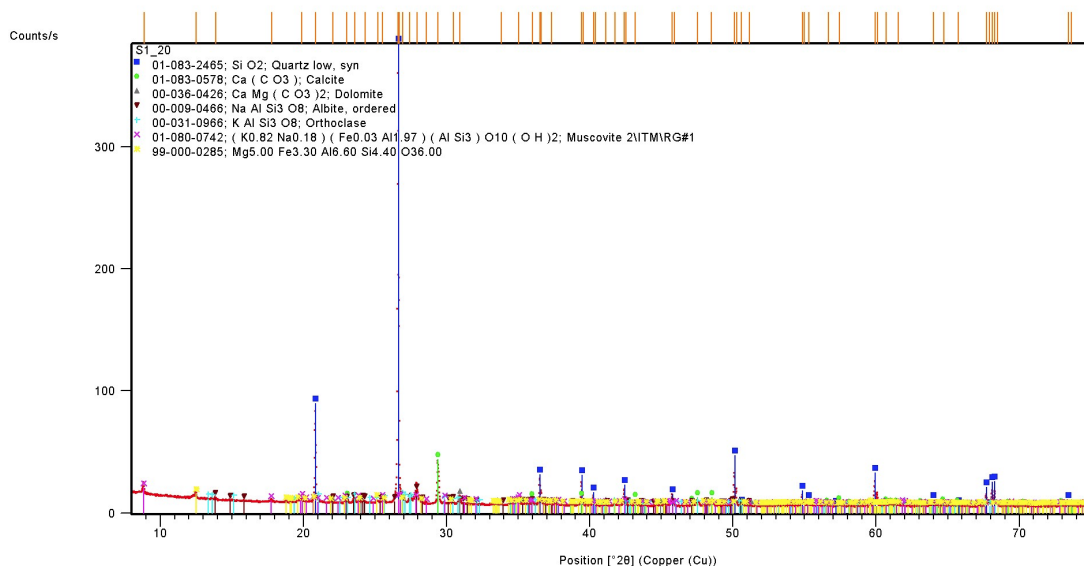


Abb. 6.14: Diffraktogramm Versuchsboden S1.

### 6.3.11.2 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Zur quantitativen Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Versuchsböden wurde jeweils eine Probe der Versuchsböden entsprechend der RFA einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) (engl.: X-ray fluorescence spectroscopy (XRF spectroscopy)) unterzogen. Die untersuchten Proben wurden im Schmelzaufschlussverfahren nach DIN EN ISO 12677:2013-02 [189] hergestellt.

Bei der RFA wird die zu analysierende Probe mit primärer Röntgenstrahlung der Röntgenquelle bestrahlt, wodurch von dieser sekundäre Röntgenstrahlung (Fluoreszenzröntgenstrahlung) ausgeht, welche in den einzelnen Komponenten charakteristisch für die chemische Zusammensetzung dieser ist ([190], [191]).

Zusätzlich wurden der Wasseranteil bzw. der Trockenrückstand (Feststoffanteil) nach DIN 14346:2007-03 [192] und der Glühverlust nach Glühen bei 900 °C nach DIN 51081:2002-12 [193] bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 6.15 dargestellt.

Wie die **ergänzten Mittelwerte** der eigens durchgeführten Versuche aufzeigen korrespondieren diese mit denen durch das Umweltlabor festgestellten Wasser- bzw. Feststoffanteilen.

**Tab. 6.15: Zusammenstellung der RFA-Ergebnisse.**

Parameter		T1	T2	T3	S1	Norm
Wasseranteil (105°)	[M.-%]	66,60	55,60	49,20	17,30	DIN EN 14346
Wasseranteil Mittel (105°C)	[M.-%]	68,58	55,59	49,41	16,77	
Wassergehalt (105°C)	[M.-%]	199,40	125,23	96,85	20,89	DIN EN 14346
Wassergehalt Mittel (105°C)	[M.-%]	218,30	125,15	97,68	20,15	
Feststoffanteil (105°C)	[M.-%]	33,40	44,40	50,80	82,80	DIN EN 14346
Feststoffanteil Mittel (105°C)	[M.-%]	31,42	44,41	50,59	83,23	
Glühverlust Mittel (550°C)	[M.-%]	33,63	25,74	17,46	1,87	
Glühverlust (900°C)	[M.-%]	52,00	23,50	19,90	8,31	DIN 51081
Aluminiumoxid	[M.-%]	1,67	9,94	9,67	8,79	DIN EN ISO 12677
Calciumoxid	[M.-%]	55,90	2,19	2,23	8,17	DIN EN ISO 12677
Calciumcarbonat V <sub>Ca</sub> (60°C)	[M.-%]	42,71	-	-	-	
Calciumcarbonat V <sub>Ca</sub> (105°C)	[M.-%]	35,41	1,09	1,36	5,84	
Chrom(III)-oxid	[M.-%]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	DIN EN ISO 12677
Eisen(III)-oxid	[M.-%]	3,77	2,66	3,27	3,40	DIN EN ISO 12677
Kaliumoxid	[M.-%]	0,34	2,19	2,30	2,05	DIN EN ISO 12677
Magnesiumoxid	[M.-%]	0,76	0,73	0,77	1,46	DIN EN ISO 12677
Mangan(III)-oxid	[M.-%]	0,12	0,03	0,03	0,07	DIN EN ISO 12677
Natriumoxid	[M.-%]	0,11	0,75	0,99	1,01	DIN EN ISO 12677
Phosphor(V)-oxid	[M.-%]	0,47	0,15	0,15	0,11	DIN EN ISO 12677
Schwefel(VI)-oxid	[M.-%]	5,67	0,09	0,06	<0,05	DIN EN ISO 12677
Silicium(IV)-oxid	[M.-%]	30,80	80,20	79,40	73,80	DIN EN ISO 12677
Titan(IV)-oxid	[M.-%]	0,13	0,75	0,78	0,76	DIN EN ISO 12677
Zirkonium(IV)-oxid	[M.-%]	0,06	0,09	0,10	0,11	DIN EN ISO 12677
Summe	[M.-%]	99,80	99,80	99,80	99,80	-
selbst ermittelte Versuchsergebnisse nach Abschn. 6.3.2, 6.3.5, 6.3.6.1						

## 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen an den Versuchsböden – Klassifizierung der Versuchstorfe

Insgesamt unterscheiden sich die Versuchstorfe hinsichtlich ihrer Klassifizierung nicht sehr deutlich. Nach DIN EN ISO 14688-1:2018 [92] sind die Versuchstorfe T1 bis 3 infolge Ausquetschversuch als nicht faserige, breiige Torfe zu beschreiben und damit als amorphe Torfe zu benennen. Nach DIN 18196:2011 [126] sind die schwellbaren Versuchstorfe T1 bis 3 mit ihrer schwarzbraunen Farbgebung als zersetzte Torfe (Hauptgruppe: organische Böden, Gruppe: zersetzte Torfe (HZ)) zu klassifizieren.

Entsprechend der DIN 19682-12:2007 [135] wurden die Torfe als sehr stark zersetzt (bzw. es sind keine Pflanzenstrukturen mehr erkennbar) mit Zersetzungsgrad H 9 bis 10 (Zersetzungsstufe: z5) angesprochen.

Da die Versuchstorfe T1 bis 3 eine Fließgrenze  $w_L > 50\%$  und einen Fließgrenzenverhältniswert  $w_{L105}/w_{Lnat} < 0,75$  [-] aufzeigen sind diese nach Schweizer Norm SN 670004-2b-NA:2008 [132] als organisch mit hoher Plastizität (Gruppensymbol OH) einzuordnen und mit einer Plastizitätszahl  $I_p$  von  $>4$  M.-%,  $\geq 30$  M.-%  $>0,063$  mm, Sandanteil  $\geq$  Kiesanteil in [M.-%] und  $<15$  M.-% Kies als sandiger organischer Ton zu benennen.

Weiter nennt die 670004-2b-NA:2008 [132] „Torf (Pt)“, der jedoch nicht in das Flussdiagramm für feinkörnige, organische Böden nach Schweizer Norm SN 670004-2b-NA:2008 [132] eingebunden ist. Vermutlich ist dies damit zu begründen, dass nach der ASTM D4427:2018 [151] ein Torf erst ab einem Glühverlust von  $>75$  M.-% vorliegt.

Auf Grundlage der DIN EN ISO 14688-2:2018 [118] sind die Versuchstorfe 1 und 2 mit einem organischen Anteil (Annahme: Bestimmung des organischen Anteils mit dem Glühverlust  $V_{gl}$  nach DIN 18128:2002 [122])  $V_{gl}=33,63$  bzw.  $25,74$  M.-% als „stark organisch“ und der Torf 3 ( $V_{gl}=17,46$  M.-%) als „mittel organisch“ zu bezeichnen. Weiter sind die Versuchstorfe mit Fließgrenzen  $w_L > 50$  [%] als ausgeprägt plastisch (A) zu beschreiben mit breiigen (T1 und 2) bzw. einer sehr weichen Zustandsform (T3).

Hinsichtlich der organischen Kohlenstoffanteile sind die Torfe T2 und 3 mit  $C_{org}$ -Werten von  $13,27$  und  $8,27$  M.-% ( $\cong 22,9$  bzw.  $14,3$  M.-% (Faktor:  $1,724$  [-]) organische Substanz) nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung [93] als sehr stark humos bzw. extrem humos (Stufe h5 bzw. h6 von 7 Humositäts-Stufen) einzustufen. Der Torf 1 hingegen ist mit seinem  $C_{org}$ -Gehalt von  $24,30$  M.-% ( $\cong 48,6$  M.-% (Faktor:  $2,0$  [-]) organische Substanz) nach [93] als Torf (organisch, h7) zu bezeichnen. Setzt man den ermittelten Glühverlust  $V_{gl}$  mit der organischen Substanz nach [93] ( $C_{org} \cdot$  Faktor ( $1,724$  bzw.  $2,0$  [-]) gleich sind die Torfe T2 und 3 als extrem humos (h6) und der Torf 1 wie vorangegangen als Torf (h7) einzustufen (vgl. hierzu weiter „Untersuchungen zum organischen Anteil“ unter Abschn. 7.2).

In Bezug auf die Klassifizierungen nach ASTM (ASTM D 4427:2018 [151]) liegen mit den Versuchsböden T1 bis 3 keine Torfe vor, da sich diese nach [151] durch einen Glühverlust von >75 M.-% auszeichnen. Die Versuchsböden sind nach ASTM D 4427:2018 [151] als „sonstige organische Böden“ („other organic soils“) einzustufen. Vergleicht man die Glühverluste der Versuchstorfe mit den weiteren Klassifizierungen unter Abschn. 5.8 sind die Versuchstorfe als mineralische Böden aber auch als organische Böden bzw. „Nicht-Torf“ (non-peat) zu klassifizieren.

## 7 Stand der Wissenschaft zur Klassifikation und zum Stoffverhalten von Mehrphasengemischen mit organischen Anteilen

### 7.1 Torflagerstätten

Die globalen Vorkommen von Torflagestätten zeigt die Tab. 7.1. mit der flächenmäßigen Ausdehnung von Mooren (vereinzelt mit dem jeweiligen Anteil an der Landesfläche). Die Länder Kanada bzw. die ehemalige UdSSR weisen hier mit Moorflächen von jeweils 1,5 Mio. km<sup>2</sup>, gefolgt von den USA mit 0,6 Mio. km<sup>2</sup>, die größten flächenmäßigen Torfvorkommen aus (vgl. auch [194]).

Tab. 7.1: Vorkommen von Torf (nach [195] nach [2], [196], [197], [198], [199], [200]).

Land	Moorfläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil der Landesfläche [%]
Canada	1.500.000	18
ehem. UdSSR	1.500.000	
USA	600.000	10
Indonesien	170.000	14
Finnland	100.000	34
Schweden	70.000	20
China	42.000	
Norwegen	30.000	10
Malaysia	25.000	
Deutschland	16.000	
Brasilien	15.000	
Irland	14.000	17
Uganda	14.000	
Polen	13.000	
Falklandinseln	12.000	
Chile	11.000	
Sambia	11.000	
26 übrige Länder	220 bis 10.000	
Schottland		10
15 übrige Länder		1 bis 9

Die Tab. 7.2 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener physikalischer Größen (natürlicher Wassergehalt, Feuchtdichte, Korndichte und Organikgehalt) von Torfen aus unterschiedlichen weltweiten Torflagerstätten und verdeutlicht die hohe, u. a. klimatisch bedingte Spannweite der bodenmechanischen Parameter.

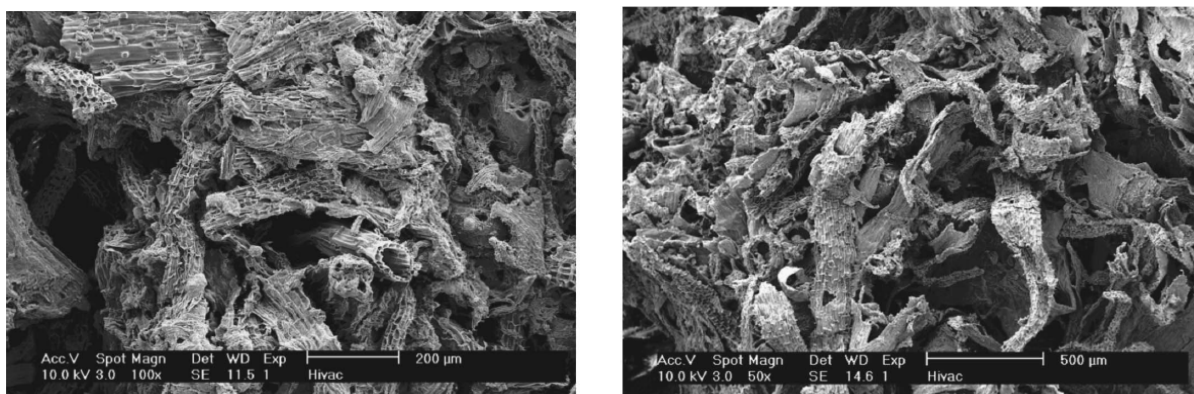
**Tab. 7.2: Physikalische Eigenschaften von Torfen (aus [201] aus [202]).**

Soil deposits	Natural water content ( $\omega_0$ , %)	Unit weight, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Specific gravity ( $G_s$ )	Organic content (%)
Fibrous peat, Quebec	370-450	8.7-10.4	-	-
Fibrous peat Antoniny, Poland	310-450	10.5-11.1	-	65-85
Fibrous peat, Co. Offaly Ireland	865-1400	10.2-11.3	-	98-99
Amorphous peat, Cork, Ireland	450	10.2	-	80
Cranberry bog peat, Massachusetts	759-946	10.1-10.4	-	60-77
Austria	200-800	9.8-13.0	-	-
Japan	334-1320	-	-	20-98
Italy	200-300	10.2-14.3	-	70-80
USA	178-600	-	-	-
Canada	223-1040	-	-	17-80
Hokkaido	115-1150	9.5-11.2	-	20-98
West Malaysia	200-700	8.3-11.5	1.38-1.70	65-97
East Malaysia	200-2207	8.0-12.0	-	76-98
Central Kalimantan	467-1224	8.0-14.0	1.50-1.77	41-99

## 7.2 Klassifikationsmerkmale organischer Böden

Nach [203] sollten bei der Beschreibung von Torf die Farbe, der Grad der Zersetzung, der Wassergehalt und der Gehalt an organischen Bestandteilen genannt werden.

Ändert sich ein Bestandteil der Hauptkomponenten von Torf (Wasser, organische Bestandteile, mineralische Bestandteile, Luft) äußert sich dies in Änderungen der gesamten physikalischen Eigenschaften von Torf. Weiter ist Torf anisotrop aufgebaut (vgl. Abb. 7.1), was zu verschiedenen Eigenschaften in vertikaler und horizontaler Richtung führt und damit in besonderem Maße das Konsolidationsverhalten bzw. Kompressionsverhalten beeinflusst (vgl. [204], [205], [206], [207]).

**Abb. 7.1: REM-Aufnahmen James Bay Peat, l.: vertikaler Schnitt, r.: horizontaler Schnitt (aus [195]).**

Diese Variationen sind u. a. mit Unterschieden der klimatischen Verhältnisse, Wasserstandsschwankungen und dem Alter des Torfkörpers zu erklären und resultieren in weiten Spannen der Farbgebung, Struktur, in situ Dichte, Kornreindichte und dem Wassergehalt. Der Grad der Zersetzung von Torf beeinflusst die Porosität, die wiederum von der Korngröße und Struktur der organischen Bestandteile abhängig ist. Ein zunehmender Zersetzungsgrad führt damit zu einer

Verkleinerung der organischen Partikel. Im Vergleich zu Ton ist die Struktur von Torf als grob zu benennen (vgl. [201]).

Die meisten Torfablagerungen zeigen nach [208] sehr geringe biochemische Zersetzungsraten aufgrund des sauren Porenwassers, der anaeroben Verhältnisse und der vergleichsweise geringen herrschenden Temperaturen.

Einer der wichtigsten und sehr stark schwankenden bodenmechanischen Kenngrößen von Torf ist der Wassergehalt, der in Abhängigkeit von dem Zersetzungsgrad (vgl. Abb. 7.2 r.) bzw. von der chemischen Zusammensetzung steht. Der Wassergehalt von Torf ist bedingt durch die enorme Wasserhaltekapazität der enthaltenen groben, losen und porösen Fasern, in natürlichem Zustand sehr hoch. Der Wassergehalt von Torf kann im Bereich von 200 bis 2000 % [195], nach [209] bis 3000 % schwanken.

Die natürliche Feuchtdichte  $p_f$  von Torf ist verglichen mit rein mineralischen Böden sehr gering, korreliert fast linear zur Trockendichte  $p_d$  (vgl. [210]), was auch in Verbindung zu den geringeren Kornreindichten steht, und nimmt mit steigendem Wassergehalt stark ab. Entsprechend zeigen schwach zersetzte Torfe wesentlich geringere Feuchtdichten als stark zersetzte. [208] nennt für Torfe natürliche Dichten  $p_f$  von 0,4 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup> und Trockendichten  $p_d$  von 0,08 bis 0,32 g/cm<sup>3</sup> (s. Abb. 7.3 l., vgl. auch [183]). [195] gibt für schwach zersetzten Torf (fibrous peat) Kornreindichten von 1,4 bis 1.6 g/cm<sup>3</sup> mit 1,5 g/cm<sup>3</sup> als typischen Wert (vgl. Abb. 7.2 l.), korrespondierend zu Glühverlusten von >90 %.(vgl. Abb. 7.3 r.).

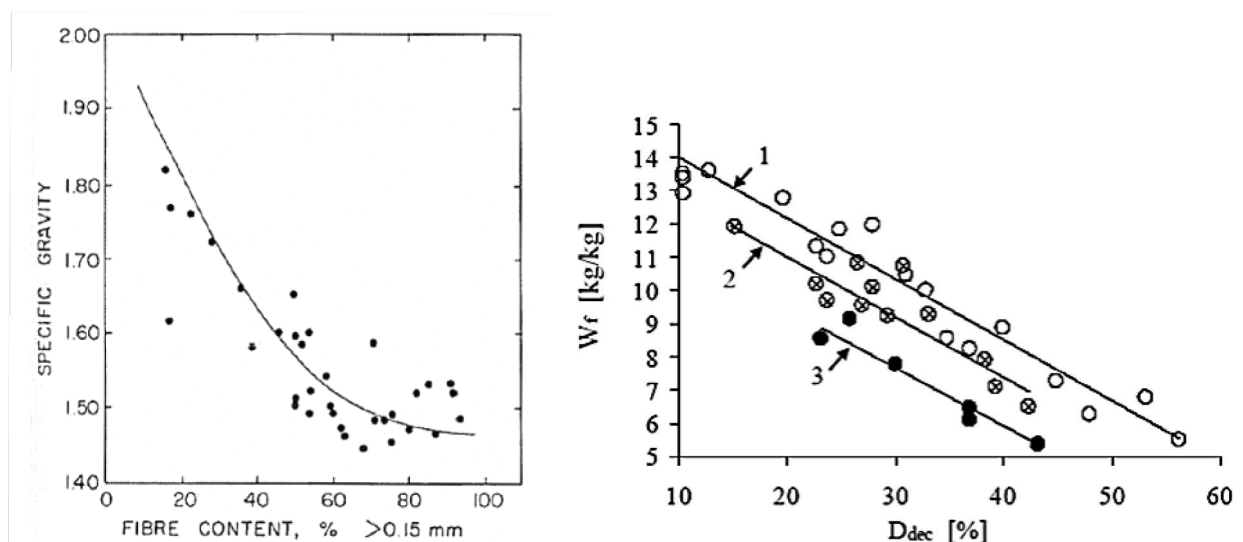


Abb. 7.2: l.: Abhängigkeit von Fasergehalt und Kornreindichte (aus [211] aus [176]), r.: Abhängigkeit von Zersetzungsgrad und Wassergehalt (aus [212] aus [176]).

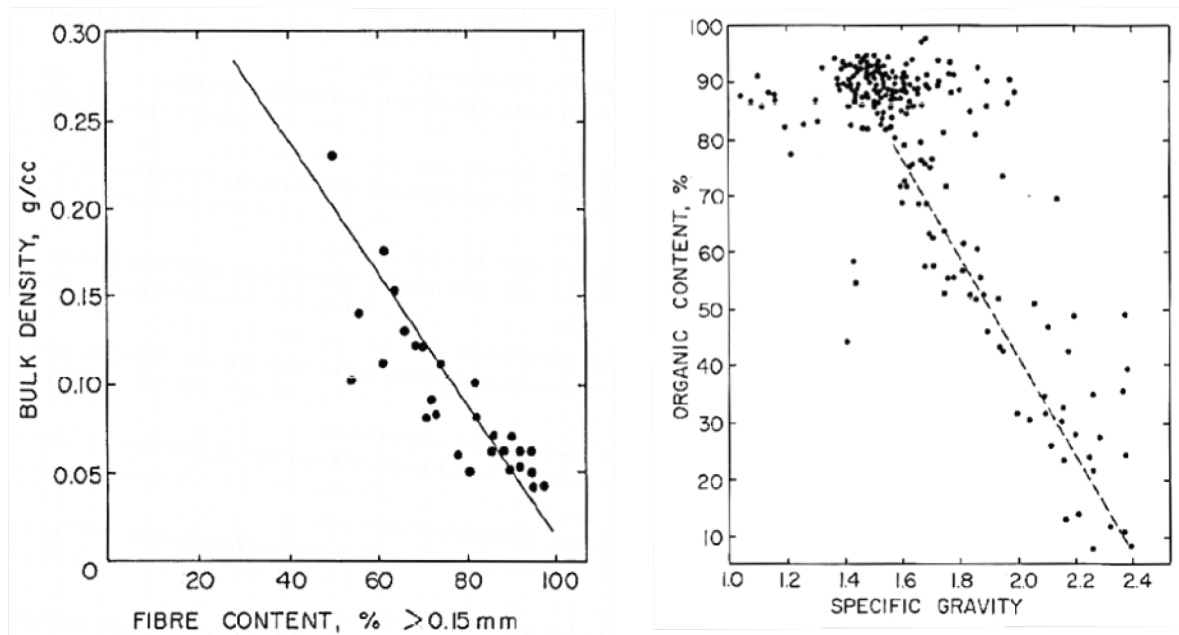


Abb. 7.3: I.: Zusammenhang Fasergehalt und Trockendichte, r.: Zusammenhang Kornreindichte und organischer Anteil (aus [176] (aus [211])).

[213] zeigen die Zusammenhänge zwischen organischem Kohlenstoff  $C_{org}$  bzw. Zersetzungsgrad nach von Post (vgl. [136] und [137]) und Trockenrohddichte an anmoorige Substraten (Aa) mit weniger als 30 M.-% organischer Bodensubstanz (s. Abb. 7.5 und Abb. 7.6). Erkennbar nimmt die Trockenrohddichte  $\rho_d$  mit zunehmendem  $C_{org}$  ab bzw. mit zunehmendem Zersetzungsgrad (H) zu.

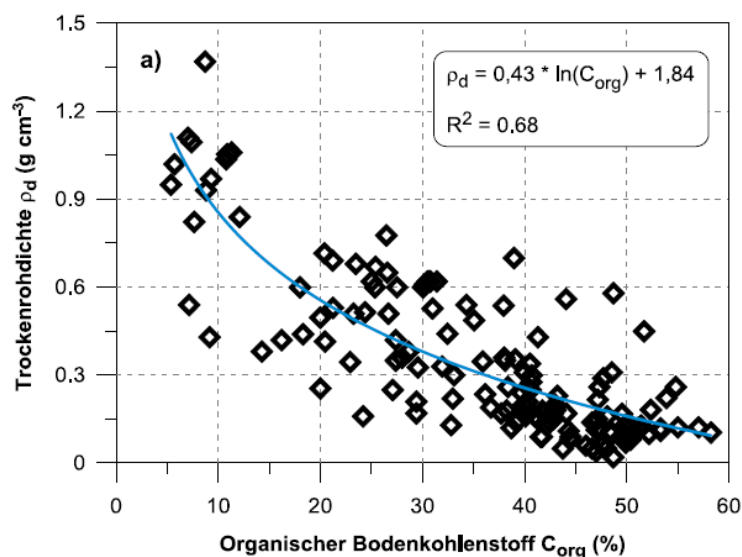


Abb. 7.4: Zusammenhang zwischen  $C_{org}$  und Trockenrohddichte (aus [213]).



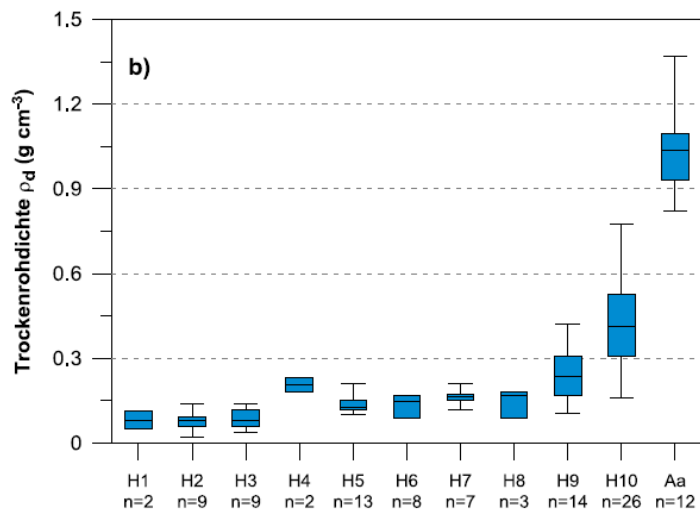


Abb. 7.5: Zusammenhang zwischen Zersetzungsgrad (H) nach von Post und Trockenrohdichte (aus [213]).

Entgegengesetzt zu den oben aufgeführten Untersuchungen zeigt [140] mit Korndichten, die an Glührückständen von Torfen und Mudden aus Mecklenburg-Vorpommern bestimmt wurden, einen Anstieg dieser mit abnehmendem Zersetzungsgrad (s. Abb. 7.6). Die Korndichten der Glührückstände der gering bis mäßig zersetzten Torfen (H 1-7) liegen hier deutlich über denen der in Mecklenburg-Vorpommern vorkommenden mineralischen Lockergesteine mit  $\rho_s \approx 2,65 - 2,69$  g/cm<sup>3</sup> (vgl. [140]).

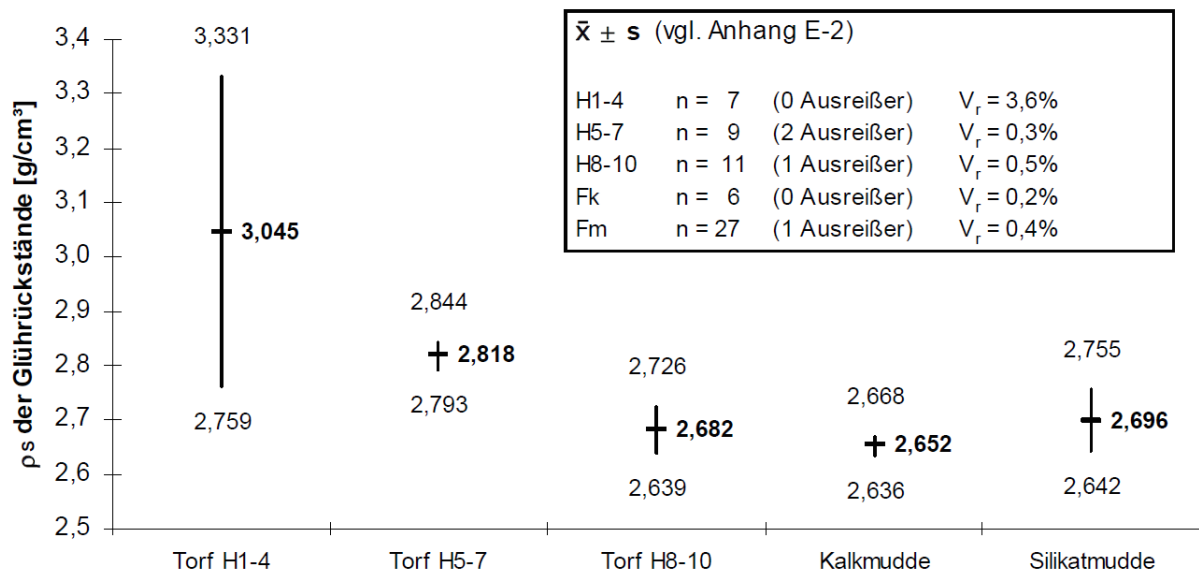


Abb. 7.6: Korndichten von Glührückstände organischer Böden aus Mecklenburg-Vorpommern (aus: [140]).

Weitere Versuche von [203] und [212] (s. Abb. 7.2 r.) zeigen einen Rückgang des natürlichen Wassergehaltes mit zunehmendem Zersetzungsgrad der enthaltenen Fasern, was sich auch auf

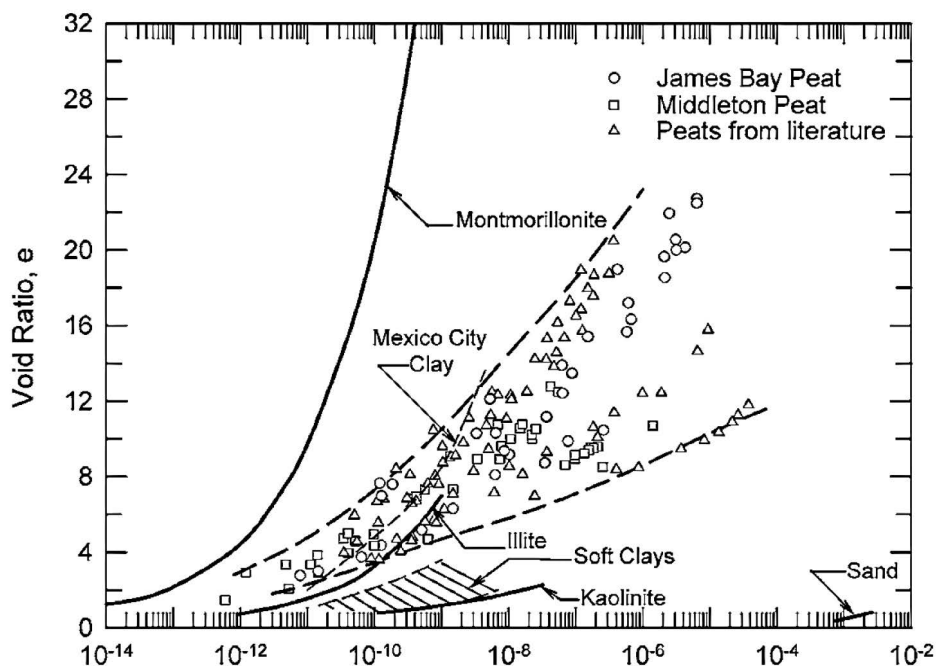
die Versuche von [211] übertragen lässt, die eine Abnahme der Trockendichte bzw. Korndichte mit einer Zunahme des Faseranteils ausweisen (s. Abb. 7.3) (vgl. hierzu auch Untersuchungen von [214]).

[140] zeigt in seinen Untersuchungen, dass für die Wassergehalte von gering bis mäßig zersetzten Torfen und Mudden Abhängigkeiten von der Überlagerungsspannung bestehen. Bei stark zersetzten Torfen konnte diese Abhängigkeit jedoch nicht nachgewiesen werden (vgl. [140]).

Versuche hinsichtlich des pH-Wertes zeigen einen Rückgang von diesem mit der Zunahme der Organik (vgl. [215], [211]). Ebenfalls steigt die Kationenaustauschkapazität mit einer Zunahme an organischen Bestandteilen an (vgl. [211]).

Eine weitere entscheidende Eigenschaft stellt die Durchlässigkeit von Torf dar, da diese die Kompression und Scherfestigkeit reguliert [203]. Der Aufbau eines Torfes, die Zusammensetzung und Anordnung der Fasern bzw. der mineralischen Komponenten beeinflussen die Größe und Kontinuität der Poren in großem Maße und damit entsprechend die Durchlässigkeit dieser, welche ein weites Streuungsband zeigt (vgl. [216] nach [217]).

Torf der sich in der ersten Entwicklungsstufe befindet und faserige Strukturen mit deutlich erkennbaren Pflanzenresten aufweist, wird mit dem Lauf der Zeit zersetzt und entwickelt sich zu einem amorphen Bodengefüge. Die Durchlässigkeit ist also abhängig vom Grad der Zersetzung [217], welcher Einfluss auf die Porenzahl nimmt. Die Porenzahl von Torfen ist im allgemein als sehr hoch zu beschreiben und nimmt mit dem Zersetzungsgrad ab. Porenzahlen  $e$  von 25 bis 2 [-] werden nach [218] aufgeführt, wobei [219] eine Bandbreite von 5 bis 15 [-] als übliche Spanne beschreibt (vgl. Abb. 7.7 mit Porenzahlen  $e$  für Torf  $> 20$  [-]).



**Abb. 7.7:** Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl verschiedener schwach zersetzter Torfe, Tone sowie Reinsand (aus [195]).

Untersuchungen von [8] an faserigem Torf zeigen eine um den Faktor 300 höhere horizontale als vertikale Durchlässigkeit und bestätigen damit eine anisotrope Struktur (vgl. Abb. 7.1) dieser. [218] beschreiben die Durchlässigkeit von Torf als sehr weit schwankend und als abhängig vom Gehalt der organischen Anteile, der Kompression und dem Zersetzungsgrad. Faseriger Torf (fibrous peat) besitzt durch seine Struktur einen hohen Anteil von verbundenen Dränwegen durch die Porenwasser leicht abfließen kann (vgl. auch [206]).

Ferner zeigen Torfe mit steigender Belastung immense Abnahmen der Porenzahl und damit der Durchlässigkeit (vgl. auch Untersuchungen von [219]). [220] gibt nach [218] die Durchlässigkeit ungestörter Torfe mit  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $10^{-5}$  m/s an.

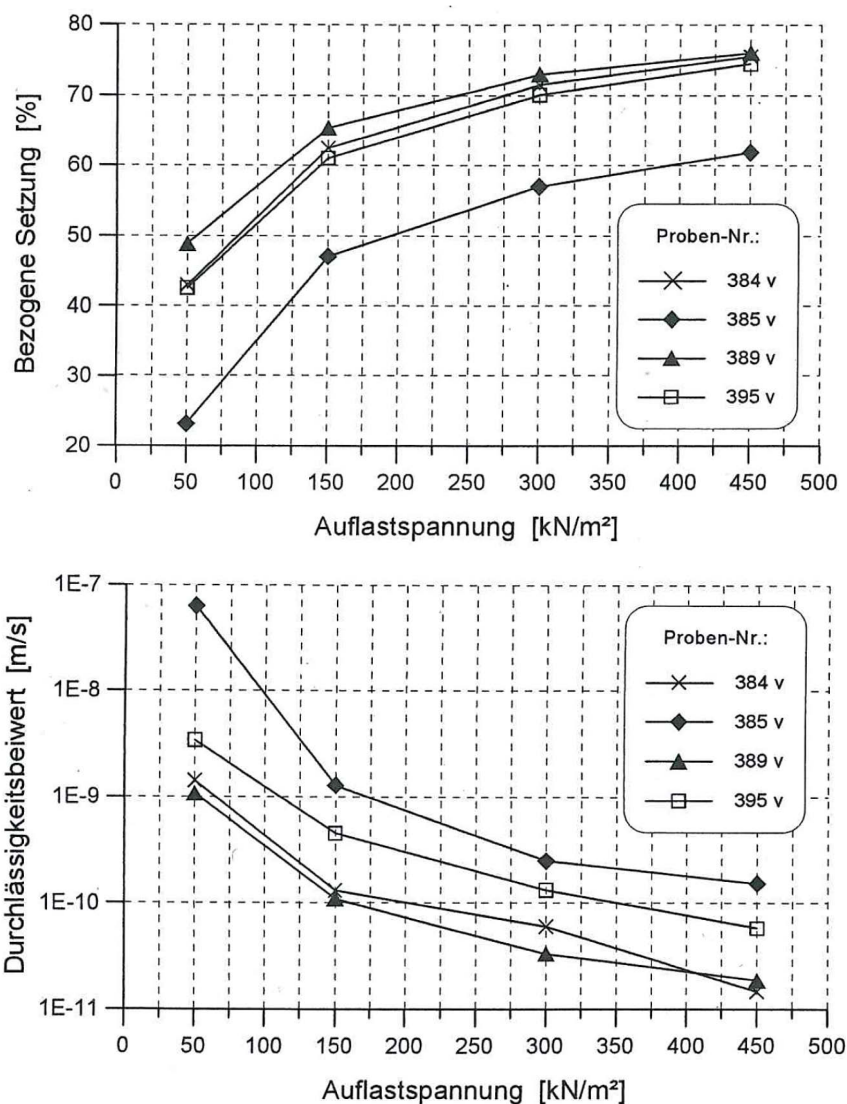


Abb. 7.8: o.: Abhängigkeit der bez. Setzung von der Spannung, u.: Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Spannung (aus [221]).

Untersuchungen von [221] zum Einsatz von Torfen als geologische Barriere zeigten bei hydraulischen Felduntersuchungen in unbelasteten Torfhorizonten Mittelwerte der Durchlässigkeit von  $k_f = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  (s. Abb. 7.8).

Anschließende Laborversuche an Kompressions-Durchlässigkeitsständen (Versuch DIN 18130-KD-ES-ST-SB-3 nach DIN 18130:1998 [222], Probenhöhe: 6 cm) zeigten deutliche Verminderungen des  $k_f$ -Wertes mit einer Erhöhung der Auflastspannung von 50 auf 450 kN/m<sup>2</sup>. Ersichtlich ist aus Abb. 7.8, dass die Abnahme der Durchlässigkeit der Probekörper mit der bez. Setzung, also einer Zunahme der Dichte, korreliert. Der Aschegehalt der Proben wird hier mit etwa 10 bis 14 M.-% angegeben.

Die Abb. 7.9 und Abb. 7.10 zeigen Untersuchungsergebnisse zur Durchlässigkeit von Torfen von [86] und [223], die eine Verminderung der Durchlässigkeit mit zunehmender Kompression – einer Abnahme der Porenzahl  $e$  bestätigen.

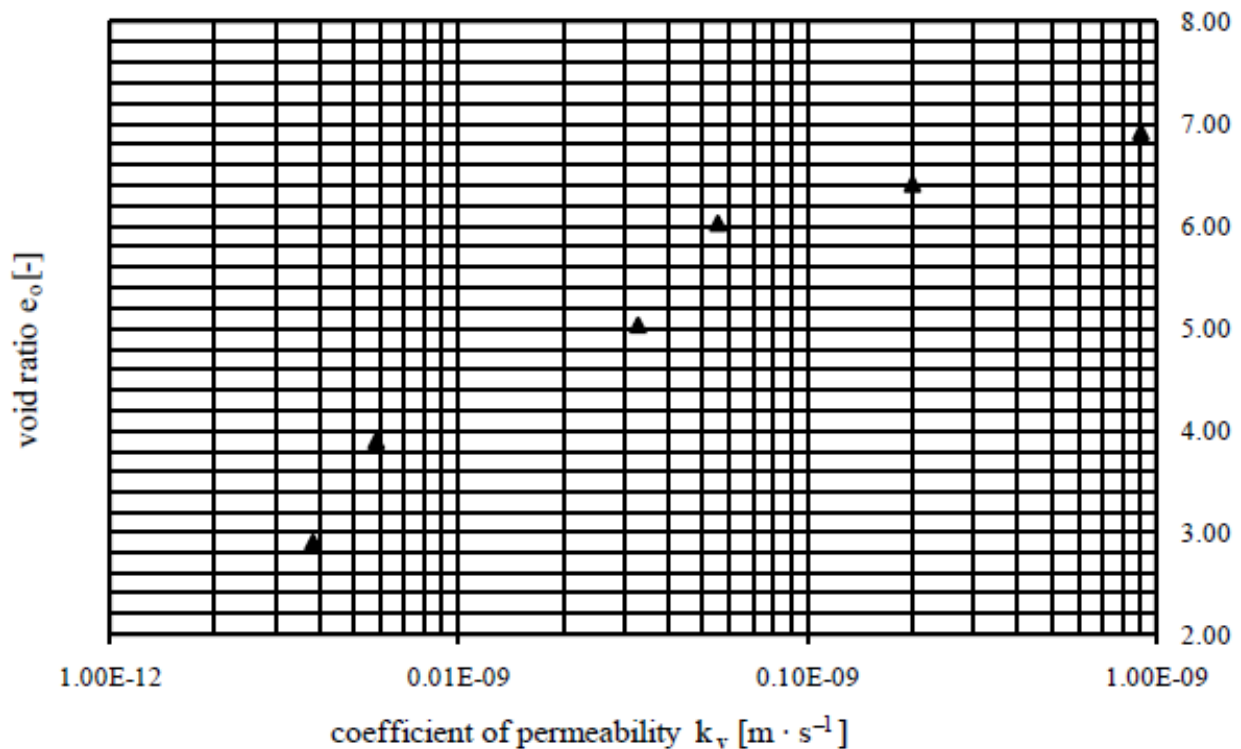


Abb. 7.9: Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl  $e$  (aus [86]).

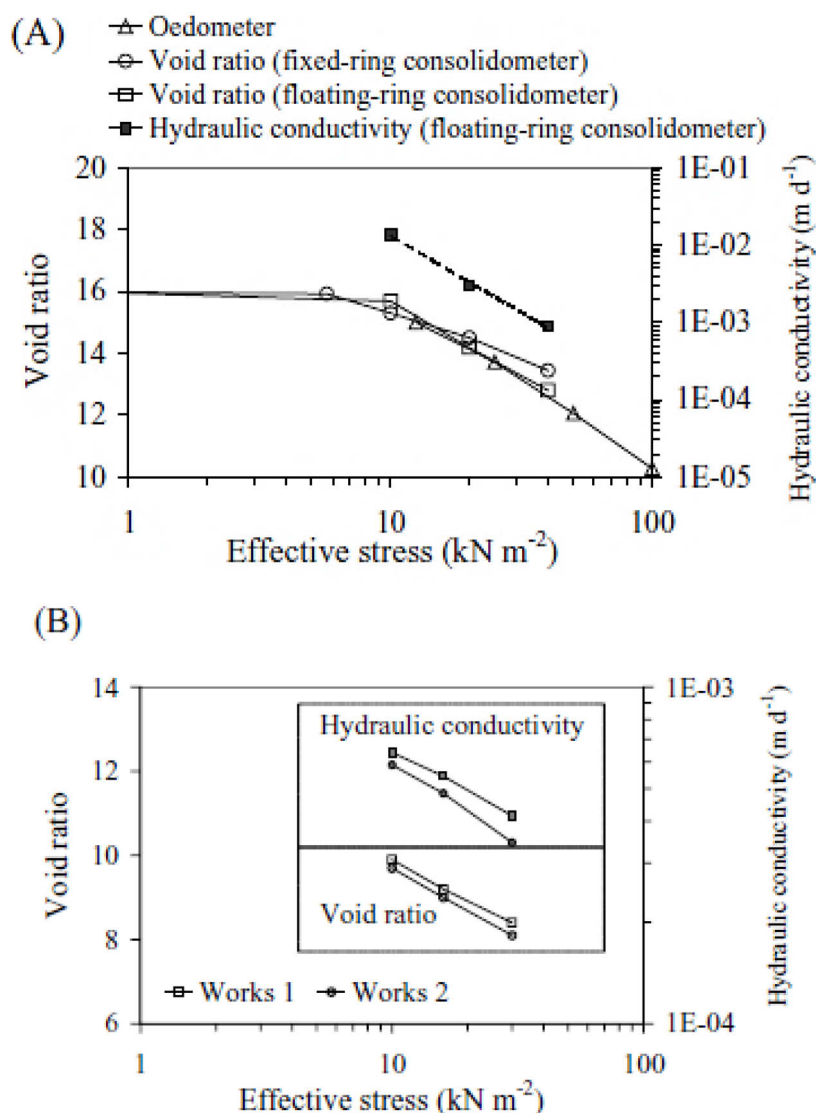


Abb. 7.10: Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Porenzahl  $e$  (aus [223]).

Weiter berichten auch [224] und [225] nach [218] über den Einsatz von Torfen als Dammdichtungskern in Norwegen.

### 7.2.1 Untersuchungen zum organischen Anteil

Aufgrund verschiedener Drittmittelprojekte, die durch das Institut für Geotechnik der Universität Siegen im Zusammenhang mit der Interpretation von Ergebnissen aus Glühversuchen und TOC-Bestimmungen an Böden mit organischen Bestandteilen bearbeitet wurden (vgl. [226], [227], [228], [229]), deren Ergebnisse in Folge zu einer Vielzahl von Diskussionen unter den Beteiligten führten, werden in dieser Arbeit, die Untersuchungen zum organischen Anteil, welche beim Umgang mit entsprechenden Böden ausschlaggebend hinsichtlich der Verwendung bzw. Gründungsmethode sein können, ausführlich behandelt. [230] zeigen mit ihren Untersuchungen von

Tonen und Torfen aus dem britischen Raum verschiedene bestehende Zusammenhänge zwischen dem Glühverlust und anderen bodenmechanischen Eigenschaften. Um den Glühverlust mit dem tatsächlichen organischen Anteil zu vergleichen, wurden von [230] neben der Bestimmung des Glühverlustes, der organische Kohlenstoffanteil mittels einer chemischen Methode, der Chromat-Methode, bestimmt.

Der organische Anteil kann nach [230] mit 58 M.-% organischem Kohlenstoff abgeschätzt werden (vgl. [82] und [93] bzw. Abschn. 5.6). Für die Bestimmung des Glühverlustes wurde dabei von [230] zunächst eine Glühtemperatur von 550°C verwendet. Getrocknet wurden die Proben zuvor bei 60°C und bei 105°C, um den Einfluss der Trocknungstemperatur auf den Glühverlust zu untersuchen. [230] beschreiben die Vorgehensweise, die Proben bei niedrigeren Temperaturen zu trocknen, um den Einfluss der Oxidation gering zu halten, als die genauere. Dabei sollte der verbleibende Wasseranteil durch eine Ergebnis-Korrektur berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den vorliegenden Proben zeigten allerdings, dass der Unterschied des Glühverlustes zwischen einer bei 60°C und einer bei 105°C getrockneten Probe nicht als signifikant zu werten ist (vgl. Abschn. 6.3.6.1 bzw. Untersuchungen von [231], [232] und [233]).

Nach den Untersuchungen von [230] ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Glühverlust  $V_{gl}$  in [M.-%] und dem organischem Anteil  $P$  in [M.-%], der durch folgende Gleichung gegeben ist:

---


$$\text{organischer Anteil } P = 100 - 1,04(100 - V_{gl}) \text{ [M.-%]} \quad (\text{Gl. 7.1})$$


---

Mit einem organischen Anteil größer 10 M.-% beträgt der Fehler dieser Gleichung nach [230]  $\pm 5\%$ .

Zusätzlich wurden die Glühtemperaturen bei der Bestimmung des Glühverlustes variiert. Dies ergab, dass mit einer Erhöhung der Glühtemperatur auch der Glühverlust zunimmt. Bei einer Glühtemperatur von 800 °C entsprach dies, bis auf wenige Proben, nach [230] einer Vergrößerung um die Faktoren 0,5 bis 2,0 [-] (vgl. Abb. 7.11 I.).

Nach [230] liefert das Glühen bei 800 °C zwar genauere Ergebnisse, allerdings ist die Bestimmung des Glühverlustes bei 550 °C für baupraktische Zwecke ausreichend, sofern der organische Anteil mehr als 10 M.-% beträgt. Bei einer Glühtemperatur von 800 °C müssen zudem Effekte aus Dehydration berücksichtigt werden.

Der Zusammenhang zwischen der Korndichte und dem Glühverlust an den von [230] untersuchten Böden ist in Abb. 7.11 r. dargestellt und durch folgende Gleichung (Gl. 7.2) mit der Kornreindichte  $p_s$  in [g/cm<sup>3</sup>] und einem Glühverlust  $N$  in [M.-%] der Trockenmasse gegeben (vgl. hierzu auch Korrelationen von [234]).

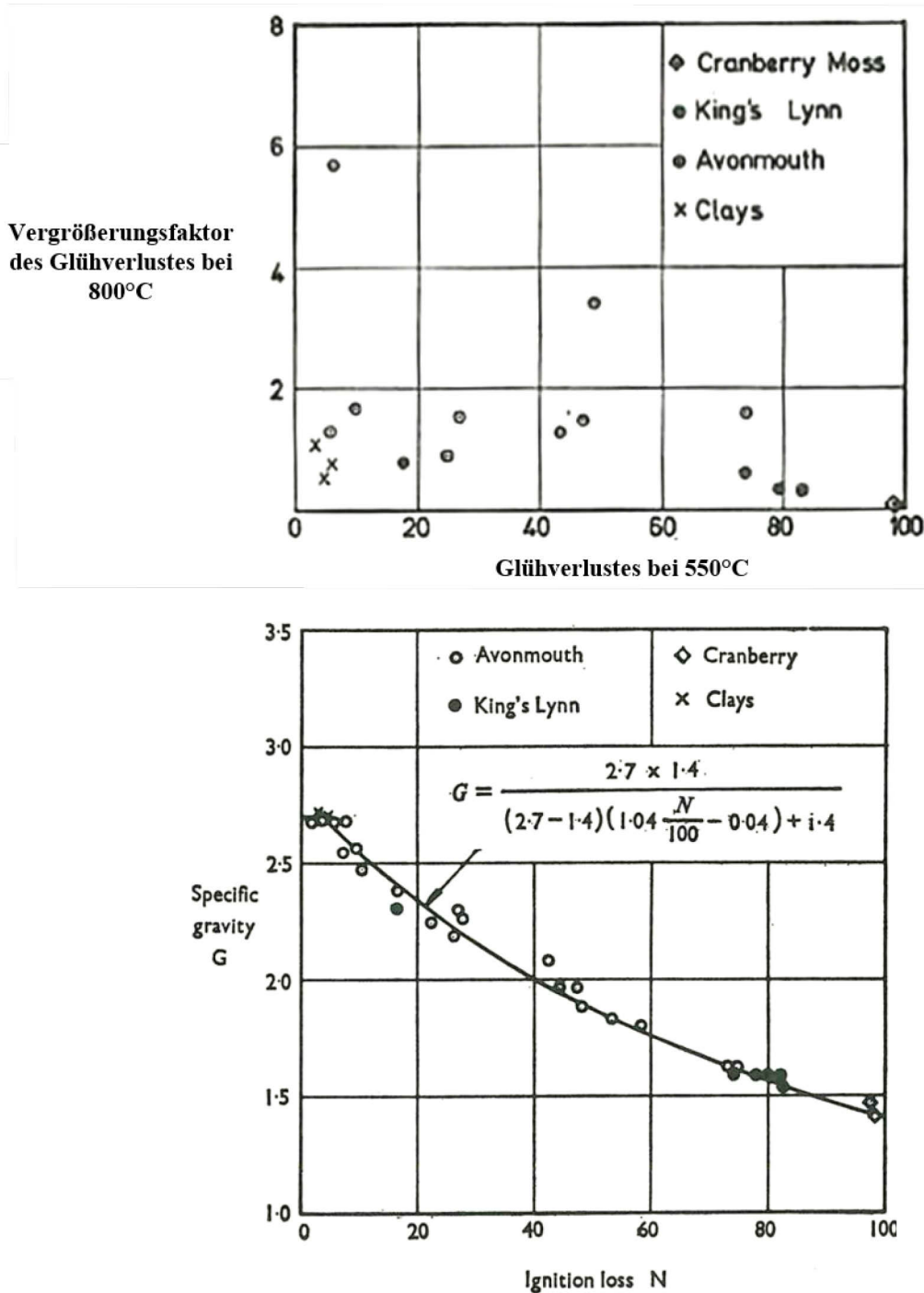


Abb. 7.11: o.: Vergrößerungsfaktor des Glühverlustes bei einer Glühtemperatur von 800 ggü. 550 °C (nachbearbeitet), u.: Abhängigkeit der Korndichte vom Glühverlust (aus [230]).

$$p_s = \frac{2,7 \times 1,4}{(2,7 - 1,4) \left( \frac{1,04N}{100} - 0,04 \right) + 1,4} [gcm^{-3}] \quad (Gl. 7.2)$$

Ein weiterer Zusammenhang konnte von [230] zwischen der Fließgrenze  $w_L$  und dem Glühverlust hergestellt werden, der durch folgende Gleichung beschrieben wird (s. hierzu auch Näherungen über den Aschegehalt von [235] und [236]):

---

$$w_L - 50 = 5 V_{gl} [\%]$$

---

(Gl. 7.3)

Allerdings liefert diese Gleichung nach [230] nur im Bereich  $20 < V_{gl} < 80$  M.-% Ergebnisse, die im Genauigkeitsbereich von  $\pm 20$  % liegen.

## 7.2.2 Weitere Verfahren zur Bestimmung des organischen Anteils

Neben dem Glühverlust gibt es noch weitere chemische Methoden zur Bestimmung des organischen Anteils von Böden. [237] beschreiben dabei folgende Verfahren:

### ▪ Bestimmung des Massenverlustes durch nasse Oxidation

Bei der nassen Oxidation wird der getrocknete Boden mit Wasserstoffsuperoxid übergossen, wodurch sich die organischen Bestandteile lösen. Der so behandelte Boden wird filtriert und getrocknet. Die Differenz der Masse vor und nach Oxidation ist der Anteil an organischen Bestandteilen (vgl. hierzu auch [238] und [239]).

### ▪ Bestimmung der organischen Bestandteile durch Oxidation und Titration (Chromat-Methode)

Die Chromat-Methode ist eine chemische Methode, bei der der Kohlenstoff in der Bodenprobe durch Zugabe einer Kaliumbichromatlösung zu Kohlenstoffdioxid aufoxidiert wird. Der Kohlenstoffanteil wird dann durch chemische Messmethoden bestimmt (vgl. auch [169] bzw. [240]). Zu beachten ist dabei nach [237], dass sich der organische Anteil des Bodens durch Multiplikation des Kohlenstoffgehaltes mit einem Korrekturfaktor ergibt. Dies beruht darauf, dass durchschnittlich 58 M.-% Kohlenstoffanteil (vgl. Abschn. 5.6) in den organischen Bestandteilen vorhanden sind (vgl. auch [241]).

### ▪ trockene Oxidation (Dennstedt-Methode)

Bei der trockenen Oxidation wird der Boden unter Sauerstoff bzw. Stickstoff verglüht. Die Verbrennungsprodukte  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  werden einzeln aufgefangen und anschließend quantitativ bestimmt. Daraus können der Kohlenstoffanteil und somit der organische Anteil berechnet werden. Die trockene Oxidation wird auch in der in der aktuellen DIN EN 15936:2012 [242] geregelt und stellt den derzeitigen Untersuchungsstandard neben dem Glühverlust für Böden dar.



Diese wird in 2 Verfahren unterteilt:

- Verfahren A (indirektes Verfahren)

Da neben dem organisch gebundenen Kohlenstoff in vielen Böden ein weiterer Teil in anorganischer Form als Carbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) vorliegt und bei der Verbrennung der Proben zur Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffs auch der anorganisch gebundene Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) freigesetzt wird, muss daher zur Ermittlung des Gehaltes an organisch gebundenem Kohlenstoff, bei carbonathaltigen Böden, der carbonatische Kohlenstoff vom Gesamt-Kohlenstoff subtrahiert werden.

Daher wird bei dieser Methode der TOC (Total Organic Carbon, Menge an Kohlenstoff, die durch Verbrennung in Kohlenstoffdioxid umgewandelt und nicht durch Behandlung mit Säure als Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird) aus der Differenz der Messungen des TC (Total Carbon – Menge an Kohlenstoff, die in der Probe in Form von organischem, anorganischem und elementarem Kohlenstoff vorhanden ist) und des TIC (Total Inorganic Carbon – Menge an Kohlenstoff, die durch Behandlung mit Säure als Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird) erfasst (s. (Gl. 7.4) und (Gl. 7.5)).

Der gesamte enthaltene Kohlenstoff (TC) wird durch Veraschung der Probe im sauerstoffhaltigen Gasstrom bei 900 bis 1500 °C in Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) umgewandelt, welches mittels Sensorik gemessen wird. Die Bestimmung des anorganischen Anteils (TIC) erfolgt an einer weiteren Teilprobe durch Ansäuern und Ausblasen des freigesetzten Kohlenstoffdioxids.

---

$$TC = TOC + TIC \text{ [M. - \%]} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

$$TOC = TC - TIC \text{ [M. - \%]} \quad (\text{Gl. 7.5})$$

---

Nach DIN EN 15936:2012 [242] darf für Bodenuntersuchungen der Gehalt des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) alternativ berechnet werden, indem der gesamte Kohlenstoffgehalt (TC) bestimmt und der in Form von Carbonat vorhandene Kohlenstoff der nach DIN EN ISO 10693:2014 [243] bestimmt wurde, subtrahiert wird.

- Verfahren B (direktes Verfahren)

Hier wird die Probe vor der Veraschung bei 900 bis 1500 °C mit Säure behandelt um die vorhandenen Carbonate zu entfernen. Das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlenstoffdioxid gibt dann den TOC direkt an.

Unter der Annahme eines mittleren Kohlenstoffgehaltes der organischen Substanz im Boden von 58 % (Schwankungsbreite nach [244]: ca. 30 bis 71 M.-%) lässt sich daraus durch Multiplikation des organischen Kohlenstoffgehaltes (TOC oder auch organischer Kohlenstoff  $C_{org}$  (vgl. [244]) mit dem Faktor 1,72 (Schwankungsbreite nach [244]: 1,4 -3,3) der Humusgehalt (in [M.-%] der Trockenmasse des Boden) errechnen:

---


$$\text{Humusgehalt} = \text{TOC} - \text{bzw. } C_{org} - \text{Gehalt} \cdot 1,72 \text{ [M. - \%]} \quad (\text{Gl. 7.6})$$


---

### 7.2.3 Vergleich der verschiedenen Methoden

[237] bewerten die trockene Oxidation als zu unwirtschaftlich, sodass sie nur in chemischen Laboren durchgeführt werden könnte. [111] gibt für diese einen sehr kleinen Fehler von nur 0,5 % an. Die Titrationsmethode und die nasse Oxidation wären in bodenmechanischen Labors durchführbar, allerdings ist die Titrationsmethode zu fehleranfällig und die nasse Oxidation liefert bei Böden mit größeren organischen Bestandteilen falsche Ergebnisse. Empfohlen wird deshalb von [237] der Glühverlust bei 600 °C mit der Korrekturformel (s. (Gl. 7.7) nach [230]). Die Abb. 7.12 zeigt den Vergleich zwischen den Werten des Glühverlustes, welche mit der Korrekturformel korrigiert wurden (Gl. 7.7) und der trockenen Oxidation. Man erkennt, dass die Werte des organischen Anteils sich der Geraden nach [230] bei organischen Anteilen größer 3 bzw. 5 M.-% annähern.

---


$$OB = 100 - 1,04(100 - V_{gl(550^\circ C)}) \text{ [M. - \%]} \quad (\text{Gl. 7.7})$$


---

[237] betrachten diese Genauigkeit als ausreichend für den bautechnischen Bereich. Zu beachten ist hier, dass die Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Oxidation nach DIN EN 15936:2002 [242] inzwischen, mehr als 35 Jahre nach den Untersuchungen durch [237], einen Standard-Versuch darstellt.

Weiterhin ist aber zu beachten, dass Einzelversuche nach DIN EN 15936:2002 [242] aufgrund der geringen Probenmengen (< 1,0 g) ausgeprägte Ausreißer ausweisen können. Die Probenmengen bzw. die Wiederholpräzision dieser ist mit Versuchen zur Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128:2002 [122], die bei Bedarf mit Probenmengen >> 100 g im Muffelofen betrieben werden können und zuverlässige auf der sicheren Seite liegende Werte liefern, nicht zu vergleichen (die Mindest-Probenmenge für organische Böden/feinkörnige Böden nach DIN 18128:2002 [122] beträgt 15 g).

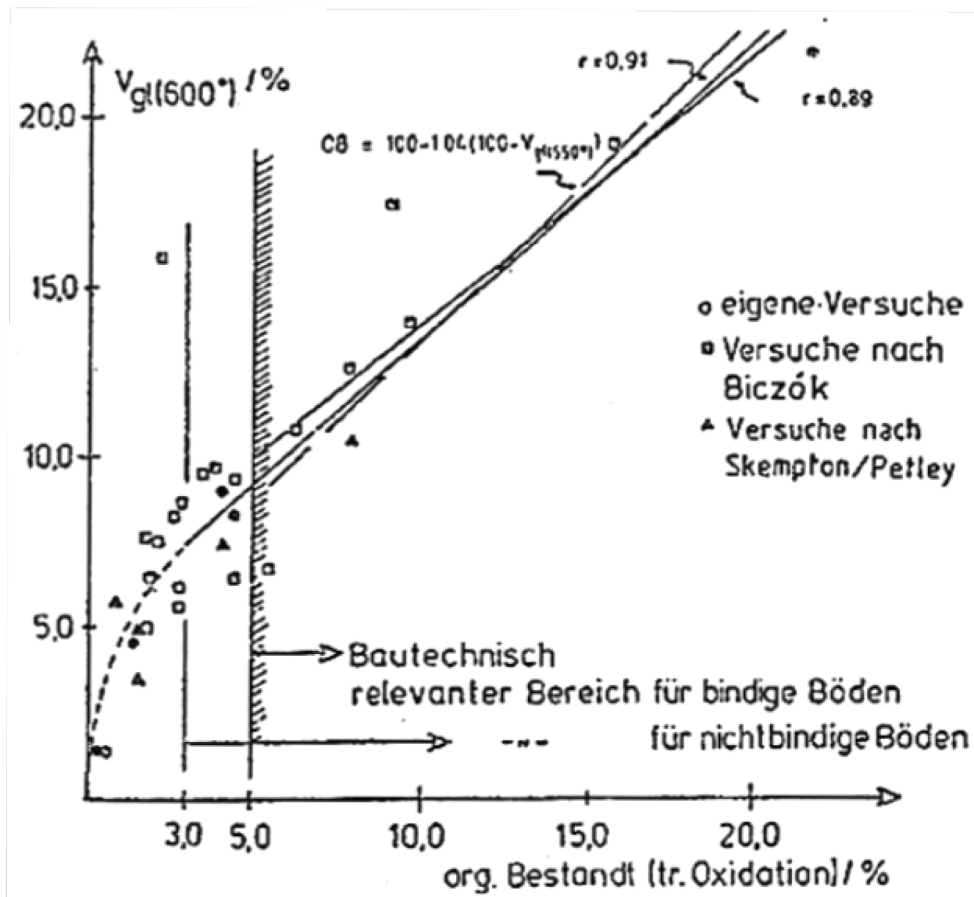


Abb. 7.12: Vergleich Glühverlust und trockene Oxidation mit eigenen Versuchen [237] und Versuchen von [111] u. [230] (aus [237]).

In Versuchen an Böden mit verschiedenen Anteilen organischer Substanz haben [229] den Glühverlust bei 550 °C mit TOC-Versuchen nach DIN EN 15936:2002 [242] (total organic carbon – gesamter organischer Kohlenstoff) verglichen.

Diese Versuche ergaben eine deutliche Abweichung zwischen den TOC Werten, dem Glühverlust und dem nach [230] korrigierten Glühverlust nach (Gl. 7.7). Aufgrund dieser Abweichungen wird die Korrekturformel nach [230] nicht empfohlen.

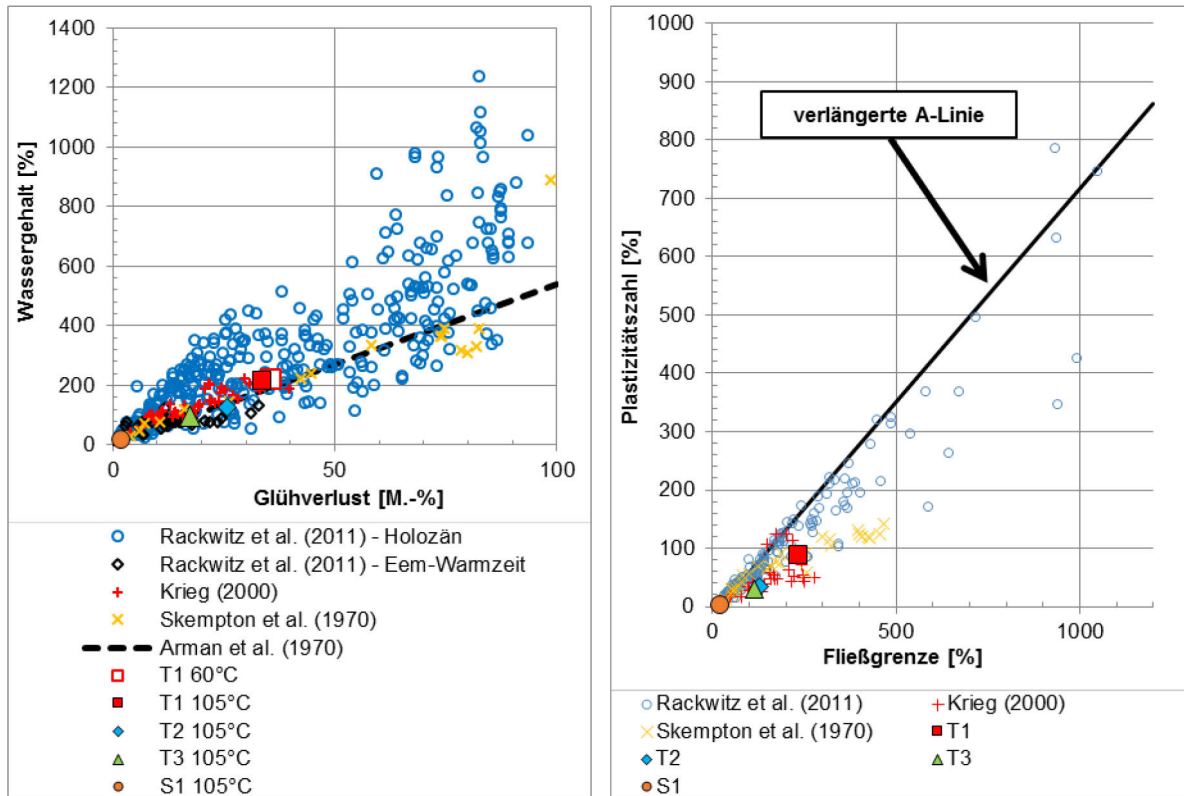
Allerdings liefert der Glühverlust ohne Anwendung der (Gl. 7.7) einen auf der sicheren Seite liegenden Wert und wird als daher eine „einfache“ und zugleich „sichere“ Methode empfohlen. Vgl. hierzu auch die Untersuchungen von [245].

#### 7.2.4 Vergleich verschiedener Untersuchungen

Nach Rackwitz et al. (2011) [246] ist der deutlich höhere Wassergehalt ein wesentliches Merkmal organischer Böden im Vergleich zu rein mineralischen Böden. Die Abb. 7.13 I. zeigt den Zusammenhang zwischen Glühverlust  $V_{Gl}$  und natürlichem Wassergehalt  $w_n$ , welche in verschiedenen

Versuchsreihen an Böden mit organischen Bestandteilen bzw. organischen Böden festgestellt wurden. Dabei wurden in den Versuchen von Rackwitz et al. (2011) [246] Wassergehalte von bis zu 1250 % festgestellt.

Zusätzlich sind hier die Versuchsergebnisse von Skempton et al. (1970) [230] und Krieg (2000) [247], sowie die Korrelation von Arman et al. (1970) [248] und die Ergebnisse der eigenen Versuche (vgl. Abschn. 6) eingetragen.



**Abb. 7.13:** I.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Wassergehalt, r.: Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Plastizitätszahl ( $w_p=1000\%$ ).

Grundsätzlich lässt sich an Abb. 7.13 I. erkennen, dass tendenziell mit zunehmendem Glühverlust auch der natürliche Wassergehalt ansteigt, wie es auch die aktuellen Versuchsböden widerspiegeln.

Zusätzlich lässt sich an den Ergebnissen von Rackwitz et al. (2011) [246] erkennen, dass geologisch vorbelastete Böden aus der Eem-Warmzeit deutlich geringere Wassergehalte aufweisen, als Böden aus dem Holozän. Dies wird damit erklärt, dass der Wassergehalt unter anderem von der Vorbelastungsgeschichte des Bodens abhängig ist (vgl. auch [140]).

Neben den Einzelversuchen zeigt die Korrelation von [248] zwischen Glühverlust  $V_{gl}$  und natürlichem Wassergehalt  $w_n$  einen linearen Zusammenhang, welcher näherungsweise durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$w_n = 5,4 V_{gl} [\%] \quad (\text{Gl. 7.8})$$

Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den aktuellen Versuchsböden bzw. den von [247] durchgeführten Versuchen an Mudde, Klei und Wiesenkalk (vgl. auch Untersuchungen von [140] an Torfen unterschiedlicher Zersetzungsgrade und Mudden).

Wie an den Einzelversuchen zu erkennen ist, schwanken die Wassergehalte allerdings – insbesondere bei großen Glühverlusten sehr stark, was nach [246] mit der Heterogenität der Böden zusammenhängt. Der lineare Zusammenhang nach [248] lässt sich somit nicht bestätigen, stellt allerdings näherungsweise eine untere Grenze für den Glühverlust bei einem bestimmten Wassergehalt dar.

Die Abb. 7.13 r. und Abb. 7.14 l. geben den Zusammenhang zwischen der Fließgrenze  $w_L$  und der Plastizitätszahl  $I_p$  im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196:2011 [126] wieder.

Nach DIN 18196:2011 [126] liegen organische Tone und Schluffe unterhalb der A-Linie, welche durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$I_p = 0,73 (w_L - 20)[\%] \tag{Gl. 7.9}$$

Die Einordnung von Schluffen mit organischen Beimengungen und organogenen Schluffen erfolgt danach ab einer Fließgrenze  $w_L$  von 35 %, die von Tonen mit organischen Beimengungen und organogenen Tonen ab einer Fließgrenze von 50 %.

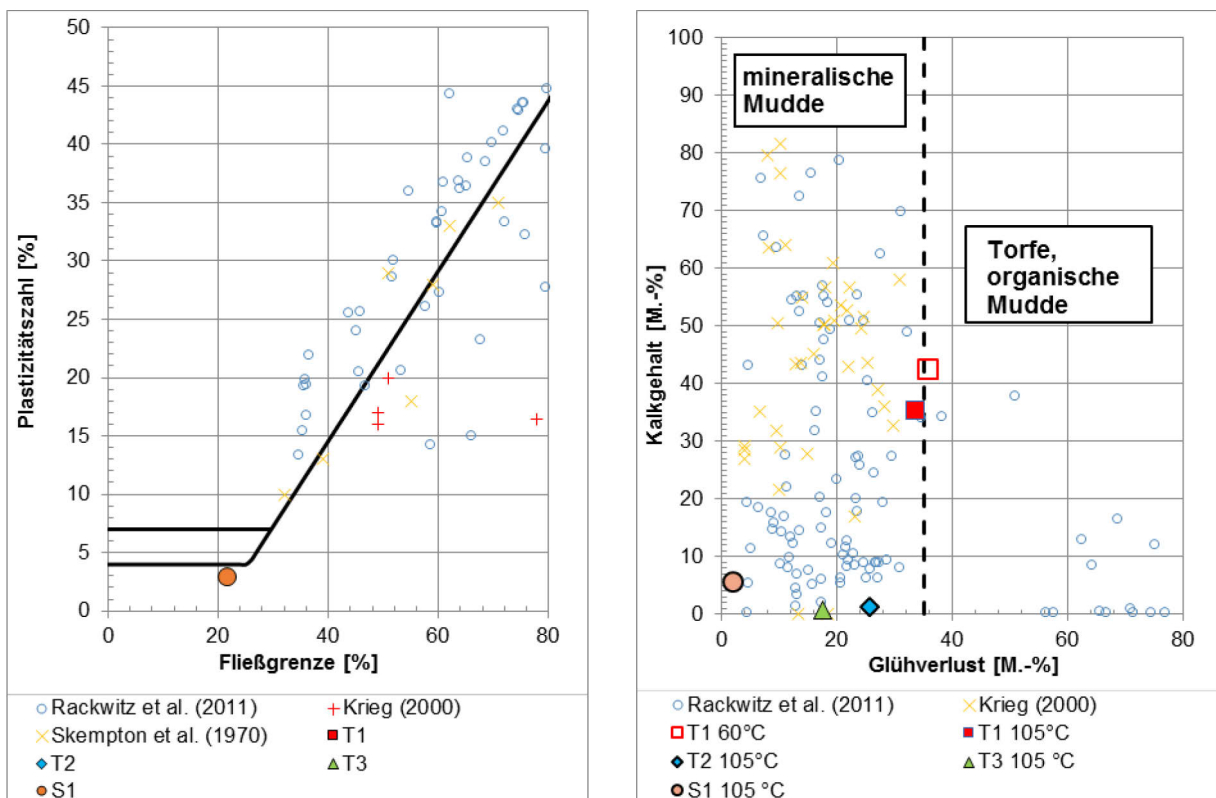


Abb. 7.14: l.: Zusammenhang Fließgrenze und Plastizitätszahl ( $\gamma=50\%$ ), r.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Kalkgehalt.

Die Abb. 7.14 I. zeigt die Ergebnisse aller Proben innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Plastizitätsdiagrammes nach DIN 18196:2011 [126], welches bis zu einer Fließgrenze  $w_L$  von 80 M.-% und bis zu einer Plastizitätszahl  $I_P$  von 50 M.-% reicht. Es lässt sich erkennen, dass nicht alle untersuchten Proben unterhalb der A-Linie liegen, was im Widerspruch zur Klassifikation nach DIN 18196:2011 [126] steht. Die Fließgrenzen beginnen, bis auf eine Ausnahme, den S1, allerdings alle bei 35 %. In der in Abb. 7.13 r. dargestellten und vergrößerten Ansicht des Plastizitätsdiagramms mit der verlängerten A-Linie lässt sich erkennen, dass die Fließgrenze und die Plastizitätszahl bei den untersuchten Proben zum Teil deutlich höhere Werte ( $w_L$  bzw.  $I_P > 80$  bzw. 50 M.-%) annehmen.

Die Versuchstorfe T1 bis T3 lassen sich damit im Plastizitätsdiagramm nur mit einer Verlängerung der A-Linie darstellen. Insgesamt liegen die Böden mit höheren Fließgrenzen bzw. Plastizitätszahlen aber überwiegend unter der A-Linie. Für die deutliche, in den Untersuchungen gezeigte Beeinflussung der Versuchsböden durch vorherige Trocknung s. Abschn. 6.3.7 und vgl. auch [180].

Die Abb. 7.14 r. gibt den Zusammenhang zwischen Glühverlust und Kalkgehalt der unterschiedlichen Versuchsböden wieder. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich erkennen, dass Böden mit geringen Glühverlusten zum Teil sehr hohe Kalkgehalte aufweisen. Ist der Kalkgehalt größer als 20 M.-%, so ist der Glühverlust meist geringer als 35 M.-%. Nach [246] kann deshalb zwischen mineralischen Mudden mit Glühverlusten  $< 35$  M.-% und zum Teil hohen Kalkgehalten und zwischen Torfen bzw. organischen Mudden mit Glühverlusten  $> 35$  M.-% und Kalkgehalten größtenteils  $< 20$  M.-% unterschieden werden. Im Gegensatz zu den Versuchstorfen T2 und T3, die einen Kalkgehalt von  $< 2$  M.-% aufweisen, zeigt der T1 mit einem Kalkgehalt von  $> 30$  % deutlich höhere Werte, die insgesamt etwa im mittleren Bereich der abgebildeten Versuche liegen.

Nach [230] besteht zwischen Glühverlust und Fließgrenze ein linearer Zusammenhang (s. (Gl. 7.3)). Im Bereich von  $20 \text{ M.-%} < V_{gl} < 80 \text{ M.-%}$  soll dieser lineare Zusammenhang nach [230] Ergebnisse liefern, die im Genauigkeitsbereich von  $\pm 20$  % liegen. Wie in der Abb. 7.15 zu erkennen ist, liegen die Versuchsergebnisse von [247] jedoch zum Teil deutlich außerhalb dieses linearen Zusammenhangs, wobei die größten Abweichungen etwa zwischen 80 und 90 % liegen. Die mittleren Werte des T1 hingegen zeigen gute Übereinstimmungen. Der von [230] beschriebene lineare Zusammenhang lässt sich somit nicht bestätigen. Es lässt sich anhand der Versuchsergebnisse allerdings erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen Glühverlust und Fließgrenze vorhanden ist: Mit steigendem Glühverlust steigt auch die Fließgrenze an. Vgl. hierzu auch [203], [249], [208], [250], [214] und [162].

Die Abb. 7.15 zeigt die Abhängigkeit der Korndichte vom Glühverlust. Neben den Versuchsergebnissen ist auch hier der Zusammenhang zwischen Glühverlust und Korndichte (s. (Gl. 7.2)) nach [230] dargestellt. Grundsätzlich lässt sich anhand der Versuchsergebnisse ein Zusammenhang zwischen Glühverlust und Korndichte erkennen: Mit steigendem Glühverlust nimmt die

Korndichte ab. Insbesondere bei niedrigen Glühverlusten bestehen zwischen der Korrelation nach [230] und den Versuchsergebnissen zum Teil sehr hohe Abweichungen von bis zu ca. 0,6 g/cm<sup>3</sup>. Nach [246] setzen sich insbesondere organische Böden aus vielen Einzelbestandteilen zusammen, sodass die Korndichten dieser Böden eher als ein Mittelwert der Korndichten der einzelnen Bestandteile zu verstehen sind. Hingegen zeigen die mittleren Werte der Versuchsböden einen dem Korrelationsgraph entsprechenden Verlauf. Vgl. hierzu auch die Untersuchungen von [208], [211], [251] und [245].

Nach der Einteilung von [246] sind die Versuchstorfe mit Glühverlusten zwischen  $\geq 5$  und  $\leq 35$  % M.-% sowie Korndichten zwischen  $\geq 2,00$  und  $\leq 2,75$  g/cm<sup>3</sup> und einem Kalkgehalt  $\leq 45$  M.-% als schwach karbonatische mineralische Mudden einzustufen.

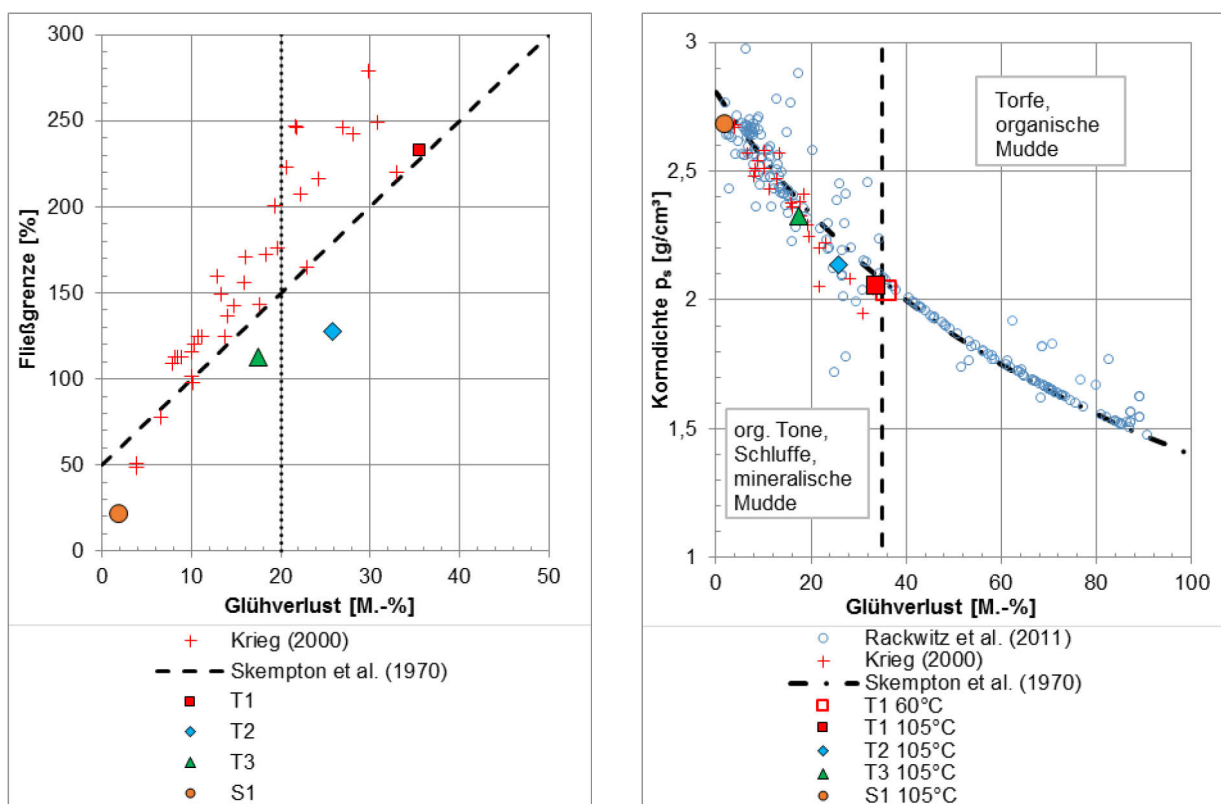


Abb. 7.15: l.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Fließgrenze, r.: Zusammenhang zwischen Glühverlust und Korndichte.

**Tab. 7.3: Einteilung der organischen Böden nach bodenmechanischen Klassifikationskennwerten und Anhaltswerte für zugehörige Bodenkenngrößen (aus [246]).**

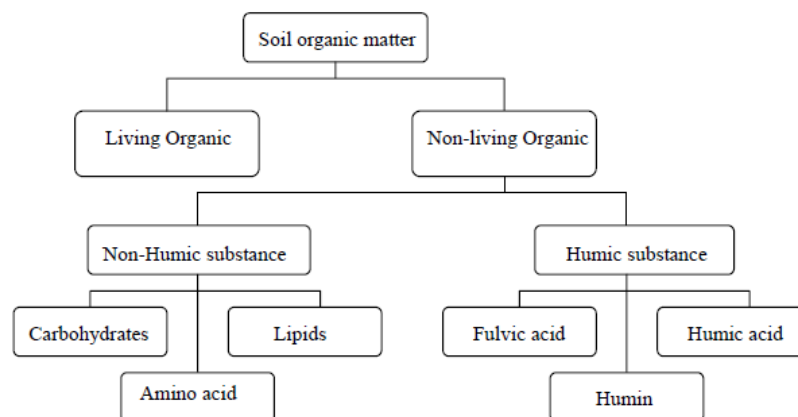
Mineralische Mudde		Organische Mudde und Torf		
$5 \leq V_{gl} \leq 35 \%$ $2,75 \geq \rho_s \geq 2,00 \text{ g/cm}^3$		$35 < V_{gl} \leq 100 \%$ $2,00 > \rho_s \geq 1,40 \text{ g/cm}^3$		
Schwach karbonatische Mudde $V_{ca} \leq 45 \%$	Stark karbonatische Mudde $V_{ca} > 45 \%$ $w_L < 250 \%$ $w_P < 100 \%$ $w_n < 300 \%$	Überwiegend detritische Mudde	Stark huminstoffhaltige, torfähnliche Mudde	Nicht bis vollständig zersetzter Torf, je nach Zersetzungsgrad
<b>Mudde, Sand-, Schluff-, Tonmudde</b>	<b>Kalkmudde</b>	<b>Detritus-, Lebermudde</b>	<b>Torfmudde</b>	<b>Faseriger Torf, zersetzter Torf</b>
$C_c = 0,5 \dots 2,5$	$C_c = 0,5 \dots 1,5$	$C_c = 1,5 \dots 8$		
$C_\alpha = 0,02 \dots 0,15$		$C_\alpha = 0,15 \dots 0,50$		$C_\alpha = 0,15 \dots 0,70$ [7]
$C_\alpha/C_c = 0,03 \dots 0,08$	$C_\alpha/C_c = 0,05 \dots 0,07$	$C_\alpha/C_c = 0,03 \dots 0,10$		
Effektiver Reibungswinkel $\varphi' = 28^\circ \dots 52^\circ$ (konsolidierte, undrainierte Triaxialversuche)				
Effektiver Reibungswinkel $\varphi' = 25^\circ \dots 35^\circ$ (Rahmen- und Kreisringscherversuche)				
Undrainierte Kohäsion $c_{u,0} = 1 \dots 7 \text{ kN/m}^2$ und $c_{u,i} = c_{u,0} + (0,3 \dots 0,5) \cdot \sigma'_{v,i}$				



### 7.3 Zusammensetzung organischer Substanz

Die Eigenschaften von organischer Substanz werden durch ihre chemische Zusammensetzung, die Umgebungsbedingungen und den Grad der Zersetzung bestimmt. In erster Linie besteht diese elementar aus Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) die wiederum in Spannen von 40-60 %, 20-40 %, 4-6 % und 0-5 % vorliegen [201]. [96] gibt Schwankungsbereiche von 44 bis 58 % (C), 42-46 % (O), 6 - 8% (H) und 0,5 bis 4 % (N) an (vgl. auch Mückenhausen). Weiter führen [96] an, dass alle physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften eines Boden von organischen Substanzen stärker beeinflusst werden als durch gleiche Anteile von Ton (Faktor 3 bis 5).

Nach [96] wird zur stofflichen Beurteilung des Humus zwischen Nichthuminstoffen und Huminstoffen unterschieden: Nichthuminstoffe umfassen danach alle abgestorbenen tierischen und pflanzliche Stoffe, die sich im biologischen oder abiologischen Ab- oder Umbau befinden. Huminstoffe hingegen sind stabile hochmolekulare Verbindungen mit zumeist dunkler Farbgebung, die durch chemische und biochemische Reaktionen entstanden sind (vgl. Abb. 7.16).



**Abb. 7.16:** Klassifikation organischer Substanzen (aus [214]).

Weiter können stabile Huminstoffe im Boden erst synthetisiert werden, wenn reaktionsfähige Spaltprodukte vorliegen. Mithilfe verschiedener Lösungsmittel und Fällungen mit Säure lassen sich Huminstoffe in unterschiedliche Stoffgruppen (Fulvosäuren, Hymatomelansäuren, Huminsäuren und Humine) trennen, wobei die Übergänge als fließend zu bezeichnen sind (vgl. [252], [253], [96]).

**Tab. 7.4: Die wichtigsten Eigenschaften der Huminstoffe (nach [253]).**

Eigenschaften bzw. Merkmale	Huminsäuren, Humate				
	Fulvosäuren, Fulvate	Hymatomelan- säuren	Braunhumin- säuren	Grauhumin- säuren	Humine
Farbe	gelb bis gelbbraun	mittelbraun	dunkelbraun	grauschwarz	schwarz
Bildungsbedingungen	→ zunehmend günstige Bedingungen → hinsichtlich Ausgangssubstanz (Eiweiß-N), Luft, Temperatur, Basen, Kolloid-Ton				
Polymerisationsgrad	niedrig	→ zunehmend		→ hoch	
C-Gehalt in %	~ 45	→ zunehmend		→ >60	
N-Gehalt in %	~ 0,5-2	→ zunehmend		→ bis 8	
Bindung an Ton	gering	→ zunehmend		→ hoch	
Stabilität	gering	→ zunehmend		→ hoch	
Säurecharakter	stark	→ abnehmend		→ schwach	
Löslichkeit	stark	→ abnehmend		→ sehr schwach	
Mobilität im Boden	stark	→ abnehmend		→ sehr schwach	
Lösungskraft	stark	→ abnehmend		→ schwach	
Wasserhaltevermögen	gering	→ hoch		← gering	
Sorptionsvermögen für Ionen	gering	→ hoch		← gering	
Entstehung	→ chemisch abnehmend		→ Alterung		
	→ biotisch zunehmend				
Typisch für Böden	Podsole	→ Braunerden		→ Schwarzerden	

Die wasserlöslichen Fulvosäuren befinden sich im ersten Stadium der Umwandlung von den Ausgangsstoffen zu den braun bis schwarz gefärbten Endprodukten des Humifizierungsprozesses, sind von schwarz-gelbbrauner bis rotgelber Farbe und zeigen den von allen Huminstoffen geringsten Polymerisationsgrad und Kohlenstoffgehalt (vgl. [78]). Daran folgen mit u. a. zunehmendem Teilchengewicht, Polymerisationsgrad und Kohlenstoffgehalt die Hymatomelansäuren, die reaktionsfähigen, relativ abbauresistenten Huminsäuren und reaktionsträgen Humine (vgl. Tab. 7.4) (vgl. [78], [96], [254]). [78] beschreibt die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes von den Fulvo- bis zu den Grauhuminsäuren als kleinen Abschnitt des Inkohlungsprozesses (s. Abschnitt 4.2), der von kohlenstoffarmen Ausgangsstoffen über Huminstoffe bis hin zu kohlenstoffreichen bzw. -reinem Anthrazit und Graphit verläuft.

Weiter kann es auch zu einer Hemmung des Abbaus von im Boden enthaltener Organik kommen. Organische Substanzen können durch Wechselwirkungen mit im Boden vorhandenen Mineralien (Tonmineralien und Eisenoxide) stabilisiert werden, das heißt gegen mikrobiellen Abbau geschützt werden. Die Bildung solcher organo-mineralische-Verbindungen (Ton-Humus-Komplexe) kann durch verschiedene Mechanismen erfolgen und ist u. a. stark abhängig vom pH-Wert und der Basensättigung. Als Beleg für die Stabilität organo-mineralischer Verbindungen führen [77] eine Erhöhung der Temperatur für die thermische Zersetzung der organischen Substanz und die ebenfalls gesunkenen Abbauraten dieser nach Bindung an die Mineralphase an.

Zudem kann der Abbau ansonsten leicht abbaubarer organischer Substanzen durch den Einschluss in Aggregaten oder Faeces von Bodentieren gehemmt bzw. verhindert werden, da eine Aggregatbildung zum physikalischen Schutz, durch die Trennung von Substrat und Zersetzer, führt (vgl. [255] und [77]). Aggregate hemmen u. a. durch ihre, für den Zutritt von Bakterien, zu geringe Porengrößen, den Abbau organischer Substanzen (vgl. [256]).

Ferner zeigten Untersuchungen von [257] (nach [255]), dass die Sauerstoffkonzentration im Zentrum von Aggregaten niedrig ist, wodurch die Respirationsrate begrenzt werden kann, auch wenn organische Substanz zur Verfügung steht.

Die Aggregierung beruht auf verschiedenen Faktoren, u. a. durch Mikroorganismen verursacht: Pilzhyphen binden einzelne Bodenkörner und/oder Aggregate, Bakterien binden sich an Bodenpartikel (oder umgekehrt) und bilden Brücken aus, oder Pilze und Bakterien geben Polysaccharide ab, die als Bindemittel wirken.

Zudem tragen auch Pflanzen zur Aggregatbildung bei. Wurzelexsudate, die indirekt die mikrobielle Aktivität beeinflussen können, können auch zur Ausflockung von Kolloiden führen, die dann Aggregate binden oder stabilisieren. Der durch Wurzelwachstum verursachte Druck kann ebenso zur Aggregatbildung beitragen. Zugleich kann auch die Wasseraufnahme von Wurzeln zur Bildung von Aggregaten beitragen: diese kann den umgebenden Boden austrocknen, womit dieser schrumpft und damit die Stabilisierung von Aggregate unterstützt wird (vgl. [258] nach [255]).

Hieraus ist abzuleiten, dass Grundwasserschwankungen (anthropogen oder natürlich verursacht) auch Einfluss auf Aggregatbildungen nehmen. Hinzukommend können auch Bodenlebewesen die Aggregatbildung im Boden, durch ihre Ausscheidungen, die dann als Binder wirken, fördern (vgl. [259]).

Die Fähigkeit, gelöste oder gasförmige Stoffe zu adsorbieren, hängt bei Böden hauptsächlich von der Art (Ladungsdichte, Reaktivität und Hydrophobizität) und Größe (Fläche und Rauigkeit) ihrer Oberflächen ab. Bis auf Tonmineralien und organische Substanz besitzen alle Bodenmineralien nur eine äußere Oberfläche. Kommt eine innere Oberfläche hinzu, wie bei den Dreischichttonmineralien, ergeben sich damit größere spezifische Oberflächen und höhere Austauschkapazitäten. [260] gibt das Verhältnis der inneren zur äußeren Oberfläche von Torfen nach [85] mit 24:1 an. Nach [261] besitzen Huminstoffe die höchste spezifische Oberfläche als auch Kationenaustauschkapazität natürlich vorkommender Stoffe (vgl. [96]). [77] beziffern die spezifische Oberfläche von Huminstoffen Schätzungen zufolge mit 800 bis 1.200 m<sup>2</sup>/g, wobei die spezifischen Oberflächen der Sand, Schluff und Tonfraktion mit 0,1, 0,1 bis 1,0 und 5,0 bis 500 m<sup>2</sup>/g aufgeführt sind (vgl. Tab. 7.5 ).

**Tab. 7.5: Austauschkapazität, spez. Oberfläche und Ladungsdichte wichtiger Austauscher (aus [177]).**

Austauscher	Austausch- kapazität (mmol/100 g)	Spezifische Oberfläche (mVg)	Mittlere Ladungsdichte (mmol/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>7</sup> )
Kaolinite	3-15	1-40	2
Illite	20-50	50-200	3
Vermiculite	150-200	600-700	2
Smectite	70-130	600-800	1,4
Chlorite	10-40		
Allophane	10-50	700-1100	0,3
Org. Substanz	180-300	800-1000	

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zersetzung organischer Bestandteile a) mit dem Verlust von Organik (gasförmig oder in Lösung), b) mit der Auflösung von Strukturen (Übergang in die formlose Masse) und c) mit der Änderung des Chemismus der organischer Bestandteile einhergehen (vgl. [203], [214], [201]).

## 7.4 Kompressionsverhalten

Das Kompressionsverhalten von Torf ist im Vergleich zu Böden – die keine organischen Anteile enthalten – als hochkompressibel zu beschreiben. Als grundlegende Literatur zum Kompressionsverhalten von unbehandeltem, natürlichen Torfen sind [262], [263] und [203] zu nennen.

Werden gesättigte bindige Bodenschichten belastet entsteht an der Oberfläche dieser eine zeitabhängige Setzung, die wiederum in die Sofortsetzung, die Primärsetzung (Konsolidationssetzung) und die Sekundärsetzung unterteilbar ist. Die Sofortsetzung wird bei teilgesättigten Bodenschichten größtenteils durch Kompression und das Auspressen von Porenluft aus den Porenräumen hervorgerufen. Bei gesättigten Bodenschichten ist die Sofortsetzung als vernachlässigbar klein zu beschreiben. Die Konsolidationssetzung wird bei gesättigten Bodenschichten durch das Entwässern der Bodenschicht unter der Wirkung des Porenwasserüberdrucks verursacht, welcher durch die Belastung hervorgerufen wird. Die Sekundärsetzung einer gesättigten Bodenschicht resultiert vorwiegend aus dem Scherkriechen der Bodenkörner und wird daher auch als Kriechsetzung bezeichnet (vgl. Abb. 7.19) (vgl. [264] und [265]).

Das Konsolidationsverhalten von schwach zersetzten, faserigen Torfen unterscheidet sich sehr von dem anderer bindiger Böden und wird stark durch den Gehalt, die Größe, die Herkunft und die Anordnung der Fasern im Bodengefüge beeinflusst (vgl. [195], [217], [266]).

Es zeichnet sich durch eine kurze primäre Konsolidation aus, auf die eine sehr lange andauernde sekundäre Kompression folgt. Die hohe Kompressibilität ist auf das Multi-Phasen-System dieser zurückzuführen, welches aus Makro- und Mikroporen besteht.

Zu Abschätzung dieses Spannungs-Dehnungs(-Setzungs)-Verhaltens von Böden werden Kompressionsversuche durchgeführt, bei denen Bodenproben auf verschiedene Arten (bspw. inkrementelle Spannungsänderung (Incremental Loading (IL)) o. konstante Vorschubgeschwindigkeit (Constant Rate of Strain (CRS)) zusammengedrückt werden.

Beim Oedometerversuch, der nach DIN EN ISO 17892-5:2017-08 [267] geregelt ist, wird eine Bodenprobe bei verhinderter Seitendehnung stufenweise einaxial belastet (IL) (s. Abschn. 9).

## 7.5 Eindimensionale Konsolidationstheorie

Die ersten wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich mit dem eindimensionalen Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Böden in Oedometern beschäftigten, sind auf Terzaghi [268] zurückzuführen.

Die von Terzaghi im Jahr 1925 [268] veröffentlichte Konsolidationstheorie gilt auch als Grundlage der modernen Bodenmechanik (vgl. [179]). Die auf eine eindimensionale Kompression (Gl. 7.10) anwendbare Theorie ermöglicht es Aussagen über den Konsolidationsprozess und damit über die zeitliche Entwicklung von Verformungen bzw. Festigkeitsänderungen von Böden, die infolge Porenwasserdruckabbau und damit inneren Belastungsänderungen (Spannungsänderungen zwischen Feststoff und Porenwasser) auftreten, zu treffen.

Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Differentialgleichung sind:

1. homogener und gesättigter Boden,
2. eindimensionale/r Spannungszustand/Entwässerung,
3. Boden und Wasser sind inkompressibel,
4. Gültigkeit des Gesetzes von Darcy [269],
5. lineare Abhängigkeit von Spannung und Porenzahl.

---


$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} [-] \quad (\text{Gl. 7.10})$$

$$c_v = \frac{k_f E_s}{\gamma_w} [m^2 a^{-1}] \quad (\text{Gl. 7.11})$$


---

Infolge der Entwässerung der Bodenprobe nimmt der Porenwasserdruck  $u$ , der zum Zeitpunkt  $t=0$  die gesamte Spannung überträgt, mit zunehmender Zeit  $t$  ab und die effektiven Spannungen steigen unter einer Abnahme der Porenzahl  $e$  an. Beträgt der Porenwasserdruck  $u \sim 0 \text{ kN/m}^2$  ist die Probe vollständig auskonsolidiert. Zur Berechnung der Konsolidationssetzung nach der Konsolidationstheorie muss der Konsolidationsbeiwert  $c_v$  (s. (Gl. 7.11)) bestimmt werden, der sich mit dem Steifmodul  $E_s$  und dem Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  ergibt.

Alternativ dazu entwickelten Casagrande [270] und Taylor [271] jeweils unterschiedliche graphische Verfahren auf der Basis von Kompressionsversuchen: a) über den Logarithmus der Zeit (log t-Methode) (Abb. 7.17) und b) über die Wurzel der Zeit ( $\sqrt{t}$ -Methode) (s. Abb. 7.18), zur Unterteilung der Gesamtsetzung in Primär- und Sekundärsetzung (bzw. zur graphischen Ermittlung des Konsolidationsbeiwertes  $c_v$  (vgl. [272], [273], [274]). [275] und [276] hingegen beobachteten ein Ende der Primärsetzungen – auf Grundlage des messbaren Porenwasserdrucks – erst deutlich später als nach den Zeitpunkten, die sich durch die von [270] und [271] entwickelten Verfahren ergeben. Weitere Auswerte-Methoden finden sich in [277].

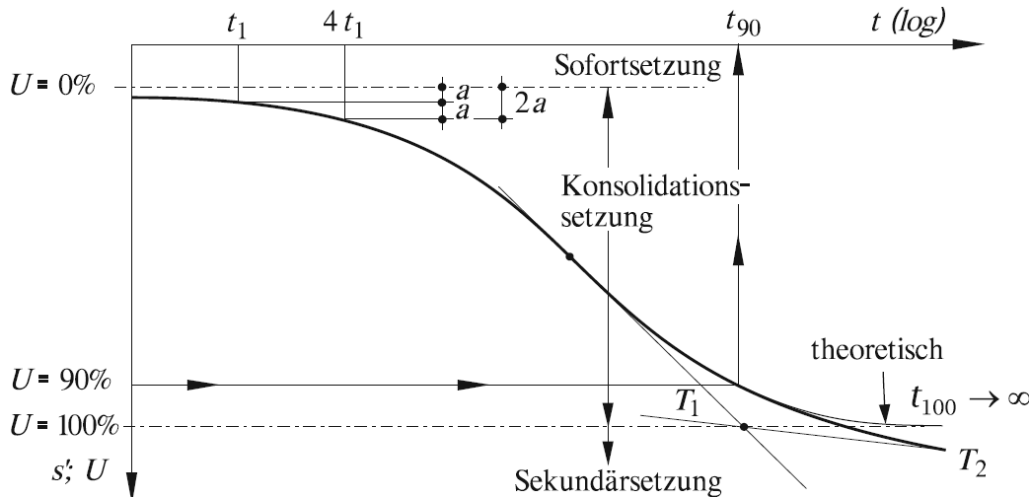


Abb. 7.17: Bestimmung der Konsolidationszeit nach der log t-Methode [278] (aus [279]).

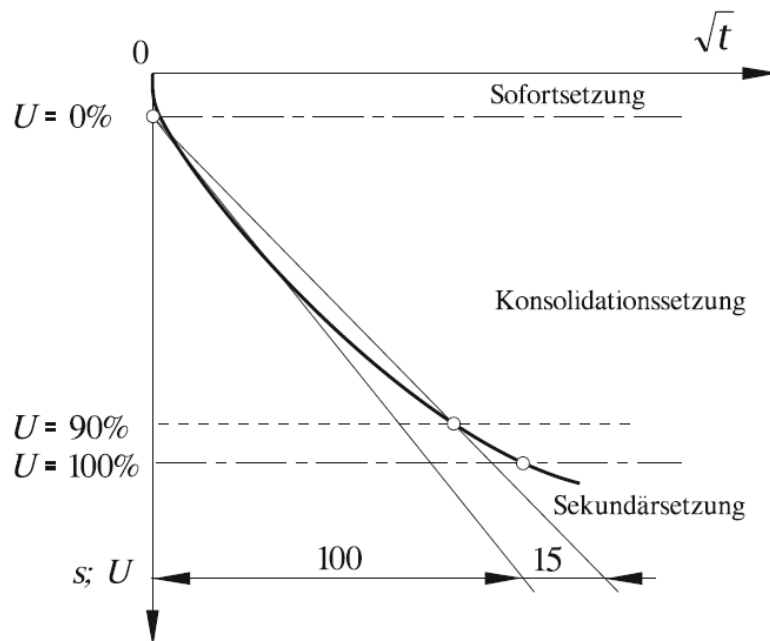
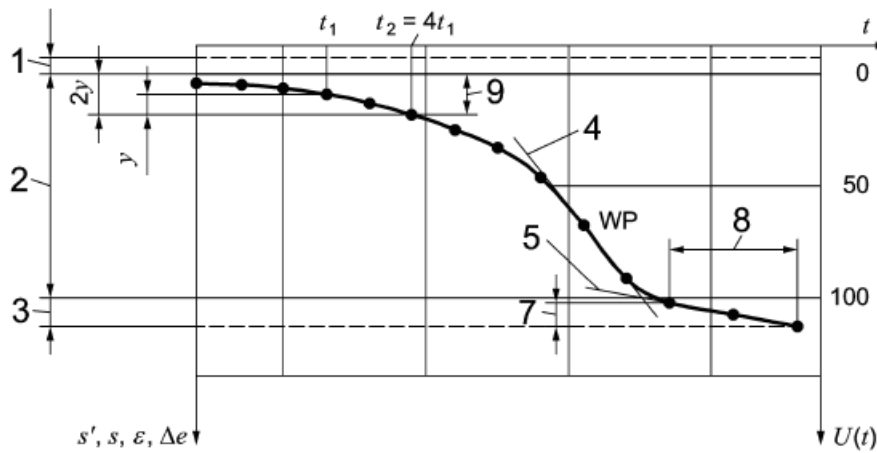
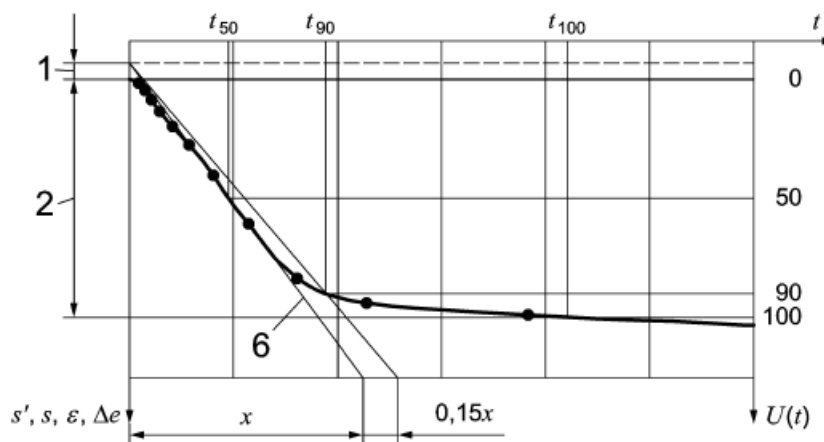


Abb. 7.18: Bestimmung der Konsolidationszeit mit der  $\sqrt{t}$ -Methode nach Taylor (aus [279]).



a) Zeitachse im logarithmischen Maßstab



b) Zeitachse im Quadratwurzel – Maßstab

**Legende**

- 1 Anfangszusammendrückung  $s_0$
- 2 Primärzusammendrückung  $s_{100}$
- 3 Sekundärzusammendrückung  $s_\alpha$
- 4 Wendetangente im Bereich der Primärkonsolidation
- 5 Tangente an den linearen oder linearisierten Abschnitt im Bereich der Sekundärkonsolidation
- 6 Tangente an den linearen oder linearisierten Kurventeil im Bereich  $U \leq 50\%$  der Primärkonsolidation
- 7  $\Delta e$  zur Ermittlung des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$ , wenn die Zusammendrückung durch die Porenzahl dargestellt wird
- 8  $\Delta \log t$  zur Ermittlung des Kriechbeiwertes  $C_\alpha$
- 9 die nach 4-facher Zeit ( $4t_1$ ) verdoppelte Zusammendrückung ( $2y$ )

**Abb. 7.19:** Zeitlicher Verlauf der Zusammendrückung innerhalb einer Laststufe (aus DIN 18135:2012 [280], vgl. auch (EVB, 1993)).

Die ersten Methoden der Beschreibung der Konsolidation konnten die Diskrepanz zwischen Feldmessungen und Labordaten nicht schließen, die auf verschiedenen Annahmen der Konsolidationstheorie (u. a. konstanter Durchlässigkeitsbeiwert bzw. linearer Zusammenhang der Porenzahl-Spannungsbeziehung) beruhen, womit sich verschiedene Forscher von der Konsolidationstheorie zurückzogen (vgl. [281] und [282]) bzw. versuchten diese mit räumlichen/in situ-Annahmen zu modifizieren (vgl. [283], [284], [285]).

## 7.6 Sekundärsetzungen

Buisman [286] zeigte im Jahr 1936, dass bindiger Boden unter konstanten effektiven Spannungen, nach Abbau des Porenwasserüberdrucks, zunehmend komprimiert und die klassische Konsolidationstheorie zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Sekundärsetzungen nicht geeignet ist.

Der Anteil der Sekundärsetzung stellt sich nach [9]) bei nichtbindigen Böden als sehr gering dar – bei bindigen Böden hingegen als ausschlaggebend und kann mehr als 50 % der gesamten Setzung ausmachen.

Nach Holtz et al. [274] definierten Raymond et al. [287] und Mesri et. al. [288] (vgl. auch [289]) den sog. Kriechbeiwert („secondary compression index“)  $C_{\alpha}^5$  mit

---


$$C_{\alpha} = -\frac{\Delta e}{\Delta \log t} [-] \quad (\text{Gl. 7.12})$$


---

und Ladd et al. [290] den modifizierten Kriechbeiwert („modified secondary compression index“)  $C_{\alpha\epsilon}^6$  mit

---


$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \log t} [-] \quad (\text{Gl. 7.13})$$


---

Weiter entwickelten [291], [288] und [292] das  $C_{\alpha}/C_c$ -Konzept zur Beschreibung des Sekundärsetzungsverhaltens. Dieses folgert, dass der Verhältniswert von Kriechbeiwert  $C_{\alpha}$  und Kompressionsbeiwert  $C_c$  nach (Gl. 7.14) zwar bodenabhängig ist, aber unabhängig vom äußeren Spannungszustand.

---


$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma} [-] \quad (\text{Gl. 7.14})$$


---

Analog dazu formulierte [293] den sog. Zähigkeitsindex  $I_v$  [-], der dem Verhältniswert  $C_{\alpha}/C_c$  entspricht (vgl. auch Kompressionskonstanten  $C$  bzw.  $C_{10}$  [294]).

---

<sup>5</sup> Neigung des linearen bzw. linearisierten Abschnittes der Zeit-Porenzahllinie (log t-e-Linie) im Bereich der Sekundärkonsolidation (vgl.  $C_{\alpha}$  nach DIN 18135:2012 [284])

<sup>6</sup> Neigung des linearen bzw. linearisierten Abschnittes der Zeit-Zusammendrückungs-Linie (log t- $\epsilon$ -Linie) im Bereich der Sekundärkonsolidation (vgl.  $C_{\alpha,\epsilon}$  nach DIN 18135:2012 [284])



[262] legen dar, dass die Kriechsetzungen den Anteil der Primärsetzungen übersteigen können, womit sich der s-förmige-Verlauf über den logarithmischen Verlauf der Zeit nicht darstellt. Weiter bestehen nach [12] Unterschiede in der Begriffsdefinition. Verschiedene Autoren bezeichnen den Vorgang nach der primären Konsolidation als sekundäre Konsolidation, ungeachtet der Tatsache, dass die Setzungen über den Logarithmus der Zeit zunehmen können.

Da Torfe im natürlichen Zustand hohe Porenzahlen ausweisen, ergeben sich damit bei Belastung dieser hohe Kompressionsbeiwerte  $C_c$  und Kriechbeiwerte  $C_\alpha$ .

[295] bezeichnet das Kriechverhalten von Torfen beträchtlicher als das anderer Böden mit Verhältniswerten  $C_\alpha/C_c$  von 0,052 [295] bzw.  $0,06 \pm 0,01$  [-] [296]. Weiter ergeben sich, bedingt durch die hohe Durchlässigkeit, zeitlich kurze aber große Primärsetzungen. [10] geben für einen faserigen Torf  $C_\alpha/C_c$ -Werte von 0,045 [-], mit einer Spanne von 0,00034 bis 0,11 [-], welche die nach [292] festgestellte Spanne von 0,02-0,10 [-] geringfügig unter- bzw. überschreitet (vgl. auch [297]). Die Tab. 7.6 zeigt eine Zusammenstellung weiterer  $C_\alpha/C_c$ -Werte mit Wassergehalten und  $k_f$ -Werten nach [295].

**Tab. 7.6: Wassergehalte, Durchlässigkeiten und  $C_\alpha/C_c$ -Werte verschiedener Torfvorkommen (nach [295]).**

Torf [Bez.]	Wassergehalt w [M.-%]	$k_f$ -Wert (vertikal) [m/s]	$C_\alpha/C_c$ [-]	Autor/en
Fibrous peat	850	$4 \times 10^{-6}$	0,06-0,10	[219]
Peat	520	-	0,061-0,078	[298]
Amorphous and fibrous peat	500-1.500	$1 \times 10^{-7}$ - $10^{-6}$	0,035-0,083	[236]
Canadian muskeg	200-600	$1 \times 10^{-5}$	0,09-0,10	[299]
Amorphous to fibrous peat	705	-	0,073-0,091	[300]
Peat	400-750	$1 \times 10^{-5}$	0,075-0,085	[301]
Fibrous peat	605-1290	$1 \times 10^{-6}$	0,052-0,072	[302]
Fibrous peat	613-886	$1 \times 10^{-6}$ - $10^{-5}$	0,06-0,085	[303]
Amorphous to fibrous peat	600	$1 \times 10^{-6}$	0,042-0,083	[8]
Fibrous peat	660-1.590	$5 \times 10^{-7}$ - $10^{-5}$	0,06	[304]
Dutch peat	370	-	0,06	[305]
Fibrous peat	610-850	$6 \times 10^{-8}$ - $10^{-7}$	0,052	[295]

Die Tab. 7.7 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Korrelationen zum Kompressionsbeiwert  $C_c$  [-] von Torfen (vgl. auch Korrelationen zum Kompressionsbeiwert  $C_c$  von [203]).

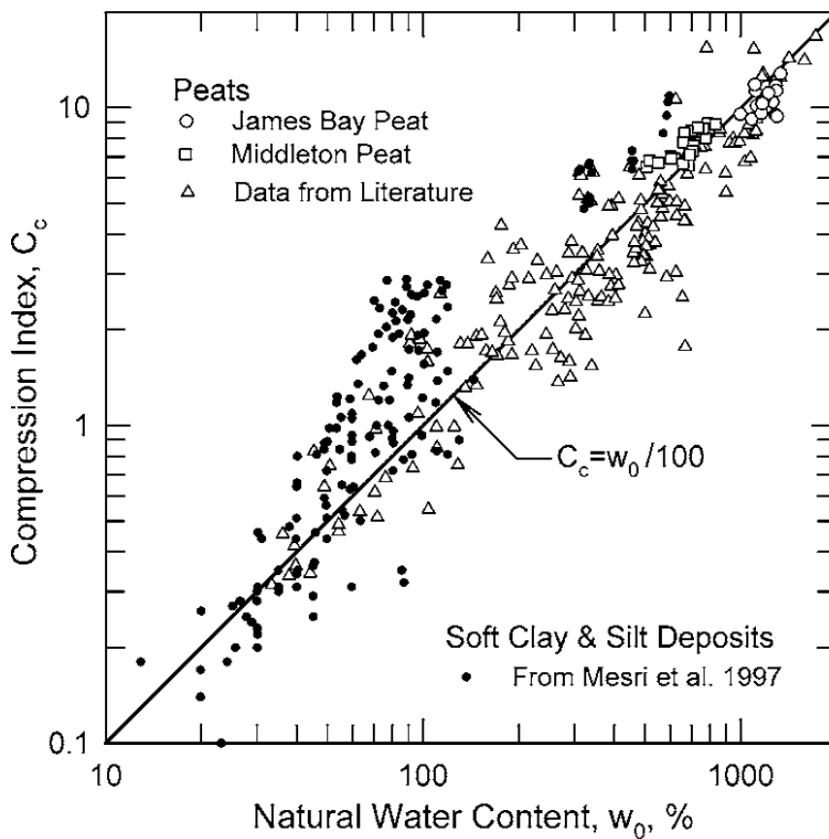
**Tab. 7.7: Empirische Korrelationen zu Kompressionsbeiwerten von Torf (nach [218]).**

Gleichung	Autor/en
$C_c = 0,0115 w_n$	[306]
$C_c = 0,086 w_n$	[307]
$C_c = 0,013 (w_n - 7)$	[308]
$C_c = 0,00782 w_n^{1,07}$	[308]
$C_c = 0,62 (e_0 - 0,56)$	[308]
$C_c = 0,370 e_0^{1,17}$	[308]
$C_c = 0,5(e_0 - 1)$	[307]
$C_c = 0,370 p_d^{-1,37}$	[308]

Hierin sind:

- $C_c$ = Kompressionsbeiwert [-]
- $w_n$ = natürlicher Wassergehalt [-]
- $e_0$ = natürliche Porenzahl [-]
- $p_d$ = Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]

Die Abb. 7.20 zeigt eine Darstellung der Kompressionsbeiwerte aus Untersuchungen von [195] und [295] und Literaturwerten in Abhängigkeit von dem Wassergehalt mit entsprechender Korrelation (vgl. auch [276] mit Untersuchungen an norddeutschem Klei).



**Abb. 7.20: Kompressionsbeiwerte in Abhängigkeit von dem Wassergehalt (aus [195] mit Werten aus [295] und anderen Literaturwerten).**

## 7.7 Tertiärsetzungen

Die durch Auflast hervorgerufene Volumenänderung, die bei der einaxialen Kompression eintritt, entsteht durch das Abfließen des Wassers in gesättigtem Zustand (Zwei-Phasen-Gemisch) (bzw. das Ausströmen von Luft, wenn vorhanden (Drei-Phasen-Gemisch)) aus den Porenräumen des Bodenkörpers. Darauf werden die vorher mit Porenwasser gefüllten Porenräume mit Bodenpartikeln gefüllt, die ihre Lage im Verlauf der Kompression fortschreitend verändern. In schwach zersetzten Torfen unterliegen die Fasern im Verlauf der Kompression des Bodenkörpers einer Volumenreduzierung [218]. Weiter kann während dem Prozess der Konsolidation, die Durchlässigkeit eines Torfes um den Faktor  $10^3$  abnehmen [8].

Basierend auf Langzeitversuchen an Torfen kann nach [8], die Konsolidation von Torf in der Auftragung der Setzung gegen die Zeit ( $\log t$ ), in 4 Schritte (vgl. Abb. 7.21) unterteilt werden:

1. Sofortsetzung (instantaneous strain)  $\varepsilon_i$  [-], die direkt nach Lastaufbringung eintritt und vermutlich auf die Kompression von Luftporen und die elastische Kompression des Torfs zurückzuführen ist,
2. Primärsetzung (primary strain)  $\varepsilon_p$  [-], welche sehr ausgeprägt ist und bis zu einer Zeit  $t_a$  [min] anhält,
3. Sekundärsetzung (secondary strain)  $\varepsilon_s$  [-], die in einem linearen Zuwachs der Setzungen über den logarithmischen Verlauf der Zeit zeigt und mehrere Potenzen der Zeit anhalten kann bis zum Zeitpunkt  $t_k$  [min],
4. Tertiärsetzung (tertiary strain)  $\varepsilon_t$  [-], welche sich durch einen Anstieg der Setzungen im Anschluss an die Sekundärsetzung auszeichnet, im Endzeitpunkt nicht definierbar ist, und andauert bis der Kompressionsprozess abgeschlossen ist.

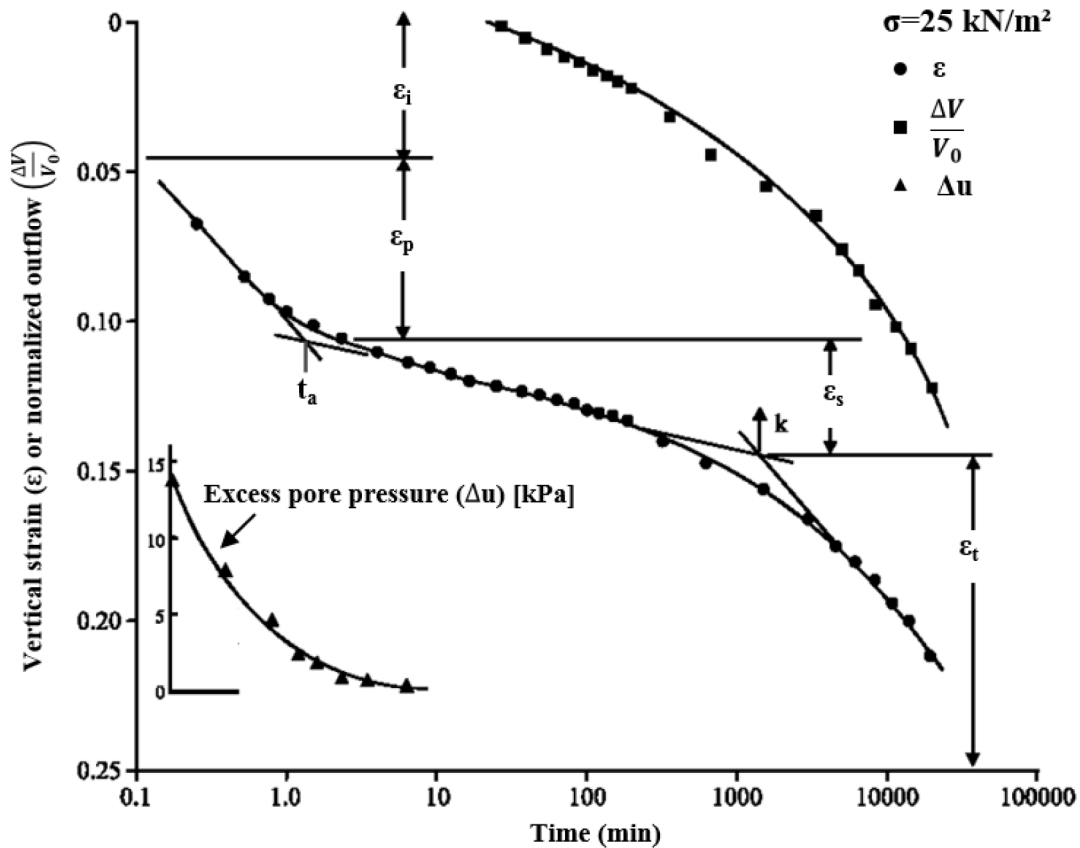


Abb. 7.21: Zeit-Zusammendrückungs-, -Porenzahl und -Porenwasserdrucklinien (halblog. Darstellung) (aus [8] (nachbearbeitet)).

Weitere verschiedene Autoren (vgl. [10], [11] und [12]), berichten neben [8] über Tertiärsetzungen bei Torfen, die bei der Durchführung von Oedometerversuchen auftraten und sich durch einen Anstieg der inkrementellen Setzungen im Anschluss an die Sekundärsetzungen über den logarithmischen Verlauf der Zeit ausweisen (vgl. auch [309], [310], [311], [312]). [313] bzw. [314] und [315] hingegen berichten über Tertiärsetzungen bei fluvialen Sedimentböden (Schlick) aus dem Hafenbecken der Hamburger Speicherstadt, mit vergleichsweise zu Torfen geringen Wassergehalten  $w$  und auch organischen Anteilen nach Glühen  $V_{gl}$  ( $w \sim 100\%$  bzw.  $V_{gl} \sim 5 \text{ M.}\%$ ).

Die Abb. 7.22 zeigt die Kompressionsparameter bezogene inkrementelle Sofort- und Primärsetzung (Instantaneous and Primary Strain)  $\varepsilon_i + \varepsilon_p$  [-]<sup>7</sup> und die Kriechbeiwerte der sekundären bzw. tertiären Setzung (rate of secondary compression bzw. tertiary compression)  $\alpha_1$  bzw.  $\alpha_2$  [-] (vgl.  $C_\alpha$  [-] nach DIN 18135:2012-04 und s. (Gl. 7.15)), die von [8] an faserigen bzw. amorphem Torf/en mit den Bodenkennwerten nach Tab. 7.8 durch Oedometerversuche ermittelt wurden.

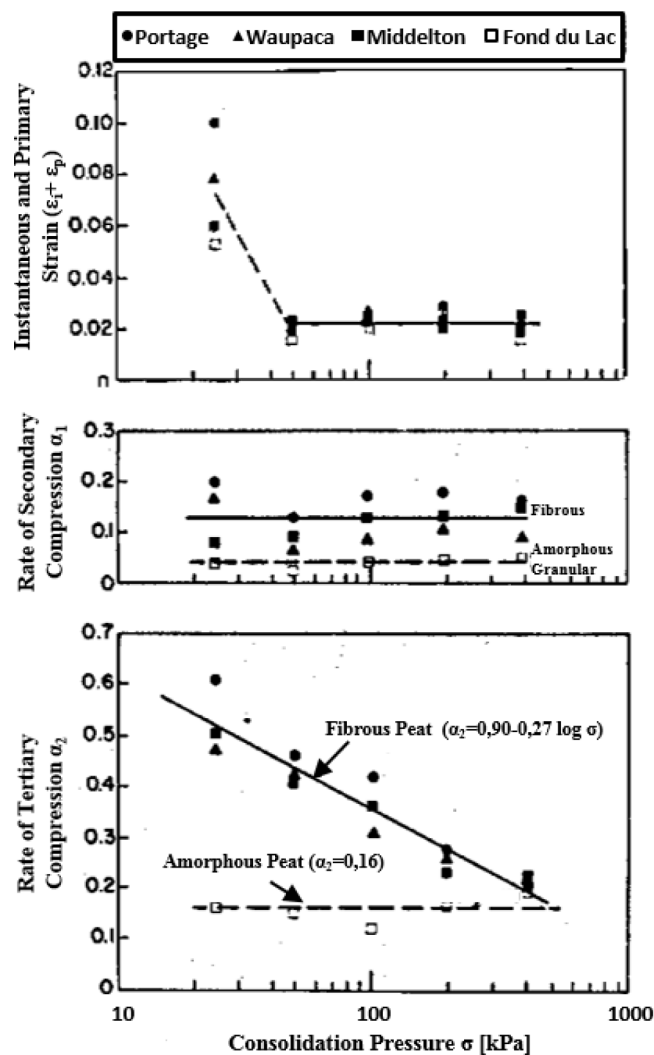
$$\alpha_1 = \alpha_2 = C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} [-] \tag{Gl. 7.15}$$

<sup>7</sup> Die Dehnungen  $\varepsilon_i + \varepsilon_p$  sind nur für den Portage Peat als Mittelwert aus 4 Einzelversuchen angegeben. Bei den restlichen Torfen konnte  $\varepsilon_p$  nicht ermittelt werden bzw. war nicht erkennbar, daher ist hier nur  $\varepsilon_i$  anstelle  $\varepsilon_i + \varepsilon_p$  eingetragen.

Ersichtlich ist hier, dass die Verformungskomponente aus bez. ink. Sofort- und Primärsetzung  $\epsilon_i + \epsilon_p$  [-] bzw. die bez. ink. Sofortsetzung  $\epsilon_i$  [-] in der ersten Laststufe ( $\sigma = 25,0 \text{ kN/m}^2$ ) für alle Versuchstorfe die höchsten Werte annimmt und zudem die höchste Streuung aufzeigt. In den nachfolgenden Laststufen ergibt sich dann ein Mittelwert von 0,02 [-] mit wesentlich geringerer Abweichung für die untersuchten Torfe (s. Abb. 7.22 o.).

Tab. 7.8: Bodenkennwerte der Versuchstorfe der Untersuchungen von [8] (nach [8]).

Herkunft [Ort]	Feuchtdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt w [%]	Aschegehalt [M.-%]	Korndichte ps [g/cm <sup>3</sup> ]	Fasergehalt [M.-%]	Klassifikation (nach [316])
Fond du Lac	1,02	240	39,8	1,94	20	sapric
Portage	0,96	600	19,5	1,72	31	hemic
Waupaca County	0,96	460	15,0	1,68	50	fibric
Middelton	0,91	510	12,0	1,41	64	fibric



**Abb. 7.22: Kompressionsparameter faseriger und amorpher Torf (aus [8] (nachbearbeitet)).**

Die Kompressionsbeiwerte der Sekundärsetzung  $\alpha_1$  belaufen sich für die faserigen Torfe über die Spannungserhöhungen im Mittel auf etwa 0,13 [-]. Der amorphe Torf hingegen zeigt kleinere und über die Spannungen konstant verlaufende  $\alpha_1$ -Werte von ca. 0,04 [-] (s. Abb. 7.22 m.). Ebenfalls konstant über den Spannungsverlauf stellen sich die Kompressionsbeiwerte der tertiären Setzungsanteile beim amorphen Torf mit  $\alpha_2=0,16$  [-] im Mittel dar. Die faserigen Torfe hingegen zeigen mit steigender Spannung sinkende  $\alpha_2$ -Werte, die sich in der letzten Laststufe ( $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup>) dem  $\alpha_2$ -Wert des amorphen Torfes annähern und über den Spannungsverlauf linear mit

---


$$\alpha_2 = 0,90 - 0,27 \log \sigma \quad [-] \qquad \qquad \qquad \text{(Gl. 7.16)}$$


---

beschrieben werden können.

Erklärungen für das Auftreten der tertiären Setzungen bei Laborversuchen, die nach etwa 1.000 bis 10.000 min eintreten, liefern [8] nicht. Weiter folgern sie aber, dass die üblichen Belastungszeiten für Untersuchungen des Langzeit-Setzungsverhaltens von Torf zu kurz sind.

Infolge dessen wurde die Tertiärsetzung auch als bei Laborversuchen auftretendes Phänomen bezeichnet [317]. [13] und [12] hingegen beobachteten Tertiärsetzungen wiederum bei Feldmessungen, womit die vorgenannte Annahme nicht zutreffend ist (vgl. Abb. 7.23).

Nach [8] kann man den Torf als Mehrphasensystem mit in Makro- und Mikroporen gebundenem Porenwasser betrachten. [318] beschreibt mit seiner Mikro-Makro-System-Theorie, dass sich die Mikroporen infolge des hydraulischen Gefälles, welches sich durch den Ausfluss des Porenwassers aus den Makroporen ergibt, in diese entwässern. Ist der Porenwasserdruck des freien Porenwassers mit dem Ende der Primärkonsolidation, also dem Beginn des Kriechens abgeschlossen, könnte dieser dagegen in den Mikroporen noch voll anstehen (vgl. [276]). [8] sehen dies durch den kontinuierlichen Abfluss von Porenwasser während ihrer Versuche bestätigt, der sich selbst bei einem nicht mehr messbaren Porenwasserdruckes darstellt.

Damit tritt eine Tertiärsetzung ein, wenn sich ein erneuter Porenwasserüberdruck ohne eine Erhöhung der Auflast ergibt. Wenn das durch die gleichbleibende Belastung der Bodenmatrix aus den Aggregaten der Mikroporen entweichende Porenwasser (bzw. Porenluft), welches durch einen Aufstau – dieser Prozess verstärkt sich durch die in den Bodenkörper eingebrachte Belastungen – ein höheres Druckniveau ausgebildet hat und dann aufgrund von Versagensmechanismen der rückhaltenden Strukturen unter höheren Drücken als denen der restlichen Umgebung austritt, ergeben sich höhere Abflüsse bzw. temporäre Aufweitungen der Dränwege, woraus dann Tertiärsetzung respektive Porenwasserabfluss resultieren können.

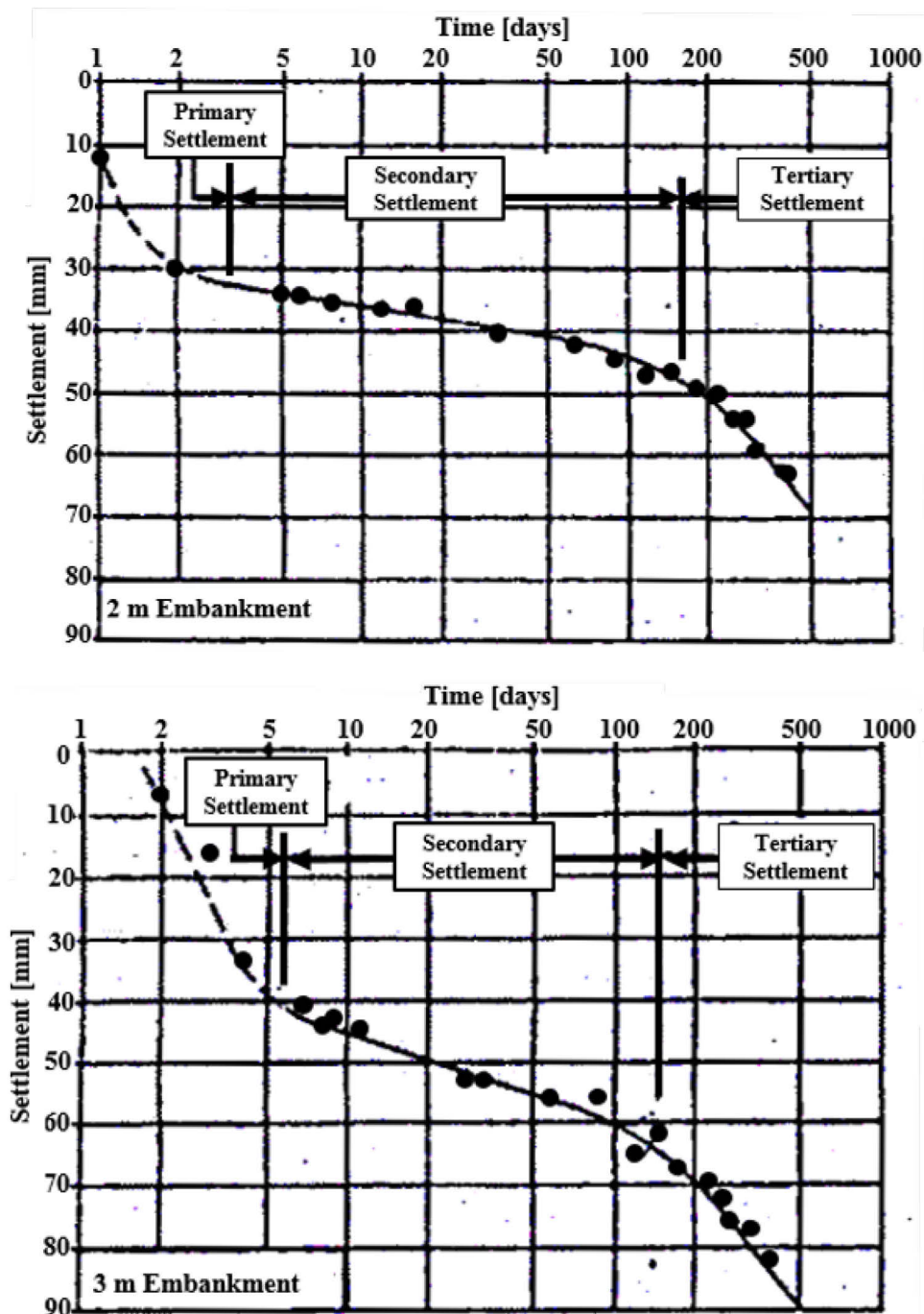


Abb. 7.23: Zeit-Setzungskurven von Dammschüttungen auf Torf (aus [319] (nachbearbeitet) nach [13]).

Untersuchungen von [315] zeigen mit bereits genannten Oedometerversuchen unter gleichzeitiger Porenwasserüberdruckmessung an fluvialen Sedimentböden, dass sich mit der Tertiärsetzung dieser, die im dargestellten Versuch (vgl. Abb. 7.24) etwa zum Zeitpunkt  $t_s$  einsetzt und sich mit einem Abfall der Zeit-Porenzahllinie und damit mit einem größeren Kriechbeiwert  $C_\alpha$  (hier:  $C_{\alpha t}$ <sup>8</sup>) darstellt, gleichzeitig ein Anstieg des Porenwasserüberdrucks  $\Delta u$  in  $[\text{kN/m}^2]$  verzeichnet wird,

<sup>8</sup>  $C_{\alpha t}$  = Kriechbeiwert der Tertiärsetzung nach [323], vgl.  $\alpha_2$  nach [216]



der mit dem Einsetzen der Kriechphase bei  $t \sim 2$  h mit  $\Delta u = 0$  kN/m<sup>2</sup> abgebaut war. Mit dem Erreichen des Peaks des Porenwasserüberdrucks  $\Delta u$  im Bereich  $\Delta u_{\max}$  zeigt die Zeit-Porenzahllinie dann einen Wendepunkt und nimmt mit dem sinkenden Porenwasserüberdrucks  $\Delta u$  Kriechbeiwerte  $C_\alpha$  der Sekundärsetzung (Bereich „Kriechen“) an. Somit erfolgt nach der Definition Terzaghi's [268] eine weitere Konsolidation nach Abschluss der Primärsetzung (Konsolidationssetzung) bzw. Sekundärsetzung (Kriechsetzung), die vermutlich aus einem verzögerten Porenwasserdruckabbau der Mikroporen resultiert.

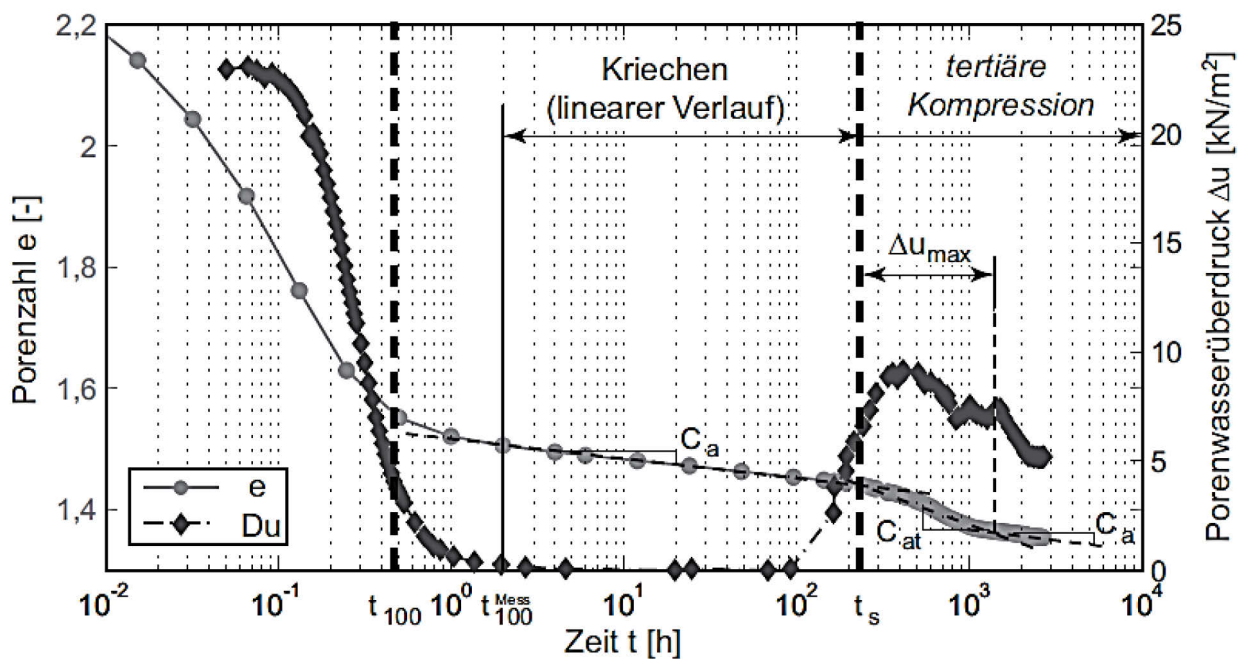
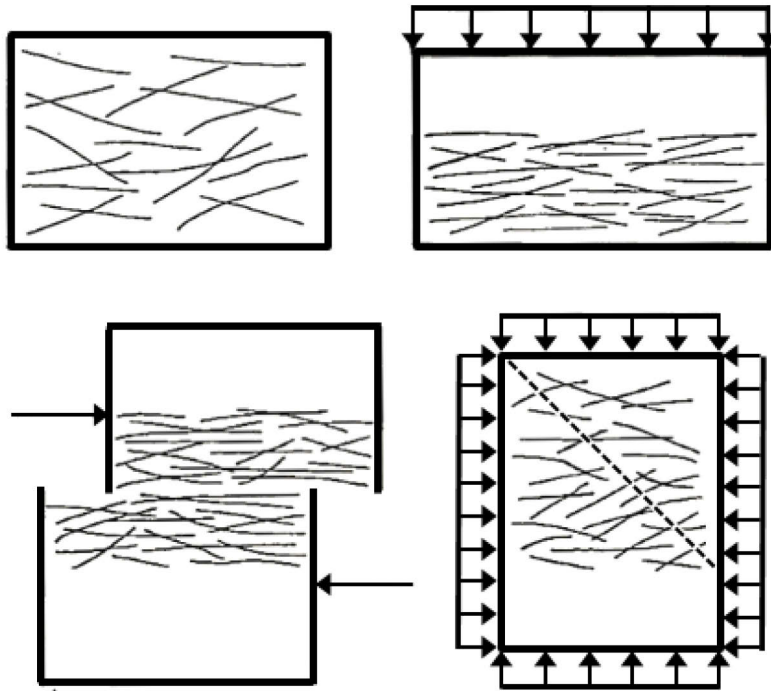


Abb. 7.24: Porenzahl  $e$  und Porenwasserüberdruck  $\Delta u$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  bei einem eindimensionalen Kompressionsversuch an Sedimentboden (aus [315]).

## 7.8 Scherverhalten

Das Scherverhalten ist bei Torf besonders abhängig vom Anteil und der Struktur der enthaltenen Fasern, d. h. vom Zersetzungsgrad, der den Faseranteil beeinflusst. [234], [299], [320] und [321] beschreiben die Scherfestigkeit von Torf als vorwiegend reibungsbedingt mit hohen Reibungswinkeln und verhältnismäßig geringen Kohäsionsanteilen.

Ein faseriger schwach zersetzter Torf hingegen mobilisiert die Scherkräfte größtenteils durch die Fasern, die in natürlichem Zustand als verstreut und überlappend bzw. grob ausgerichtet (s. Abb. 7.25) zu beschreiben sind. In dieser Form sind sie von Wasser umgeben und der Boden zeigt hier im Ausgangszustand niedrige Scherfestigkeiten. Mit der einaxialen Zusammendrückung des Bodenkörpers richten sich die Fasern fast rechtwinklig zur einwirkenden Vertikallast aus und es werden höhere von der Struktur der Fasern abhängige Scherfestigkeiten aufgebaut (vgl. [218]).



**Abb. 7.25:** o.l.: Fasern in losem Zusammenhang (unkomprimiert), o.r.: Faserverteilung unter Lasteinwirkung, u.l.: Faserverteilung bei direkter Scherung, u.r.: Faserverteilung unter triaxialer Schereinwirkung (aus [218] (nachbearbeitet)).

Bei einem zersetzten Torf ist das Scherverhalten ähnlich dem mineralischer Böden zu beschreiben – zurückzuführen auf die Kohäsion, die zwischen den feinen, stark zersetzten Torfanteilen und körnigen Bodenbestandteilen wirkt. Die Scherfestigkeit stark zersetzter Torfe ist aufgrund der nicht bzw. der mit der Zersetzung abnehmenden Stabilisierungswirkung als sehr niedrig einzuordnen.

## 7.9 Einbau von organischen/organikhaltigen Böden

Zum Einbau von unbehandelten organischen/organikhaltigen Böden wird auf [167] verwiesen und in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. [167] untersuchten das Einbauverhalten unbehandelter organischer Böden aus dem bayerischen Raum und geben verschiedene Empfehlungen für die Verfahrensweise mit genannten Aushüben an.

## 7.10 Numerische Näherungsverfahren von Bodenverformungen – Stoffgesetze

In den weiterentwickelten numerischen Berechnungen der Geotechnik<sup>9</sup> werden mathematisch-physikalische Modellierungen verwendet, um den Baugrund mit seinen Stoffeigenschaften nachzubilden. Hierzu stehen verschiedene Stoffgesetze zur Verfügung, die das mechanische Verhalten von Böden, also die Zusammenhänge zwischen Spannungen und Dehnungen bzw. auch zeitliche oder thermische Effekte, mathematisch abbilden (vgl. [322]). Nach [322] „ist grundsätzlich festzustellen, dass es das „richtige Stoffmodell“ nicht gibt“. Vielmehr stellen alle entwickelten Formulierungen Näherungen dar, und häufig kann mit unterschiedlichen Ansätzen das reale Verhalten des Bodens in ähnlicher Qualität beschrieben werden.“ [ [322], S. 11] (vgl. auch [323] und [324]). Damit hat die Wahl des passenden Modells einen grundlegenden Einfluss auf die Ergebnisse der numerischen Berechnungen. Die Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse sind u. a. in [325], [326], [322] und [327] dargelegt. Für die Untersuchungen von Versagensmechanismen sind in der Regel „einfache“ Stoffmodelle wie z. B. Mohr-Coulomb ausreichend, dagegen werden für Verformungsberechnungen höherwertige Stoffgesetze benötigt mit denen sich auch ein nicht lineares Spannungs-Verformungs-Verhalten beschreiben lässt. Im Allgemeinen ist das Stoffverhalten von Boden als inhomogen und anisotrop zu beschreiben (vgl. [323] und [324]) – dies ist auch besonders für Torf zutreffend (vgl. Abschn. 7.2).

In den meisten Stoffmodellen finden die Materialparameter der konventionellen Bodenmechanik Verwendung, wobei auch Materialkenngrößen verwendet werden, die allein durch das jeweilige Stoffmodell definiert werden (vgl. [322]). Nach [322] werden die Grenzbedingungen von Stoffmodellen durch die klassischen effektiven Scherparameter Reibungswinkel  $\varphi$  und Kohäsion  $c$ , oder durch Hilfsgrößen, die sich auf diese zurückführen lassen, bestimmt. Die Steifigkeit wird zumeist mit den gebräuchlichen Parametern Elastizitätsmodul  $E$  bzw. Steifigkeitsmodul  $E_s$  bzw. auf Kompressionsgesetzen basierenden Parametern (Kompressionsbeiwert  $C_c$  und Schwellbeiwert  $C_s$  – logarithmischer Ansatz nach Terzaghi, Referenzsteifigkeit  $v_e$  und Exponent  $w_e$  – Exponential-Ansatz nach Ohde) formuliert. Weiter werden bei manchen Stoffmodellen auch Ansatzfunktion verwendet deren Stoffparameter durch „Curve Fitting“ bestimmt werden (vgl. [322]).

Zu den häufig verwendeten Stoffmodellen zählen die linear-elastischen Stoffmodelle, Stoffmodelle mit veränderlichen Elastizitätsmoduln (elastisch-ideal-plastische Stoffmodelle) und erweiterte Stoffmodelle (anisotrope elasto-plastische, hypoplastische und zeitabhängige Stoffmodelle und Stoffmodelle mit erhöhter Steifigkeit bei kleinen Dehnungen) (vgl. [322], [328], [329], [330]).

---

<sup>9</sup> für eine Übersicht der numerischen Verfahren s. [332] und [333].

Um das bodenmechanische Verhalten von Torf zu verstehen bzw. um dieses mathematisch zu beschreiben müssen grundlegende Kenntnisse über das mechanische Materialverhalten von diesem bestehen. Abhängig vom Zersetzungsgrad kann dieser als isotrop oder anisotrop betrachtet werden, wobei die Anisotropie bei schwach zersetzten Torfen auftritt (vgl. [234]) und mit steigendem Anteil der Fasern zunimmt (vgl. [207]). [263] entwickelten jeweils ein rheologisches Modell für amorphes und faseriges Torf beruhend auf der Klassifikation nach [331] mit der Berücksichtigung der Makro- und Mikroporen beim faserigen Torf. [332] zeigt ebenfalls ein für Torfe entwickeltes Stoffmodell (Mic-Mac Modell) mit Einbeziehung der Makro- bzw. Mikroporen dieser (vgl. auch [333] und [334]).

Das Stoffverhalten konditionierter Torfe bedarf aus materialwissenschaftlicher Sicht einer gesonderten Betrachtung und Bewertung.

## 8 Bodenverbesserung mit Bindemitteln

Durch die Zugabe von Zugabestoffen in Form von Bindemittel und die Vermischung dieser mit dem anstehenden Baugrund entsteht ein modifizierter Boden im Sinne eines Baustoffes, der gegenüber dem Ausgangsboden verbesserte (technische) Eigenschaften besitzt. Besonders vorteilhaft ist die Tatsache, dass der anstehende Boden ressourcenschonend verwendet werden kann, weil mit einer Wiederverwendung ein Bodenaustausch/Bodenersatz, mit Mehraufwand für Aushub, Abtransport und Deponierung, entfallen kann.

Das Verfahren der Bodenverbesserung wird oberflächennah bei nicht einbaufähigem, „nassem“ feinkörnigem Schüttmaterial und bei entsprechenden tiefliegenden Horizonten angewendet. Bindige Böden, die einen zu hohen Wassergehalt aufweisen und entsprechende gemischtkörnige Böden lassen sich nicht ordnungsgemäß verdichten. Durch die Zugabe von Kalk, Kalkhydrat, Zement oder Mischbindern können bodenphysikalische Eigenschaften wie Kornaufbau, Wassergehalt, Plastizität, Quellvermögen, Durchlässigkeit, Scherfestigkeit und Verdichtbarkeit so verändert werden, dass das behandelte Bodenmaterial einbaufähig wird und – insbesondere bei einer qualifizierten Bodenverbesserung oder Tiefreichenden Bodenstabilisierung – als Baugrund geeignet ist bzw. dazu entwickelt wird.

Die physikalischen Veränderungen im Boden beruhen auf verschiedenen Veränderungen, die sich durch die Bindemittelzugabe ergeben. Zu nennen sind hier beispielsweise die Veränderungen bei der Ionenbelegung von Tonmineralen, die chemische und physikalische Bindung von Wasser, das mineralische Abbinden zugegebener Bindemittel und die Neubildung und Auskristallisation neuer Mineralarten (vgl. [335]).

Die Abb. 8.1 zeigt die Bereiche der Korngrößenverteilungen für die Anwendung der unterschiedlichen Bindemittel (vgl. zudem Kornverteilung für die Anwendbarkeit verschiedener Bindemittel in [336]).

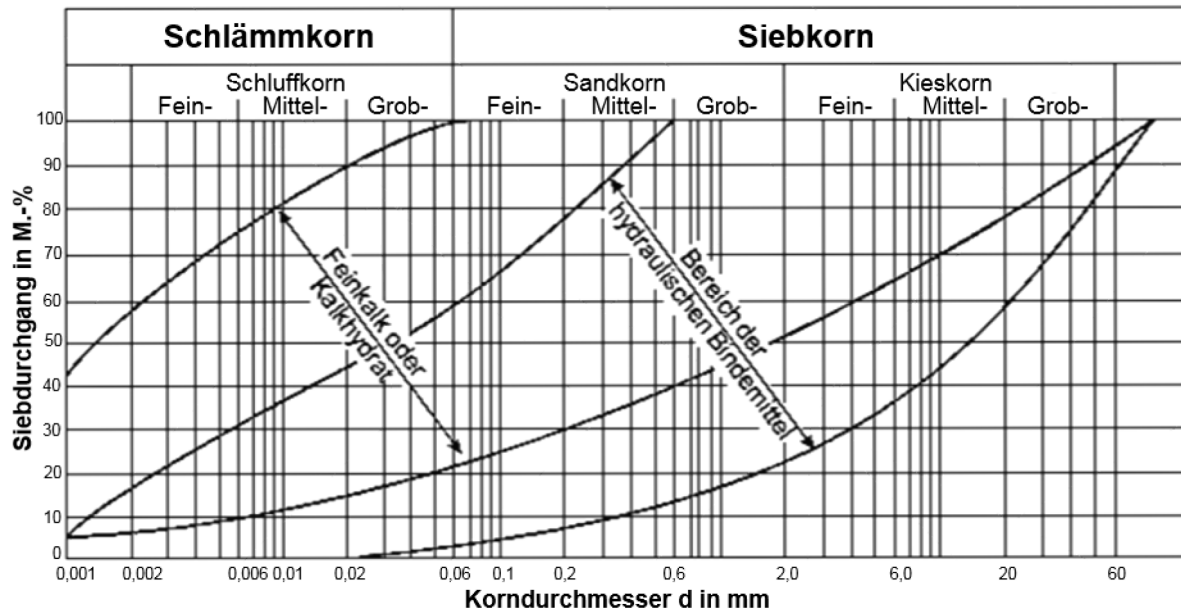


Abb. 8.1: Bereiche der Korngrößenverteilungen für die Behandlung mit Kalk und hydraulischen Bindemitteln (aus [337] (nachbearbeitet))

## 8.1 Tiefreichende Bodenstabilisierung mit Bindemitteln

Anwendbar ist die tiefreichende Bodenstabilisierung (vgl. Abschn. 3.2.7) auf ein weites Spektrum an Böden – Ton, tonige Sande, sandige Schluffe, organische Tone und Torf (vgl. [63] und [64]). [338] gibt die Anwendungsgrenzen mit weichen bis breiigen Böden mit hoher Plastizität, lockeren und sandigen Feinböden und organischen Böden an.

Ist Organik im Boden enthalten, ergeben sich jedoch mit den gängigen Zugabemengen von Bindemitteln für mineralische Böden deutlich geringere Stabilisierungseffekte. Nach Untersuchungen von [65] und [66] haben der pH-Wert, der Glühverlust, der Wassergehalt und der Feinanteil eines Bodens erheblichen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung. Nach [111] sind bindige Böden bereits mit einem geringen Anteil an organischen Bestandteilen für eine Verfestigung mit Zement ungeeignet.

Die Abb. 8.2 zeigt die Entwicklung der Verwendung verschiedener Bindemittel bei der tiefreichenden Bodenstabilisierung im schwedischen Raum seit den 70er Jahren und die Tab. 8.1 die Auswirkung verschiedener Faktoren auf die Festigkeitsentwicklung des stabilisierten Bodens unterteilt in die Bindemittleigenschaften, Bodentypen, Mix-Methodik und Aushärtungsverhältnisse.

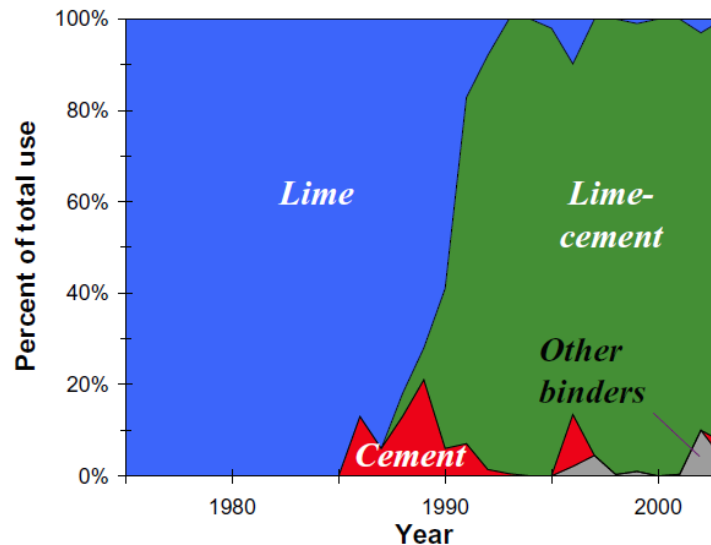


Abb. 8.2: Entwicklung der Wahl des Bindemittel bei der Tiefreichenden Bodenstabilisierung (aus [63]).

Zudem zeigen sich bei der tiefreichenden Bodenstabilisierung verschiedene bindemittelunabhängige festigkeitsbeeinflussende Faktoren zu den nach [339] und [340] neben den Eigenschaften des Bindemittels (Typ, Qualität, Anmachwasser) die Bodencharakteristik (physische, chemische und mineralogische Eigenschaften des Boden, Organikgehalt und Wassergehalt) die Vermischungsbedingungen (Vermischungsgrad, Vermischungsdauer, Bindemittelanteil) und die in situ Bedingungen der behandelten Bodenmatrix (Witterung, „unbelastete“ Abbindezeit, Überschüttungslasten) zählen (s. Tab. 8.1).

Tab. 8.1 Festigkeitsbeeinflussende Faktoren bei der Anwendung der tiefreichenden Bodenstabilisierung (aus [14] nach [339] und [340]).

I. Characteristics of binder	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Type of binder</li> <li>2. Quality</li> <li>3. Mixing water and additives</li> </ol>
II. Characteristics and conditions of soil (especially important for clays)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Physical, chemical and mineralogical properties of soil</li> <li>2. Organic content</li> <li>3. potential Hydrogen (<math>pH</math>) of pore water</li> <li>4. Water content</li> </ol>
III. Mixing conditions	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Degree of mixing</li> <li>2. Timing of mixing/re-mixing</li> <li>3. Quantity of binder</li> </ol>
IV. Curing conditions	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Temperature</li> <li>2. Curing period</li> <li>3. Humidity</li> <li>4. Wetting and drying/freezing and thawing, etc.</li> <li>5. Overburden pressure</li> </ol>

## 8.2 Bindemittel

### 8.2.1 Zement

Nach [341] werden zur Stabilisierung von Böden mit Zement überwiegend Portlandzemente eingesetzt, die auch hydrophobiert werden um den Reaktionszeitpunkt besser zu regulieren, da diese verzögert reagieren und im Verfestigungsvorgang weitgehend witterungsunabhängig sind [335]. Unter den deutschen Normzementen (s. DIN EN 197-1:2011 [342]) ist Portlandzementklinker der wichtigste hydraulisch reagierende Bestandteil und besteht hauptsächlich aus den Klinkerphasen: Tricalciumsilicat ( $C_3S$ ), Dicalciumsilicat ( $C_2S$ ), Tri-calciumaluminat ( $C_3A$ ) und Calciumaluminatferriten ( $C_4AF$ ). [343]. Zur chemischen Zusammensetzung siehe auch [344].

Durch die Reaktion mit dem Porenwasser kommt es zu einer Hydratation dieser Komponenten zu hydratisiertem Calciumsilikat, Calciumaluminat und als Nebenkomponente kann Calciumhydrat ( $Ca(OH)_2$ ) entstehen. Die hydratisierten Calciumsilikate und Calciumaluminat bilden im Porenraum eine skelettartige Zementsteinmatrix aus, in der die Bodenpartikel bzw. gebildete Bodenaggregate fixiert werden. Infolge der Hydratation des Zementes steigt der pH-Wert des Porenwassers stark an, womit sich Silikate und Aluminat aus den tonigen Partikeln bzw. aus den amorphen Oberflächen lösen. Darüber hinaus finden langsam ablaufende Reaktionen mit dem Calciumionen statt (puzzolanische Reaktionen), die zu einer Erhärtung oder Strukturumbildungen der Bodenmatrix führen. Die wesentliche Reaktion wird über die Zementmenge und das verfügbare Porenwasser im Boden gesteuert, wohingegen die puzzolanische Reaktion von der Mineralzusammensetzung des Bodens abhängig sind (vgl. [341]).

Nach [4], mit der Entwicklung für Mixed-in-Place, bzw. [335] u. a. ist Zement für das Verfestigen und Verbessern von granularen d.h. von grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden geeignet, da die hier vorhandenen Oberflächen vom Bindemittel erreicht, d.h. ummantelt werden können, womit, vergleichbar der Betonherstellung, die granularen Partikel miteinander „verklebt“ werden. Stark plastische Schluff- und Tonböden lassen sich hingegen nur schwer zerkleinern und mit Zement vermischen, da die Oberflächen der Tonminerale vom Bindemittel nicht erreicht werden können.

Jedoch besteht hier die Möglichkeit einer Vorbehandlung der feinkörnigen Böden mit Kalk um eine Krümelstruktur herbeizuführen. In organischen Böden wird die Zementreaktion durch die vorhandenen Huminsäuren behindert bzw. wirken diese erhärtungsverzögernd und festigkeitsmindernd (vgl. [345]). [346] führen aus, dass Huminsäuren, die in Moorwässern vorkommen, beispielsweise Beton nur schwach angreifen, da ihre Calciumsalze in Wasser nur wenig löslich sind.



Durch eine Bodenbehandlung mit Zement ergibt sich in bodenphysikalischer Hinsicht ein Anstieg der Festigkeit, der sich nach [347] fast proportional zur zugegebenen Zementmenge verhält. Steifemodul und Kohäsion nehmen mit der zunehmenden Erhärtung des Gemisches zu, wobei der Reibungswinkel bei nichtbindigen Böden nahezu unverändert bleibt und bei bindigen infolge der Strukturänderung ansteigt (vgl. [347]).

### 8.2.2 Kalk

Unter dem Begriff Kalk werden Produkte verstanden, die durch industrielle Veredelungsprozesse (Brennen/Löschen) gewonnen werden (vgl. [335]). Die Baukalke nach DIN EN 459-1:2015 [348] (s. Abb. 8.3) werden in Luftkalke und hydraulische Kalke unterteilt. Luftkalk hat keine hydraulischen Eigenschaften, verbindet sich mit atmosphärischem Kohlenstoff und erhärtet. Die DIN EN 459-1:2015 [348] unterteilt Luftkalke in Weißkalk (CL) und Dolomitkalk (DL), welche hauptsächlich Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) und/oder Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (bzw. Calciummagnesiumoxid ( $\text{CaMgO}_2$ ) und/oder Calciummagnesiumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$ ) ohne Zusatz von hydraulischen Stoffen oder Puzzolanen bestehen. Kalk mit hydraulischen Eigenschaften besteht vorwiegend aus Calciumhydroxid, Calciumsilikaten und -aluminaten (s. Abb. 8.3) und hat die Eigenschaft nach Mischen mit Wasser (unter Wasser) zu erstarren. Dieser wird wiederum in Natürlichen Hydraulischen Kalk (NHL), Formulierten Kalk (FL) und Hydraulischen Kalk (HL) unterteilt (vgl. auch [349]).

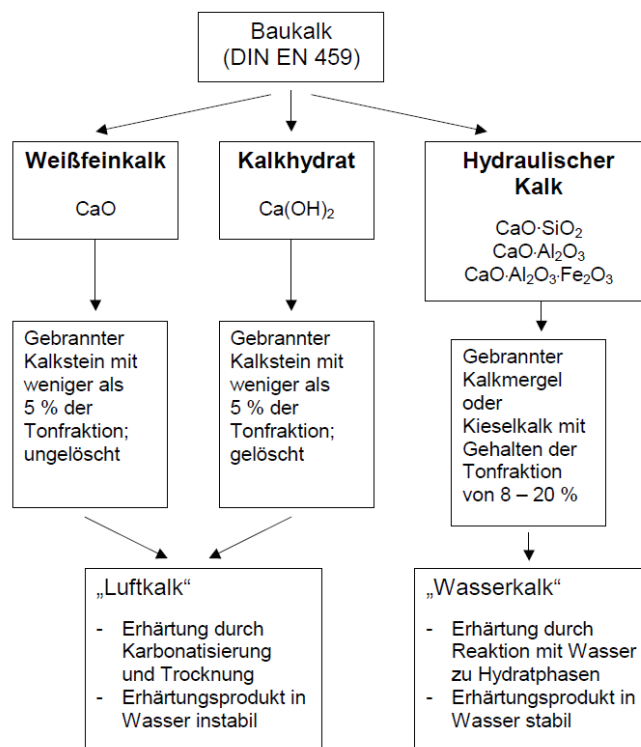
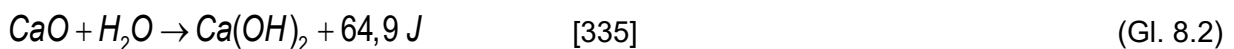
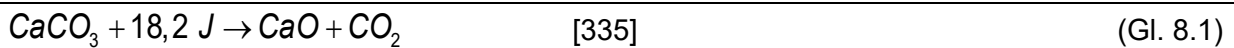


Abb. 8.3: Zusammensetzung der Baukalke nach DIN EN 459-1 [348] (aus [350]).

Eine Bodenbehandlung mit Kalk erzeugt in Böden Sofort- und Langzeitreaktionen, die entsprechend des Bodens und des Anwendungszwecks von der Art und Menge des Kalks beeinflusst werden können. Zumeist kommen Luftkalke als Branntkalk in ungelöschter Form (CaO) oder als gelöschter Kalk (Ca(OH)<sub>2</sub>) zum Einsatz.

Wird Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO<sub>3</sub>) gebrannt (Brenntemperatur ca. 1000 °C) entsteht ab Temperaturen von etwa 900°C Calciumoxid durch Austreibung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) (s.(Gl. 8.1) (vgl. [41]). Wird Branntkalk (CaO) mit Wasser vermischt reagieren diese unter starker Wärmeentwicklung (> 150°C [351]) zu Löschkalk (Ca(OH)<sub>2</sub>) (s.(Gl. 8.2).



Da der Branntkalk sofort mit dem Wasser reagiert, ist eine Anwendung in Böden, die für die Verarbeitung einen zu hohen Wassergehalt aufzeigen (vgl. [349]), von Nutzen. Durch die Zugabe von 1 kg CaO werden ca. 0,32 kg Wasser gebunden (vgl. [352] und [353]). Die Abnahme des Wassergehaltes  $\Delta w$  [-] kann nach [352] mit dem Anfangswassergehalt  $w_0$  [-] und dem Massenverhältnis Kalk zu Boden  $a_s$  [-] nach (Gl. 8.3) abgeschätzt werden.

---


$$\Delta w = w_0 - (w_0 - 0,32a_s) / (1 + 1,32a_s) \quad [-] \quad [352] \quad (\text{Gl. 8.3})$$


---

Weiter führt [354] aus, dass die Abnahme des Wassergehaltes durch Verdunstung infolge exothermer Reaktion mit

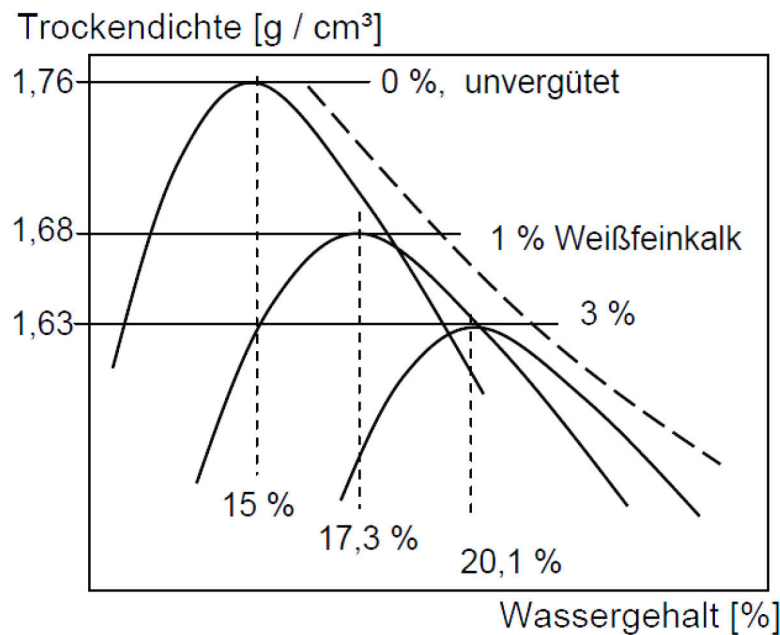
---


$$\Delta w = 0,45a_s \quad [-] \quad [354] \quad (\text{Gl. 8.4})$$


---

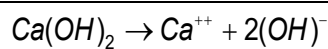
beschrieben werden kann. [341] gibt als Faustformel an, dass der Wassergehalt eines Bodens beim Einmischen von Branntkalk um das gleiche prozentuale Maß abnimmt. [38] gibt für Feinkalk eine Reduzierung des Wassergehaltes in Höhe des 2-fachen Kalkgewichtes an – für Kalkhydrat das 1-fache Kalkgewicht (vgl. hierzu auch [355]).

Durch die beschriebene Sofortreaktion ergibt sich infolge Saugspannungen eine Strukturänderung wobei Schluff- und Tonpartikel zu größeren Körnern aggregieren. Die Ausrollgrenze  $w_p$  erhöht sich, die Plastizität  $I_p$  wird reduziert und damit steigt die Konsistenzzahl  $I_c$  (vgl. [356] und [341]). Die Proctorkurve verschiebt sich zur nassen Seite, womit die Trockendichte sinkt und der optimale Wassergehalt zunimmt (vgl. Abb. 8.4).



**Abb. 8.4:** Verschiebung der Proctorkurve zur nassen Seite (aus [341]).

Das durch Löslichung entstandene Calciumhydroxid (bzw. direkt eingemischter Löslichkalk) dissoziiert im Bodenwasser (s. (Gl. 8.5)) und erhöht die Elektrolytkonzentration und den pH-Wert des Porenwassers (vgl. [357], [341]).



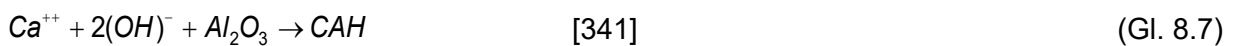
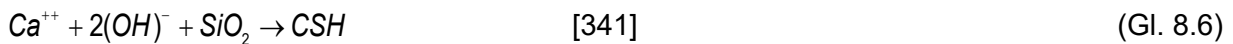
[341]

(Gl. 8.5)

Dadurch lösen sich Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aus den Tonpartikeln und den Materialien der amorphen Oberfläche. An der Oberfläche der Tonminerale findet ein Ionenaustausch statt – Calcium wird angereichert. Die Effekte des Ionenaustauschs setzten sich im Gelstadium fort (vgl. [358], [335], [341]).

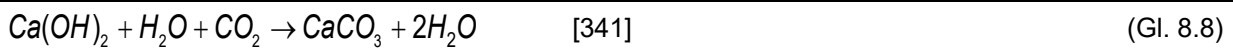
Weiter ist die Anwesenheit von Tonmineralien nicht nur auf die Kornfraktion  $< 0,002$  mm beschränkt – diese liegen auch in der Schluffkörnung vor (vgl. [358]) und überdies sind meist auch mehrere Tonmineralienarten in einem Boden enthalten deren Einflüsse sich überschneiden. Zu den Austauschern gehören auch Humusstoffe und freie Oxide, wobei Tonmineralien hier den größten Einfluss haben (vgl. [337]).

Weiter füllen die Silikate oder Aluminate gelartig den Porenraum des Bodens aus, und reagieren zu neuen Hydratphasen wie Calciumsilikathydrat und Calciumaluminiumthydrat (CSH- und CAH-Phasen, s. (Gl. 8.6) und (Gl. 8.7)) (vgl. weiterführend [345]). Durch die puzzolanischen Reaktionen kommt es zu einer Zementierung bzw. Verkittung der Bodenpartikel, die sich in einer Erhöhung der Festigkeit des Bodens äußert. [341]



Folgende Verbindungen können sich nach [335] bilden:  $\text{CaOSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CaOFe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Beim Fehlen reaktionsfähiger Materialien (Ton) kann beispielsweise Trass oder Flugasche hinzugegeben werden. Bei hydraulischen Kalken sind diese Hydraulefaktoren bereits enthalten (vgl. [335]).

Als ein Langzeiteffekt tritt die Carbonatisierung, die Reaktion des Kalkhydrats zu Calciumcarbonat mit dem  $\text{CO}_2$  aus der Bodenluft auf:



### 8.2.3 Kalk-Zement-Stabilisierung

Mit einer Kalk-Zementstabilisierung werden die Vorteile und Eigenschaften beider Bindemittel genutzt. Hier kommt die stufenweise erfolgende Stabilisierung (1. Einmischen von Kalk, 2. Einmischen von Zement) zum Einsatz oder die Zugabe erfolgt gleichzeitig mit einer Kalk-Zement-Mischung (Mischbinder). Typische Mischungsverhältnisse für Mischbinder sind 70/30, 50/50 und 30/70 M.-% (Kalk/Zement). Bedingt durch die Kalkzugabe wird der Wassergehalt reduziert, damit auch die Plastizität und infolge einer chemischer Reaktion kommt es zur Krümelbildung. Die spezifische Oberfläche feinkörniger Böden wird somit vermindert und damit auch die Quellfähigkeit dieser. Durch eine anschließende Zugabe von Zement steigt die Festigkeit des behandelten Bodens, da der Zementstein das Tragskelett bereits bei geringen Zugabemengen zusätzlich stabilisiert.

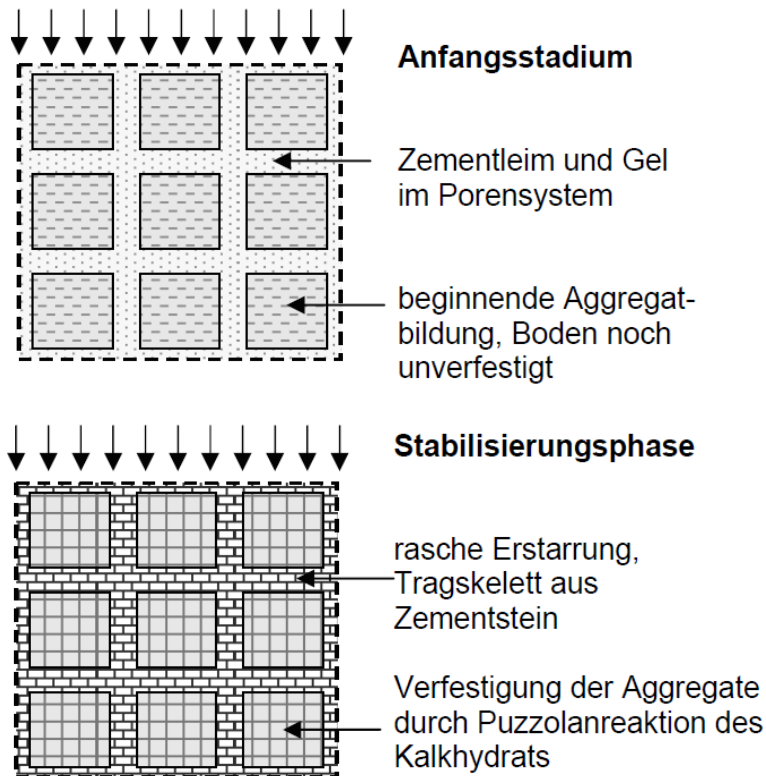


Abb. 8.5: Synergetische Wirkungsweise von Mischbindern (aus [359] (nachbearbeitet) angelehnt an [360]).

#### 8.2.4 Sulfatreaktion

Werden sulfathaltige Böden mit calciumbasierten Bindemitteln behandelt steigt der pH-Wert des Bodens an und Silikate und Aluminate werden aus der Tonfraktion gelöst, womit sich die Grundvoraussetzung für die Ettringitbildung, das Vorhandensein von Aluminium, ergibt (vgl. [361]). Im Porenwasser vorhandene Sulfate reagieren mit den Aluminaten im Porenwasser und es bilden sich Ettringit- und Thaumasit-Minerale im Porenraum. Durch den Ettringitaufwuchs kommt es zu einer Volumenzunahme von bis zu 30 Vol.-%, dem Quellen des Bodens (bei behinderter Volumendehnung können Quelldrücke von  $>5 \text{ N/mm}^2$  entstehen (vgl. [362]). Thaumasit hingegen entwickelt nur einen geringen Quelldruck (vgl. [363] und [359]).

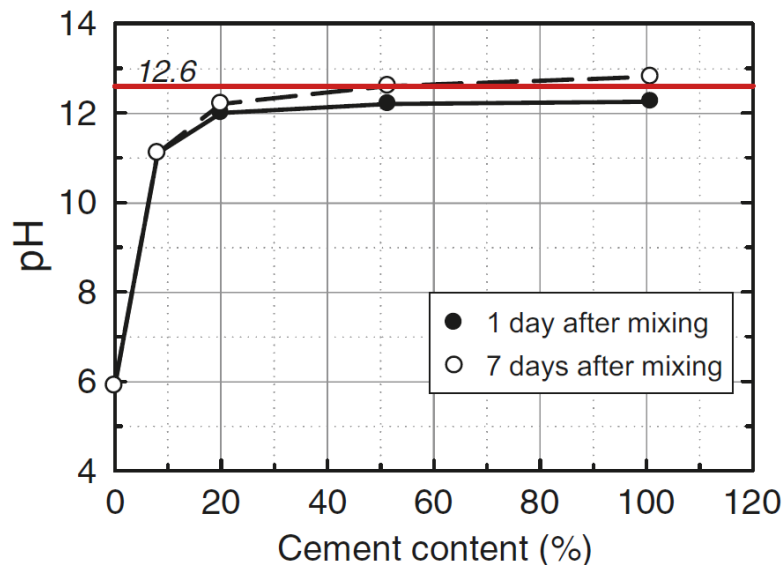
Nach [359] ist der kritische Sulfatgehalt eines Bodens immer im Verhältnis zum Feinanteil, insbesondere Ton, zu betrachten. In der Literatur werden verschiedene Konzentration für den kritischen Sulfatgehalt aufgeführt (vgl. hierzu [364], [359], [363]). Weiter tragen die nadelförmigen Ettringitaufwüchse aber auch positiv zum Scherverhalten bei (vgl. [365] und [366]).

#### 8.2.5 Beeinflussung des pH-Wertes

Torfe zeigen in natürlichem Zustand allgemein eine sehr weite Spanne des pH-Wertes von 2 bis 6 [-] (vgl. [367]), der abhängig von dem Zersetzungsgrad dieser ist. Durch die Infiltration von

Brackwasser bzw. durch Pyridanteile kann dieser bei Torfen aber auch sehr niedrige Werte von  $\text{pH} < 2$  [368] bzw. höhere Werte von  $\leq 7,8$  [-] (vgl. [369] nach [368]) aufweisen (vgl. auch [370] und [371]).

Die Untersuchungen von [31] – bei denen Torf mit verschiedenen Bindemitteln auf Zementbasis behandelt wurde – zeigen, dass der pH-Wert des untersuchten Torfes (pH-Wert=6,2 [-] in natürlichem Zustand) nach der Behandlung mit den Bindemitteln deutlich ansteigt ( $> 10$  bis  $> 12,0$  [-]), was durch Untersuchungen von [372] bestätigt wird (vgl. Abb. 8.6).



**Abb. 8.6:** Auswirkungen der Zementzugabe auf den pH-Wert von Böden mit organischen Bestandteilen (aus [372]).

Weiter wurde die Auswirkung der Bindemittelbehandlung auf die Mikroorganismen des Torfes untersucht. Mit Messung des Sauerstoffverbrauches und der Kohlendioxidproduktion in synthetischem Medium mit Bakterienzugabe zeigen (vgl. [31]), dass es nach Bindemittelzugabe zu keiner Kohlendioxidproduktion und keinem Sauerstoffverbrauch in der Kultur nach der Zugabe mehr kam, womit die mikrobielle Aktivität vollständig gehemmt wurde.

Zudem wurde überprüft, ob es nicht nur zu einer Hemmung der mikrobiellen Aktivität durch die Zugabe kam, sondern auch zu einer Schädigung der Mikroorganismen. Diese wurde mit zwei verschiedenen Zählmethoden der Gesamtzellzahl bestätigt.

Damit ergibt sich, dass die verschiedenen Bindemittel nicht nur über eine reine pH-Wert-Verschiebung die Umweltbedingungen für die Mikroorganismen verschlechtern, sondern zusätzlich ein Absterben der Population hervorrufen wurde und damit Abbauprozesse durch Mikroorganismen verhindert oder verzögert werden können.

Weiter zeigen [367], dass Torfe verschiedener Zersetzungsgrade (fibrous, hemic und sapric) nach einer Behandlung mit Zement bzw. einer Zement-Hochofenschlacke-Mischung und anschließender Lagerung in verschiedenen Lösungen von sauer bis alkalisch (pH-Wert=3, 5, 10 und 15 [-]) unterschiedliche Entwicklungen in der undrainierten Scherfestigkeit  $s_u$  aufzeigen. Die

in den alkalischen Lösungen gelagerten Proben zeigten keine bzw. nur geringfügige Veränderungen der Scherfestigkeit gegenüber den in destilliertem Wasser gelagerten Vergleichsproben, zum anderen zeigten die in den sauren Lösungen gelagerten Versuchskörper anschließend wesentlich geringere Scherfestigkeiten, die jedoch mit zunehmendem Zersetzungsgrad (fibrous → sapric) der Torfe ebenfalls zunahm (vgl. auch [373]).

[374] hingegen zeigen an einem mit Kalk stabilisierten organischen Ton mit unterschiedlichen Anteilen an eingemischten Huminsäure, dass diese sich negativ auf die Festigkeitsentwicklung auswirken.

### 8.3 Veränderung der Durchlässigkeit

Verschiedene Untersuchungen an mit Bindemitteln behandelten Tonen/Schluffen mit organischen Anteilen zeigen eine Zunahme (vgl. [375] und [376] nach [377] und [378]) oder Abnahme (vgl. [339] und [379]) des  $k_f$ -Wertes bzw. eine Zu- und Abnahme der Durchlässigkeit (vgl. [380] nach [377], [381]). Feldversuche an stabilisierten Säulenkörpern (vgl. [63], [382], [383]) zeigten starke Streuungen der Versuchsergebnisse und im Allgemeinen eine höhere Durchlässigkeit als Laborversuche. Dies ist u. a. auf Inhomogenitäten der Bodenstruktur und die ungleichmäßige Verteilung des Bindemittels im Feld zurückzuführen [63].

### 8.4 Veränderung des Kompressionsverhalten

Nach [372] lässt sich das Kompressionsverhalten von Torfen hinsichtlich des  $C_d/C_c$ -Wertes mit Zementanteilen von etwa 40 bis 60 M.-% (bez. auf die Trockenmasse des Bodens) auf das Niveau von nichtorganischen Tonen, mit 80 M.-% auf das Niveau von granularen nichtbindigen Böden überführen (s. Abb. 8.7).

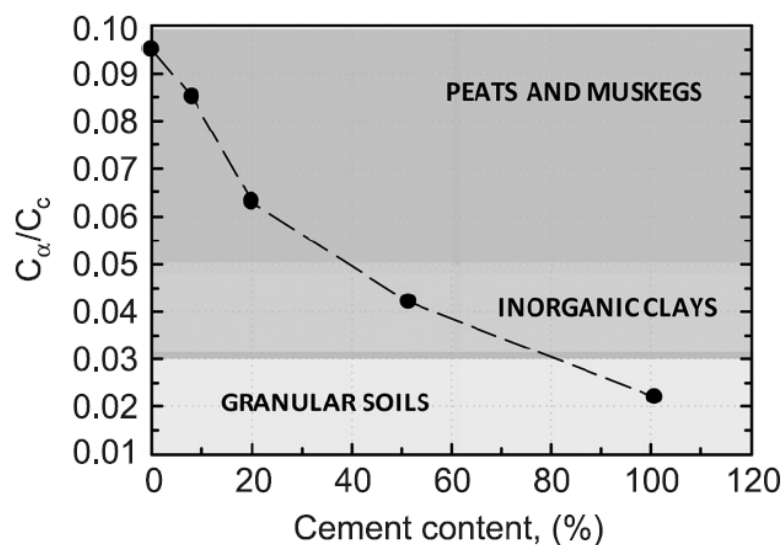


Abb. 8.7: Auswirkungen der Zementbehandlung (8 bis 100 M.-% der Trockenmasse) auf  $C_d/C_c$ -Wert Böden mit organischen Bestandteilen (aus [372]).

### 8.5 Einfluss der Vorbelastung

Durch eine Vorbelastung (zeitlich erhöhte Haltedauer der Anfangsspannung), die kurz nach dem Mischvorgang appliziert wird, lässt sich die Festigkeit eines stabilisierten Bodenkörpers deutlich beeinflussen (vgl. [63]). [384] zeigen an Probekörpern aus stabilisiertem Torf, dass sich mit geringen Vorlasten von bis zu 18 kPa Erhöhungen in der einaxialen Druckfestigkeit  $q_{uc}$  erzielen lassen, die dem Vielfachen der einaxialen Druckfestigkeit  $q_{uc}$  ohne Vorbelastung entsprechen. Nach [63] resultiert die Zunahme der Druckfestigkeit nicht direkt aus der Größe der Spannung der Vorbelastung, sondern aus der Kompression, die sich durch die Vorbelastung einstellt. Durch die Kompression des Bodenkörpers reduziert sich der Abstand zwischen den Bindemittelkörnern und den Bestandteilen des stabilisierten Bodens (Torf). [385] zeigen mit Untersuchungen an Torfen mit organischen Gehalten von > 94 % (bez. auf die Trockenmasse) und Wassergehalten von 1.200 bzw. 850 %, dass die einaxiale Druckfestigkeit bei unbehinderter Radialdehnung  $q_{uc}$  mit der Ruhezeit der stabilisierten Probekörper zunimmt (s. Abb. 8.8).

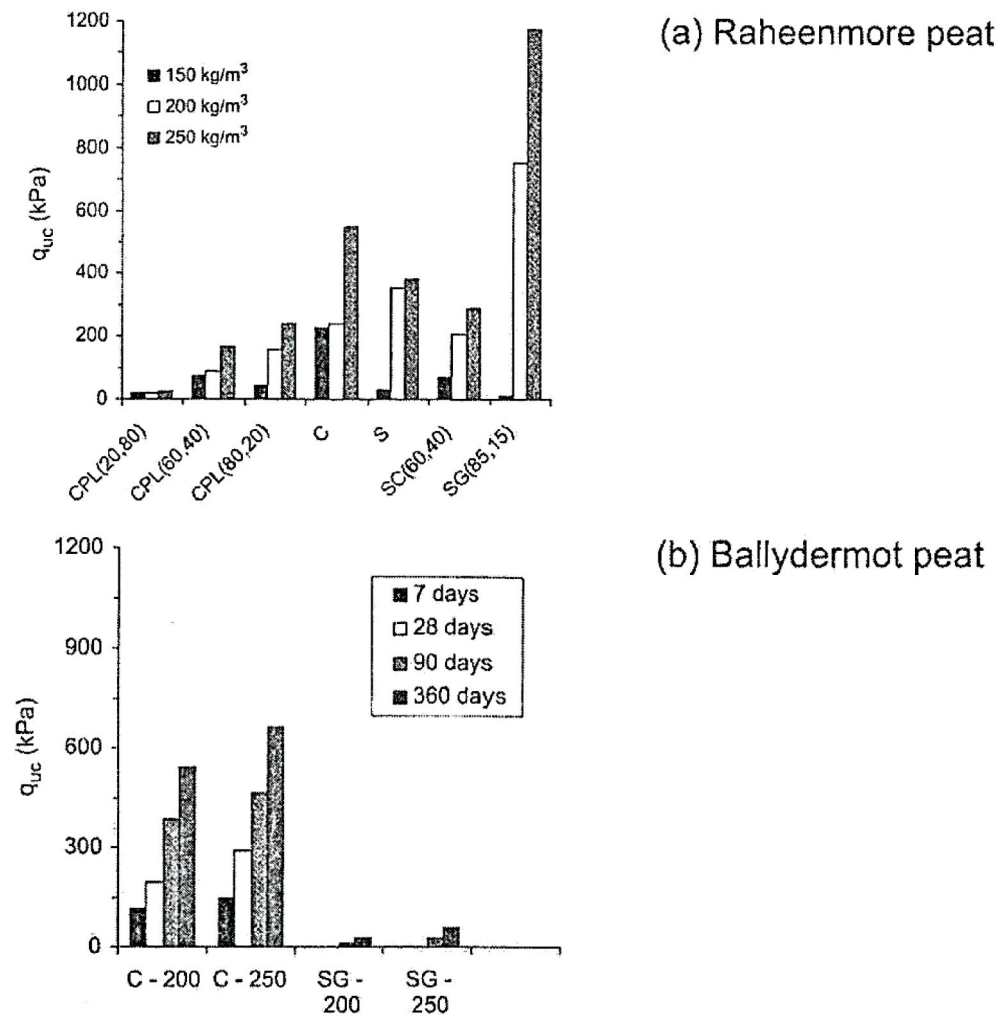


Abb. 8.8: Einaxiale Druckfestigkeiten verschiedener Mischungen (aus [385] (nachbearbeitet)).



Weiter berichten [385], dass die Druckfestigkeiten von – mit 18 kPa Vorlast behandelten – Probekörpern, welche direkt nach Herstellung der Probekörper aufgebracht wurde, nach 90 d fast die 5-fache Druckfestigkeit der nicht vorbelasteten Probekörper erreichten (vgl. Abb. 8.9).

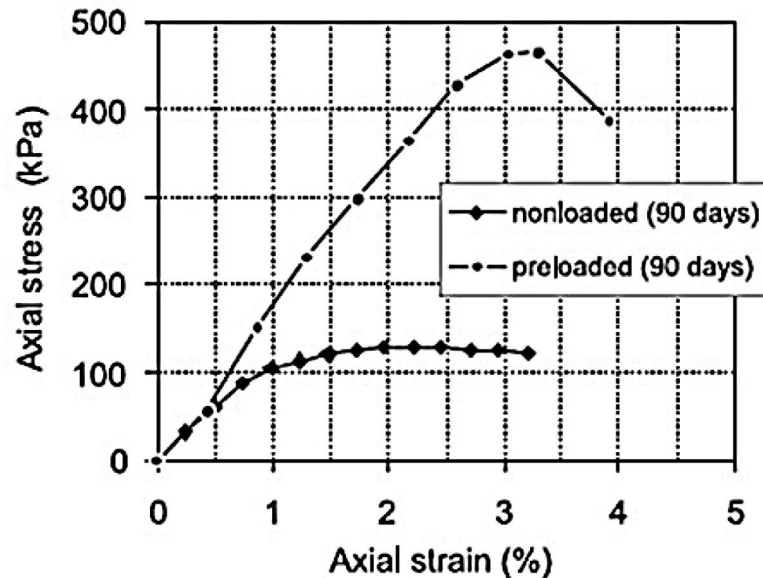


Abb. 8.9: Spannungs-Dehnungs-Kurven von nicht vorbelasteten und vorbelasteten einaxialen Druckversuchen an mit 250kg/m<sup>3</sup> behandeltem Ballydermot Torf (aus [385]).

Außerdem war bei den nur 7 d vorbelasteten Probekörpern so gut wie kein Anstieg zu den nicht vorbelasteten Probekörpern festzustellen. Zudem indizierten REM-Aufnahmen der zement-stabilisierten Proben, dass die für Torf typischen großen Porenräume mit Zementstein gefüllt waren. Ein Zusammenwirken des hydratisierten Zements und der organischen Anteile war dahingegen nicht festzustellen.

Ähnliche Ergebnisse zeigen auch Untersuchungen von [386], die einaxiale Druckfestigkeiten nach Vorbelastungen von 14,5, 48,0 und 96 kN/m<sup>2</sup> über die Zeiträume von 1, 7 und 28 d an unbelasteten Probekörper und mit 8 % Portlandzement der Trockenmasse stabilisierten Torfe (Wassergehalt  $w = 261,2\%$  (+/- 32,1 %), Glühverlust  $V_{gl} = 41,8$  bis 58,6 M.-%) ermittelten. Hier zeigen sich bei den unbelasteten und behandelten Versuchsreihen wesentliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Größe und Dauer der Vorbelastung, wobei die vorbelasteten Versuchsreihen deutlich höhere Druckfestigkeiten ausweisen.

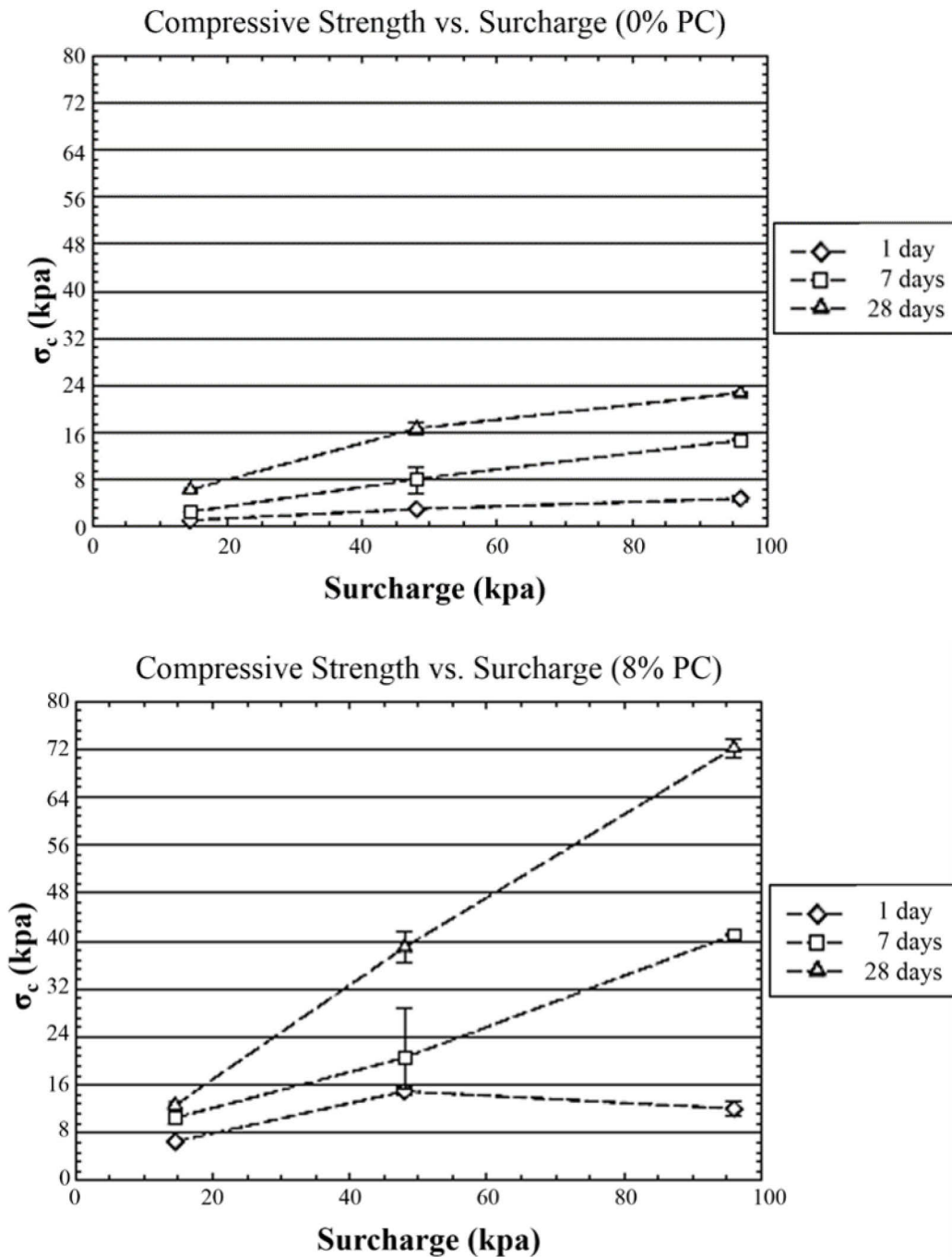


Abb. 8.10: Einaxiale Druckfestigkeiten vorbelasteter/unbehandelter und mit 8 % Zement behandelter Proben (aus [386] (nachbearbeitet))

Weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen von Vorbelastungen zeigen [71], [63], [372], [384] und [387]. Zudem bestehen klare Abhängigkeiten der Druckfestigkeit von dem Bindemittelanteil (vgl. [388]).

## 8.6 Scherverhalten

Das Scherverhalten von (organischen) Böden kann mit der Zugabe von Bindemitteln hinsichtlich der Kohäsion und des Scherwinkels bzw. der Gesamtscherfestigkeit beeinflusst werden. Nach [341] zeigen Auswertungen zahlreicher Scherversuche an nicht organischen Böden, dass der Reibungswinkel bei behandelten nichtbindigen Böden nahezu unverändert bleibt, während er bei Böden mit bindigen Anteilen nach längerer Liegezeit infolge von Strukturänderungen um wenige Grade ansteigen kann. Die Erhöhung der Festigkeit, der Steifigkeit und der Kohäsion sind nach [341] dem Effekt der Skelettbildung des Zementsteins – einer Ausbildung eines Tragsystems – zuzuordnen, welches jedoch bei größeren Verformungen wieder zerstört wird. *„Im Bruchzustand können dann lediglich die sekundären Effekte der puzzolanischen Reaktionen mobilisiert werden, die eine Strukturänderung mit nur geringer Festigkeitserhöhung der Bodenmatrix selbst bewirken.“* [ [341], S. 4]. Nach [389] muss eine ausreichende Menge an Bindemittel zugegeben werden um das nach Tragsystem nach [341] in die Bodenmatrix einzubringen. Wird weniger als die Mindestmenge an Bindemittel zugegeben stellt sich kein Stabilisierungseffekt ein (vgl. Abb. 8.11). [389] führen aus, dass der Bindemittelanteil bei „wässrigen“ Böden mit hohen Porenzahlen wie z. B. Torfen dementsprechend gegenüber Böden mit geringeren Porenzahlen erhöht werden muss.

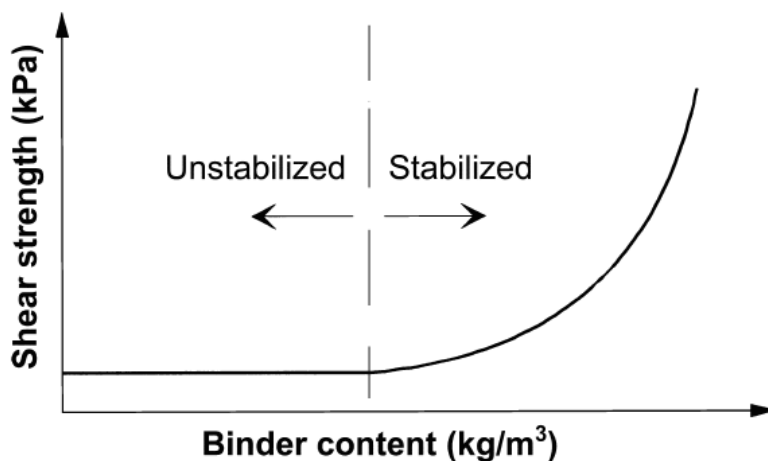


Abb. 8.11: Beziehung zwischen Bindemittelanteil und Scherfestigkeit (aus [389])

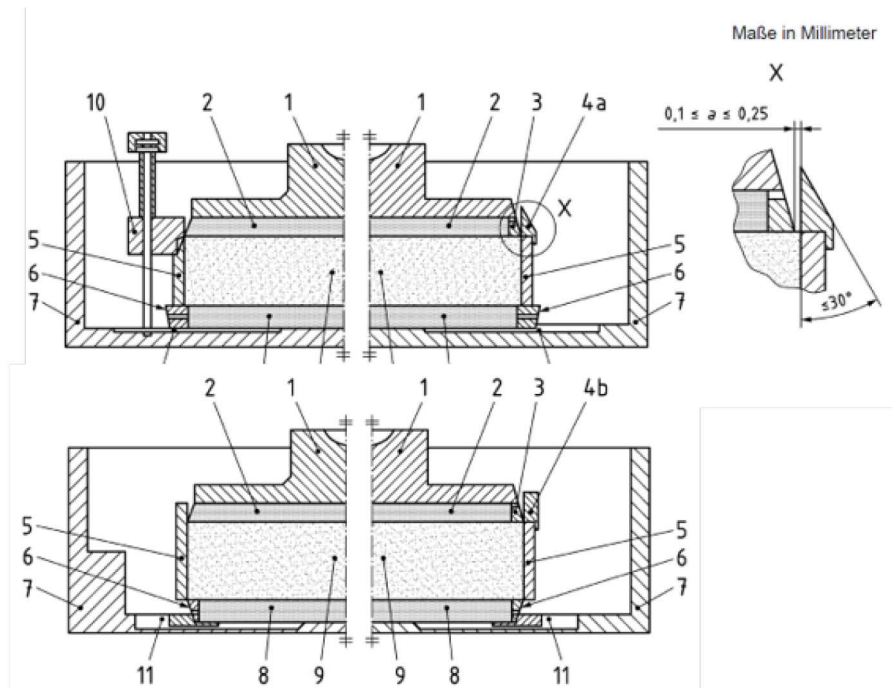
## 8.7 Weitere Untersuchungen zur Stabilisierung von Torf

Weitere Untersuchungen zur Stabilisierung von Torfen zeigen [390] mit Salz und u. a. [162], [391] und [392] durch Wärmebehandlung.



## 9 Oedometerversuche

Zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Böden werden in der Bodenmechanik als Laborversuch unter anderem Kompressionsversuche in von [268] eingeführten Oedometerzellen durchgeführt. Der nach DIN EN ISO 17892-5:2017 [267] (Vorgängerdokument: DIN 18135:2012 [280]) geregelte Kompressionsversuch wird mit feststehendem oder schwebendem Probenring der Oedometerzelle durchgeführt (s. Abb. 9.1). Hierbei wird die Bodenprobe bei behinderter Seitendehnung einaxial belastet.



### Legende

- 1 Kopfplatte mit Fassung für die Filterplatte und Zentrierung des Laststempels
- 2 obere Filterplatte
- 3 Fassung der Filterplatte mit Entwässerungsrillen und Entwässerungsöffnung
- 4 Aufsatzringe zur Zentrierung der Kopfplatte
- 4a aufgesetzter Schneidenring
- 4b Führungsring
- 5 Ödometerring (bei schwebender Anordnung mit Unterstützung für die ersten Laststufen)
- 6 Fassung der unteren Filterplatte
- 7 Wasserkasten (Zylinder)
- 8 untere Filterplatte
- 9 Probekörper
- 10 Arretier Vorrichtung zum Festspannen des festen Rings
- 11 Entwässerungsrillen

Abb. 9.1: o.: Oedometerzelle mit feststehendem Ring, u.: mit schwebend angeordnetem Ring (aus DIN 18135:2012 [280]).

Die Normalspannung [kN/m<sup>2</sup>] wird stufenweise aufgebracht und ergibt sich aus dem Quotienten der Last F [kN] und der Querschnittsfläche der Kopfplatte [m<sup>2</sup>] (s. (Gl. 9.1)).

---


$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [kN / m}^2\text{]} \quad (\text{Gl. 9.1})$$


---

Durch den Bezug der Setzung s [mm] auf die Anfangshöhe des Probenkörpers h<sub>0</sub> [mm] erhält man die bezogene Setzung (Stauchung) s' [-], die im Folgenden als bezogene gesamte Setzung s'<sub>ges</sub> bezeichnet wird (s. (Gl. 9.2)).

---


$$s' = s'_{ges} = \frac{s}{h_0} \text{ [-]} \quad (\text{Gl. 9.2})$$


---

Die bezogene Setzung s'<sub>i</sub> innerhalb der i-ten Laststufe ergibt sich nach (Gl. 9.3) und wird nachfolgend als bezogene inkrementelle Setzung s'<sub>ink</sub> bezeichnet.

---


$$s'_i = s'_{ink} = \frac{s_n - s_{n-1}}{h_0} \text{ [-]} \quad (\text{Gl. 9.3})$$


---

Hierin sind:

s <sub>i</sub>	=	Setzung in der Laststufe i	[mm]
s <sub>i-1</sub>	=	gesamte Setzung zum Ende der Laststufe i-1	[mm]
h <sub>0</sub>	=	Anfangsprobenhöhe	[mm]

Die Anfangsporenzahl e<sub>0</sub> (e<sub>ges</sub>) [-] wird aus der Kornrohddichte p<sub>s</sub> [g/cm<sup>3</sup>] und der Anfangstrockendichte p<sub>d</sub> [g/cm<sup>3</sup>], die sich wiederum aus der Feuchtdichte p<sub>f</sub> [g/cm<sup>3</sup>] und dem Wassergehalt w [-] berechnet, bestimmt. Die Porenzahlen über den Versuchsverlauf ergeben sich entsprechend der erfolgten Zusammendrückung des Probekörpers.

---


$$e_0 = e_{ges} = \frac{p_s}{p_d} - 1 \text{ [-]} \quad (\text{Gl. 9.4})$$

$$p_d = \frac{p_f}{1 + w} \text{ [g / cm}^3\text{]} \quad (\text{Gl. 9.5})$$

$$p_f = \frac{m_f}{V} \text{ [g / cm}^3\text{]} \quad (\text{Gl. 9.6})$$


---

Darin sind weiter:

m <sub>f</sub>	=	Masse der feuchten Probe	[g]
V	=	Volumen der Probe	[cm <sup>3</sup> ]

Die Berechnung des Anfangsporenraumes (-porenanteils) n<sub>0</sub> (n<sub>ges</sub>) erfolgt nach (Gl. 9.7). Die Porenräume über den Versuchsverlauf ergeben sich analog denen der Porenzahlen.

---

$$n_0 = n_{ges} = \frac{e_0}{1 + e_0} = 1 - \frac{p_d}{p_s} [-] \quad [-] \quad (Gl. 9.7)$$

---

Der Porenraum gibt das Verhältnis des Porenvolumens zum gesamten Bodenvolumen wieder – die Porenzahl das Verhältnis des Porenvolumens zum Volumen des Feststoffes.

Die Kompressionsversuche wurden nach DIN EN ISO 17892-5 [267] an Oedometerversuchsständen mit schwebenden und beidseitig drainiertem Ring (Höhe  $h=20$  mm) durchgeführt. Es wurden insgesamt 67 Versuchsreihen durchgeführt, die jeweils einen Umfang von 3 Einzelversuchen hatten.

## 9.1 Bindemittel und Zuschlag

Das Verformungsverhalten der Versuchsböden wurde in Abhängigkeit von der Zugabe verschiedener Bindemittel bzw. einem Zuschlag untersucht. Die für die Behandlung der Versuchsböden verwendeten Bindemittel bzw. der Zuschlag waren:

- Schwenk B500 (50/50 M.-% Zement/reaktiver Kalk),
- Schwenk B300 (70/30 M.-% Zement/reaktiver Kalk),
- Meister Branntkalk körnig 85 (85 M.-% CaO),
- Schwenk Portlandzement CEM I 52,5 R DIN EN 197-1:2011 [342],
- Liapor 8 Blähton.

Über die genauen Zusammensetzungen der Schwenk Bodenbinder B300 und B500 gibt das technische Merk- und Datenblatt des Herstellers [393] keinen Aufschluss. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei dem reaktivem Kalk um Weissfeinkalk (CaO) nach DIN EN 459-1 [348] handelt. Der Zementanteil ist vermutlich ein Portlandzement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1 [342]. Ein Portlandzement (CEM I) wurde hier als Zement gewählt, da dieser u. a. nach [377], [386], [394] und [395] das wirksamste Bindemittel hinsichtlich der erzielbaren Steifig-/Festigkeiten darstellt.

## 9.2 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden versuchstechnisch aus dem homogenisierten Probenmaterial der Versuchstorfe T1, T2 und T3 hergestellt:

1. Torf in unbehandelter Form (T1, T2 und T3),
2. Torf nach Trocknung bei 60 und 105 °C und anschließender Wässerung (T1),
3. und dem Zuschlag Liapor Blähton (T1),
4. und dem Mischbindemittel Schwenk B500 (T1),

5. und dem Mischbindemittel Schwenk B300 (T1),
6. und dem Bindemittel Branntkalk (T1),
7. und dem Bindemittel Portlandzement CEM I 52,5 R (T1, T2 und T3).

Die Probenkörper wurden im Trocken- und Nassmischverfahren (Dry-Mixed (DM) bzw. Wet-Mixed (WM)) hergestellt. Die Probekörper, die mit dem Zuschlag Liapor, den Mischbinder B500 und B300 und dem Bindemittel Branntkalk hergestellt wurden, wurden ausschließlich trocken angemischt. Der Branntkalk, der in der Lieferform eine Korngröße von 2-4 mm hatte, wurde vor der Zugabe zermahlen und auf Korngröße von 0,063 bis 0,2 mm gesiebt. Der Liapor 8 Blähton (Korngrößenbereich: 2-8 mm) wurde vor der Zugabe ebenfalls zermahlen und auf eine Korngröße von 0,2 bis 0,63 mm gesiebt. Die Bestimmung der Kornrohichte erfolgte entsprechend am gesiebten Material. Die mit dem Bindemittel CEM I hergestellten Probekörper wurden zusätzlich zum Trockenmisch-Verfahren auch im Nassmisch-Verfahren (Wet-Mixed „WM“) hergestellt.

Für die Herstellung der bei 60 und 105 °C getrockneten Probekörper wurde das Probenmaterial nach Trocknung über den Zeitraum von 24 h in Wasser getränkt, dann auf ein Analysesieb (Maschenweite: 1mm) mit Filterpapier gegeben und daran abgedeckt für 24 h über einem Wasserbad gelagert. Vor der Probekörperherstellung wurde das Probenmaterial durchgemischt.

Für die Herstellung der Probekörper im Dry-Mixed-Verfahren wurde dem homogenisierten Probenmaterial der Versuchsböden, während der Durchmischung von diesem mit einem handelsüblichen Handmixer mit Rührbesen, die berechnete Menge an Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel zugeführt. Die verwendeten Anteile beziehen sich hierbei auf die Feuchtmasse des Probenmaterials und wurden in Masseanteilen von 5, 10 und 20 M.-% nach (Gl. 9.8) zugegeben (vgl. [388]).

---


$$\text{Bindemittelanteil} = \frac{\text{Trockenmasse des Bindemittels bzw. Zuschlag}}{\text{Feuchtmasse des Versuchsbodens}} \quad [\text{M.} - \text{\%}] \quad (\text{Gl. 9.8})$$


---

Bei den im Wet-Mixed-Verfahren hergestellten Versuchskörpern, die wie beschrieben nur mit dem Bindemittel CEM I hergestellt wurde, wurde der berechnete Zementanteil (5, 10 und 20 M.-% der Feuchtmasse des Probenmaterials) vorher mit Wasser angemischt und damit in eine Suspension überführt. Der Wasser-Zement-Wert der Suspension betrug  $w/z=1,5$  bzw.  $0,5$  [-]. Anschließend erfolgte die Zugabe der Suspension unter Durchmischung des Bodens mit dem Handmixer.

Die Durchmischung der Suspensionen sowie der Suspensionen mit dem homogenisierten Probenmaterial der Versuchsböden, wie auch die Durchmischung der Dry-Mixed Probenmassen, erfolgte so lange bis sich eine einheitliche Struktur des Mischmaterials ergab (ca. 30 bis 45 sec).



Die sich aus den beigemischten Anteilen des Zuschlags, Mischbinders oder Bindemittels der Dry-Mixed-Versuchsreihen ergebenden Bodenkennwerte sind in Tab. A. 5 (s. Abschn. A. 3) dargestellt.

Beispielsweise ergeben sich aus den zugemischten Anteilen von 5, 10 und 20 M.-% zum Versuchsboden feuchtmassebezogene Anteile dieser in den Mischproben von 4,76, 9,09 und 16,67 M.-%. Bezogen auf die Trockenmasse der Versuchsböden variieren die Bindemittelanteile aufgrund der unterschiedlichen natürlichen Wasseranteile stark und ergeben z. B. beim T1 die höchsten Werte von 15,92, 31,83 und 63,66 M.-%.

Der Vergleichsboden S1 wurde aufgrund seiner einheitlichen Struktur nicht homogenisiert. Dieser wurde in unbehandelter Form und nach Behandlung mit dem Bindemittel Portlandzement CEM I 52,5 R (5 und 20 M.-%) im Trockenmischverfahren untersucht.

Die Tab. A. 6 und Tab. A. 7 (s. Abschn. A. 3) zeigen die entsprechenden Bodenkennwerte für die im Wet-Mixed-Verfahren hergestellten Versuchsreihen mit den w/z-Werten der Zementsuspensionen von 1,5 und 0,5 [-].

### **9.3 Ermittlung des Wassergehaltes der eingebauten Probekörper**

Die Bestimmung des Wassergehaltes der eingebauten Probekörper wurde an dem nicht verwendeten Rückstand der Probenmasse durchgeführt. Da für die Herstellung der Probekörper immer so viel homogenisierte Probenmasse aus den Gebinden entnommen wurde, stand für die Bestimmung des Wassergehaltes immer eine ausreichend große Menge (>250 g) zur Verfügung.

### **9.4 Ermittlung der Porenzahlen bzw. Porenräume der Probekörper**

Die Porenzahlen  $e$  bzw. -räume  $n$  der Probekörper wurden in Abhängigkeit von der jeweiligen massemäßigen Zuschlags- bzw. Bindemittelzugabe aus der jeweils bestimmten mittleren Korndichten des Versuchsbodens (s. Tab. 6.5) und des Zuschlags bzw. Bindemittels (s. Tab. 9.1) ermittelt.

**Tab. 9.1: Korndichten des Zuschlag und der Bindemittel nach DIN 18124:2011 [172]**

<b>Versuchsreihe</b> [Bez.]	<b>Anzahl d. Versuche</b> [n]	<b>Trocknungstemperatur</b> [°C]	<b>Kornrohddichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]
LP	3	105	2,330
V [%]	-	-	0,069
BK	3	105	3,147
V [%]	-	-	0,126
B500	3	105	2,931
V [%]	-	-	0,109
B300	3	105	2,934
V [%]	-	-	0,097
CEM I	3	105	3,118
V [%]	-	-	0,110

Die Veränderungen der Korndichte wie sie sich bspw. während der Hydratation von Zement (Verminderung der Korndichte) auftreten (vgl. [396]), wurden nicht berücksichtigt. Es wurden die versuchstechnisch ermittelten Korndichten vor der Wasserzugabe verwendet.

## 9.5 Durchführung der Kompressionsversuche

Die Versuchsreihen wurden an Oedometerständen mit Totlasten durchgeführt. Die Verformungen wurden mit induktiven Wegaufnehmer (Fabr.: Mahr, Typ.: MarCator 1075 R) aufgezeichnet. Die, zum Trieren der Wegaufnehmer, verwendete Spannung betrug bei allen durchgeführten Kompressionsversuchen 1,25 kN/m<sup>2</sup>. Damit betrug diese in Bezug auf die Anfangslaststufen ( $\sigma=12,5$  bzw. 25,0 kN/m<sup>2</sup>) 10 bzw. 5 % und in Bezug auf die letzte Laststufe (Endlaststufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup>) lediglich 0,3 % und wird daher vernachlässigt respektive im Folgenden nicht aufgeführt.

Tab. 9.2: Laststufen der Kompressionsversuche

Initialspannung (Haltedauer unterschiedlich, min. 1d) [kN/m <sup>2</sup> ]	Zwischenlaststufe (Haltedauer = 1 d) [kN/m <sup>2</sup> ]				Endlaststufe (Haltedauer unterschiedlich, min. 4d) [kN/m <sup>2</sup> ]
	25,0 ( $\sigma_2$ )	50,0 ( $\sigma_3$ )	100 ( $\sigma_4$ )	200 ( $\sigma_5$ )	
12,5 ( $\sigma_1$ ) (1 bis 5 d)					400 ( $\sigma_6$ ) (5 bis 28 d)
25,0 ( $\sigma_2$ ) (1 bis 14 d)	-	50,0 ( $\sigma_3$ )	100 ( $\sigma_4$ )	200 ( $\sigma_5$ )	400 ( $\sigma_6$ ) (4 bis 170 d)

## 9.6 Probenbezeichnungen der einzelnen Versuchsreihen

Die erfolgten Kompressionsversuche (Oedometer mit schwebendem Ring nach DIN EN ISO 17892-5:2017 [267]) wurden wie folgt bezeichnet nach:

- dem Versuchsboden,
- der Behandlungsart,
- dem Zuschlag/Bindemittel,
- der Haltezeit der Anfangslaststufe/Endlaststufe

Die Bezeichnungen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit mit Abkürzungen (s. nachfolgende Abkürzungen („Abk.“)) versehen: Die Versuchsböden Torf 1, 2 und 3 (Abk.: „T1“, „T2“ und „T3“) und Schluff 1 (Abk.: „S1“) wurden mit ihrem natürlichen Wassergehalt und dem sich durch die Behandlungsart ergebenden Wassergehalt in die Oedometer eingebaut.

Die Behandlungsarten unterscheiden sich in (vgl. Abschn.9.2) :

1. keine Behandlung (unbehandelt), ohne die Zugabe von Zuschlag/Bindemitteln und die Behandlung durch Trocknung bei 60 bzw. 105 °C und anschließende Wässerung:

- unbehandelt (Abk.: „-“),
- getrocknet bei 60 °C (Abk.: „60°C“),
- getrocknet bei 105 °C (Abk.: „105°C“),

2. die Behandlung durch die Zugabe von Zuschlag bzw. verschiedenen Bindemitteln im Trockenmischverfahren (Dry-Mixed („DM“)):

Zuschlag:

- Liapor (Abk.: „LP“),

Bindemittel:

- Schwenk B 300 (Abk.: „B300“),
- Schwenk B 500 (Abk.: „B500“),
- Branntkalk (Abk.: „BK“),
- CEM I 52,5 R (Abk.: „CEM I“),

3. die Behandlung mit dem Bindemittel CEM I im Nassmischverfahren (Wet-Mixed, „WM“) mit Wasser-Zement-Werten w/z von 1,5 (Abk.: „WM“) bzw. 0,5 (Abk.: „WM-0,5“).

Die Zugabe des Zuschlags/Bindemittels erfolgte anteilig zur Feuchtmasse der Versuchsböden in Anteilen von 5, 10 und 20 M.-% (Abk.: „5%“, „10%“ und „20%“).

Weiterhin werden die Haltezeiten der verschiedenen Laststufen der Versuchsreihen (Anfangslaststufe und Endlaststufe, die Zwischenlaststufen betragen bei allen Versuchsreihen 1 d) in Tagen [d] (Abk.: „d“) unterschieden. Die Haltedauer [d] ist vor der Anfangs- und Endlaststufe angegeben. Wurden die Probekörper der Versuchsreihen unbelastet gelagert ist diese „Laststufe“ zuvor mit der Dauer in Tagen [d] aufgeführt:

- unbelastet mit 0 kN/m<sup>2</sup> (Abk.: „0“)
- Anfangslaststufe 12,5 bzw. 25,0 kN/m<sup>2</sup> (Abk.: „12,5“ bzw. „25“)
- Endlaststufe 400 kN/m<sup>2</sup> (Abk.: „400“)

Die Tab. A. 8 bis Tab. A. 14 (s. Abschn. A. 4) zeigen Zusammenstellungen der verschiedenen durchgeführten Versuchsreihen.

Die Tab. A. 5 bis Tab. A. 7 zeigen Zusammenstellungen der Bodenkennwerte der Versuchsböden basierend auf den bestimmten mittleren natürlichen Wassergehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$ . Weiter sind die sich aus der Zugabe von Bindemittel bzw. Zuschlag („BM“) ergebenden Kennwerte aufgeführt.

Insgesamt liegen die ermittelten Werte der Wassergehalte/-anteile für die untersuchten Böden in einem plausiblen Bereich, womit für die weiteren Rückschlüsse bzw. Berechnungen die Mittelwerte dieser als Bezugsgröße verwendet werden können.

## 9.7 Sättigung der Versuchsreihen

Die Sättigungszahlen  $s_r$  der Versuchsböden-/reihen werden nicht gesondert behandelt da diese durch eine gewisse Unschärfe der gemittelten Parameter verfälscht werden und sich daher auch Sättigungszahlen  $s_r > 1,0$  [-] ergeben.

Dies ist u. a. damit begründet, dass die Bestimmung der Korndichte bzw. des Wassergehaltes nach Ofentrocknung in die Auswertung eingeht, wodurch sich eine Beeinflussung der organischen Bestandteile ergibt, die vermutlich mit steigenden organischen Anteilen zunimmt (s. Anmerkungen in der DIN EN ISO 17892-1:2015 [171]). Weiter zeigten die Versuchsböden und damit auch die behandelten Versuchsböden sehr hohe Wassergehalte, die auch bei größter labortechnischer Sorgfalt empfindliche Abweichungen u. a. infolge Wasserverlust durch Verdunstung erreichen können. Zudem kann versuchstechnisch zugrunde gelegt werden, dass die unbehandelten Versuchsreihen als Zwei-Phasen-Gemische und die behandelten Versuchsreihen mit steigendem Bindemittelanteil mit einer ebenso sinkenden Teilsättigung eingebaut wurden.

Da die Verwendung der Korndichte in diesem Fall den höchsten Stand der Technik<sup>10</sup> darstellt bzw. keine gesonderten Verfahren für Böden mit organischen Anteilen bestehen ist dieser Ansatz zur versuchstechnischen Auswertung gerechtfertigt.

## 9.8 Darstellung der Versuchsergebnisse

### 9.8.1 Setzungen $s'_{ges}$ bzw. $s'_{ink}$ und Porenzahlen $e_{ges}$

Die physikalische Setzung  $s$  [mm] der erfolgten Oedometerversuche wird in dieser Arbeit aus Gründen der Übersichtlichkeit/Vergleichbarkeit nicht graphisch dargestellt, da alle durchgeführten Oedometerversuche mit einer Probenringhöhe von 20 mm durchgeführt wurden. Daher wird hier

---

<sup>10</sup> Versuchsdurchführung mit dem Helium-Pyknometer

– insbesondere aus Gründen der Versuchsauswertung/Vergleichbarkeit der Ergebnisse – die dimensionslose bezogene Setzung „s“ [-] für die Beschreibung und Auswertung der Versuche herangezogen, die sich auf die Anfangsprobenhöhe  $h_0$  vor Versuchsbeginn von 20 mm bezieht. Diese wird unterteilt in die bezogene (bez.) gesamte (ges.) Setzung „s<sub>ges</sub>“ [-], welche die bez. insgesamt erfolgte Setzung zum Zeitpunkt t beschreibt, und die bez. inkrementelle (ink.) Setzung „s<sub>ink</sub>“ [-], die den jeweiligen bez. Setzungsanteil in der Laststufe aufzeigt.

Die Darstellung der gesamten Setzungen s<sub>ges</sub> erfolgt in halblogarithmischer Darstellung über den Verlauf der Spannungen  $\sigma$  als Spannungs-Setzungslinien (log  $\sigma$ -s<sub>ges</sub>-Linien). Desgleichen erfolgt die Darstellung der gesamten Porenzahlen e<sub>ges</sub> (log  $\sigma$ -e<sub>ges</sub>). Weiter sind die Versuchsergebnisse der bez. ges. und ink. Setzungen s<sub>ges</sub> bzw. s<sub>ink</sub> im halblogarithmischen Maßstab als Zeit-Setzungslinien über den Verlauf der Zeit abgebildet (log t-s<sub>ges</sub> bzw. -s<sub>ink</sub>-Linien) (s. Abschn. A. 10). Eine Zusammenstellung der Setzungen s [mm] der Versuchsreihen in tabellarischer Form ist in Abschn. A. 9 dargestellt.

### 9.8.2 Oedometermodule

Im Gegensatz zur DIN EN ISO 17892-5:2017 [267], nach welcher der Oedometer-Steifemodul  $E_{Oed}$  mit dem Quotienten aus Differenz der Spannungsänderung der betrachteten Laststufe  $\sigma_n$  und der vorherigen Laststufe  $\sigma_{n-1}$  und der Änderung der Vertikalverformung s innerhalb der Laststufe bezogen auf die Probenkörperhöhe h [-] zu Beginn der Laststufe  $\sigma_n$  berechnet wird, werden hier die Oedometermodule aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den bez. Setzungen, die in Relation zur Anfangsprobenhöhe  $h_0$  [mm] stehen, verwendet (s. (Gl. 9.9)).

$$E_{Oed} = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{s'_{ges \sigma_n} - s'_{ges \sigma_{n-1}}} = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{s'_{ink \sigma_n}} [MN / m^2] \quad (Gl. 9.9)$$

Zum Vergleich der Oedometermodule  $E_{Oed}$ , die sich aus dem Quotienten der Spannungsdifferenz [MN/m<sup>2</sup>] und der bez. ink. Setzung [-] innerhalb der Laststufe ergeben, sind diese:

1. jeweils in der schrittweisen Abfolge der aufeinander folgenden Spannungsintervalle  $\sigma_{0-6}$  eingezeichnet und benannt nach den Mittelpunkten dieser ( $E_{Oed(\sigma_n)}$ ) und im Folgenden als „innere Spannungsintervalle bzw. innere Oedometermodule“ benannt, dargestellt.

#### Innere Spannungsintervalle – innere Oedometermodule:

für die Versuchsreihe mit der Initialspannung  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup>:

- $\sigma_0-\sigma_1=0,00-12,5$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(6,25)}$ ,

- $\sigma_1 - \sigma_2 = 12,5 - 25,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(18,75)}$ ,

bzw. für die Versuchsreihe mit der Initialspannung  $\sigma = 25,0 \text{ kN/m}^2$ :

- $\sigma_0 - \sigma_2 = 0,00 - 25,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(12,5)}$ ,

und nachfolgend für beide Initialspannungen ( $\sigma = 12,5$  und  $25,0 \text{ kN/m}^2$ ):

- $\sigma_2 - \sigma_3 = 25,0 - 50,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(37,5)}$ ,
- $\sigma_3 - \sigma_4 = 50,0 - 100,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(75)}$ ,
- $\sigma_4 - \sigma_5 = 100,0 - 200,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(150)}$ ,
- $\sigma_5 - \sigma_6 = 200,0 - 400,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(300)}$ .

Diese beziehen sich bei den Spannungsintervallen über die Anfangslaststufen,  $\sigma_0 - \sigma_1 = 0,00 - 12,5 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(6,25)}$  bzw.  $\sigma_0 - \sigma_2 = 0,00 - 25,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(12,5)}$ , auf die bis zum Ende der Anfangslaststufe gemessene Verformung. Bei den Spannungsintervallen über die Endlaststufe,  $\sigma_5 - \sigma_6 = 200,0 - 400,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(300)}$ , wurde die Verformung nach 1 d in der Endlaststufe berücksichtigt.

2. ergänzend sind die Steifemodule  $E_{\text{Oed}}$  über die „äußeren Spannungsintervalle bzw. äußere Oedometermodule“ mit dem Beginn der 2. Zwischenlaststufe bei den Versuchsreihen mit der Initialspannung  $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$  bzw. mit der 1. Zwischenlaststufe bei den Reihen der Anfangslaststufe  $\sigma = 25,0 \text{ kN/m}^2$ , dargestellt, welche die Steifigkeit der Versuchsreihen nach Ende der Laststufe  $\sigma = 25,0 \text{ kN/m}^2$  widerspiegeln. Zudem sind die  $E_{\text{Oed}}$  der äußeren Spannungsintervalle zusammen mit dem  $E_{\text{Oed}}$  über das gesamte Spannungsintervall,  $\sigma_0 - \sigma_6 = 0,00 - 400,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(200)}$  dargestellt:

### Äußere Spannungsintervalle – äußere Oedometermodule:

- $\sigma_2 - \sigma_3 = 25,0 - 50,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(37,5)}$ ,
- $\sigma_2 - \sigma_4 = 25,0 - 100,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(62,5)}$ ,
- $\sigma_2 - \sigma_5 = 25,0 - 200,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(112,5)}$ ,
- $\sigma_2 - \sigma_6 = 25,0 - 400,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(212,5)}$ ,

und:

### Gesamtes Spannungsintervall – gesamter Oedometermodul:

- $\sigma_0 - \sigma_6 = 0,00 - 400,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(200)}$ .

Die Haltedauer der Endlaststufen sollte bei allen durchgeführten Versuchsreihen mindestens 4 d betragen um Abschätzungen über das Kriechvermögen treffen zu können. Um Aussagen über das Langzeitverhalten treffen zu können, wurden einzelne Versuchsreihen wesentlich länger (bis zu 170 d) in der Endlaststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  belastet.

Die Darstellung der Oedometermodule erfolgt anhand von Spannungs-Oedometermodul-Linien ( $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}$ ).

## 9.9 Ergebnisse der Oedometerversuche

Die Kennwerte und Ergebnisse der Oedometerversuche sind in tabellarischer und graphischer Form im Anhang in Abschn. A. 3 bis 10 zusammengestellt:

- Zusammenstellung der Bodenkennwerte der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 3),
- Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 4),
- Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile der Oedometer-Versuchsreihen (s. Abschn. A. 5),
- Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , und  $\rho_d$  der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 6),
- Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  und  $n$  der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 7),
- Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{\text{Oed}}$  der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 8),
- Zusammenstellung der Setzungen  $s$  der Oedometerversuchsreihen (s. Abschn. A. 9),
- Zusammenstellung der graphischen Darstellungen der Oedometerversuchsreihen ( $\log t$ - $s'_{\text{ges}}$ - und  $-s'_{\text{ink}}$ -Linien) (s. Abschn. A. 10).



### 9.9.1 Versuchsreihen – unbehandelte Versuchsböden – T1, T2, T3 und S1

An den unbehandelten Versuchsböden wurden insgesamt 5 Versuchsreihen durchgeführt die sich wie folgt unterteilen:

- T1-1d 12,5-5d 400,
- T1-3d 25-4d 400,
- T2-1d 25-19d 400,
- T3-1d 25-32d 400,
- S1-1d 25-19d 400.

Der unbehandelte Torf T1 wurde in 2 Versuchsreihen untersucht. In der ersten Versuchsreihe wurde der T1 mit der Initialspannung  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  über die Dauer von 1 d belastet. Anschließend folgten die Zwischenlaststufen mit jeweils 1 d Haltedauer (die Zwischenlaststufen wurden bei allen Versuchsreihen über die Dauer von 1 d gehalten (s. Abschn. 9.5)) und die Endlaststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  über 5 d.

In der zweiten Versuchsreihe (Versuchsreihe: T1-3d 25-4d 400) wurde der T1 mit der Anfangsbelastung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  über einen Zeitraum von 3 d belastet, woran die Zwischenlaststufen folgten und die Endlaststufe mit einer Haltedauer von 4 d.

Der Torf T2 wurde unbehandelt in der Versuchsreihe T2-1d 25-19d 400 mit der Initialspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  über eine Haltedauer von 1 d untersucht. Die Endlaststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  wurde über 19 d aufgebracht. Der Torf T3 wurde ebenfalls unbehandelt mit der Anfangsspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  über 1 d belastet (Versuchsreihe: T3-1d 25-32d 400), die Endlaststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  wurde hier jedoch über insgesamt 32 d gehalten.

Der Vergleichsboden, Schluff S1, wurde unbehandelt analog dem unbehandelten T2 untersucht. Die unbehandelten T1-Versuchsreihen zeigen mit den vergleichsweise sehr hohen Einbauwasseranteilen  $w_{AE}=68,81$  bzw.  $70,19 \text{ M.-%}$  (Einbauwassergehalt  $w_E=220,46$  bzw.  $235,49 \text{ M.-%}$ ) rel. Abweichung zum mittleren bestimmten natürlichen Wasseranteil =  $2,35$  bzw.  $0,34 \text{ %}$  (s. Abschn. A.5). In Verbindung mit den niedrigen Korndichten  $\rho_s$  von  $2,057 \text{ g/cm}^3$  (nach Trocknung bei  $105^\circ\text{C}$ ) hatten diese Versuchsreihen damit die höchsten Anfangsporenzahlen  $e_{\text{ges}(0,0)}$  von  $4,47$  bis  $4,74$  [-] (Porenräume  $n_{\text{ges}(0,0)}$  von  $0,82$  bis  $0,83$  [-], s. Abschn. A. 8).

Die Versuchsreihe des unbehandelten T2 zeigt mit der höheren Korndichte  $\rho_s$  von  $2,139 \text{ g/cm}^3$  und einem wesentlich geringeren Einbauwasseranteil  $w_{AE}=56,36 \text{ M.-%}$  ( $w_E=129,15 \text{ M.-%}$ ) Abweichung zum mittleren bestimmten natürlichen Wasseranteil von  $1,39 \text{ %}$ . Hier war die

Anfangsporenzahl  $e_{ges(0,0)}$  mit 2,65 [-] ( $n_{ges(0,0)}$  von 0,73 [-]) deutlich niedriger als bei den T1-Reihen.

Die unbehandelte T3-Versuchsreihe weist mit 2,324 g/cm<sup>3</sup> die höchste Korndichte  $\rho_s$  unter den untersuchten Torfen auf und zeigte den niedrigsten natürlichen Einbauwasseranteil  $w_{AE}=49,25$  M.-% ( $w_E=97,03$  M.-%, rel. Abweichung zum mittleren bestimmten natürlichen Wasseranteil = -0,35 %). Die Einbauporenzahl  $e_{ges(0,0)}$  lag hier bei 2,24 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,69$  [-]).

Der Versuchsschluff S1 zeigt im Vergleich zu den Torfen T1 bis T3 eine sehr hohe Korndichte  $\rho_s$  von 2,682 g/cm<sup>3</sup> und einen deutlich niedrigeren natürlichen Einbauwasseranteil  $w_A$  von 17,10 M.-% ( $w_E$  von 20,63 %, rel. Abweichung zum mittleren bestimmten natürlichen Wasseranteil = 1,92 %). Die Porenzahl  $e_{ges(0,0)}$  beträgt hier vor Aufbringung der Belastung 0,63 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,39$  [-]).

Im Ergebnis zeigen die Einbauparameter eine sehr gute Übereinstimmung zu den bestimmten in situ Werten der Versuchsböden. Für weitere Einbauparameter s. Abschn. A. 5 bis 8.

Die Versuchsreihe T1-1d 12,5-5d 400 mit der Initialspannung  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> zeigt nach 1 d in dieser Laststufe eine bez. ges. Setzung  $s'_{ges}$  bzw. ink. Setzung  $s'_{ink}$  von 0,071 [-] ( $E_{Oed(6,25)}=0,18$  MN/m<sup>2</sup>, s. Abschn. A. 8) und darauf in der nächsten Laststufe, der Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup>, eine um fast die Hälfte geringere ink. Setzung  $s'_{ink}=0,038$  [-] ( $E_{Oed(18,75)}=0,33$  MN/m<sup>2</sup>) mit  $s'_{ges}=0,109$  [-].

Hingegen setzt sich die Reihe T1-3d 25-4d 400 bezogen um  $s'_{ges}$  bzw.  $s'_{ink}=0,115$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,20$  MN/m<sup>2</sup>) nach 1 d Haltedauer ( $s'_{ink}=0,123$  [-] nach 3 d Haltedauer) in ihrer Anfangslaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup>.

In der nächsten Laststufe  $\sigma=50,0$  kN/m<sup>2</sup> zeigen beide Versuchsreihen ähnliche Setzungsverläufe mit ink. Setzungen  $s'_{ink}$  von 0,059 und 0,047 [-] ( $E_{Oed(37,5)}=0,43$  bzw. 0,53 MN/m<sup>2</sup>). Mit den folgenden Spannungssteigerungen zeigen sich dann steigende bez. ink. Setzungsanteile bei beiden Versuchsreihen und eine zunehmende Überdeckung der Zeitsetzungslinien (log t- $s'_{ink}$ -Linien, s. Abschn. A. 10) mit einheitlichen Werten der bez. ink. Setzungen in den Laststufen  $\sigma=100, 200$  und 400 kN/m<sup>2</sup> mit  $s'_{ink}$  von 0,083, 0,099 und 0,096 [-] ( $E_{Oed}=0,60, 1,01$  bzw. 2,09 MN/m<sup>2</sup>) und  $s'_{ink}=0,083, 0,103$  und 0,100 [-] ( $E_{Oed}=0,60, 0,97$  bzw. 1,99 MN/m<sup>2</sup>). Die bez. ges. Setzungen betragen nach 1 d Haltedauer auf der Endspannungsstufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup> sehr einheitliche  $s'_{ges}=0,444$  bzw. 0,455 [-]. Die äußeren Steifmodule über das Intervall  $\sigma=25,0-400,0$  kN/m<sup>2</sup> betragen 1,12 bzw. 1,13 MN/m<sup>2</sup>, insgesamt ergeben sich sehr niedrige Werte mit  $E_{Oed(212,5)}$  von 0,90 bzw. 0,88 MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.2 bis Abb. 9.4).

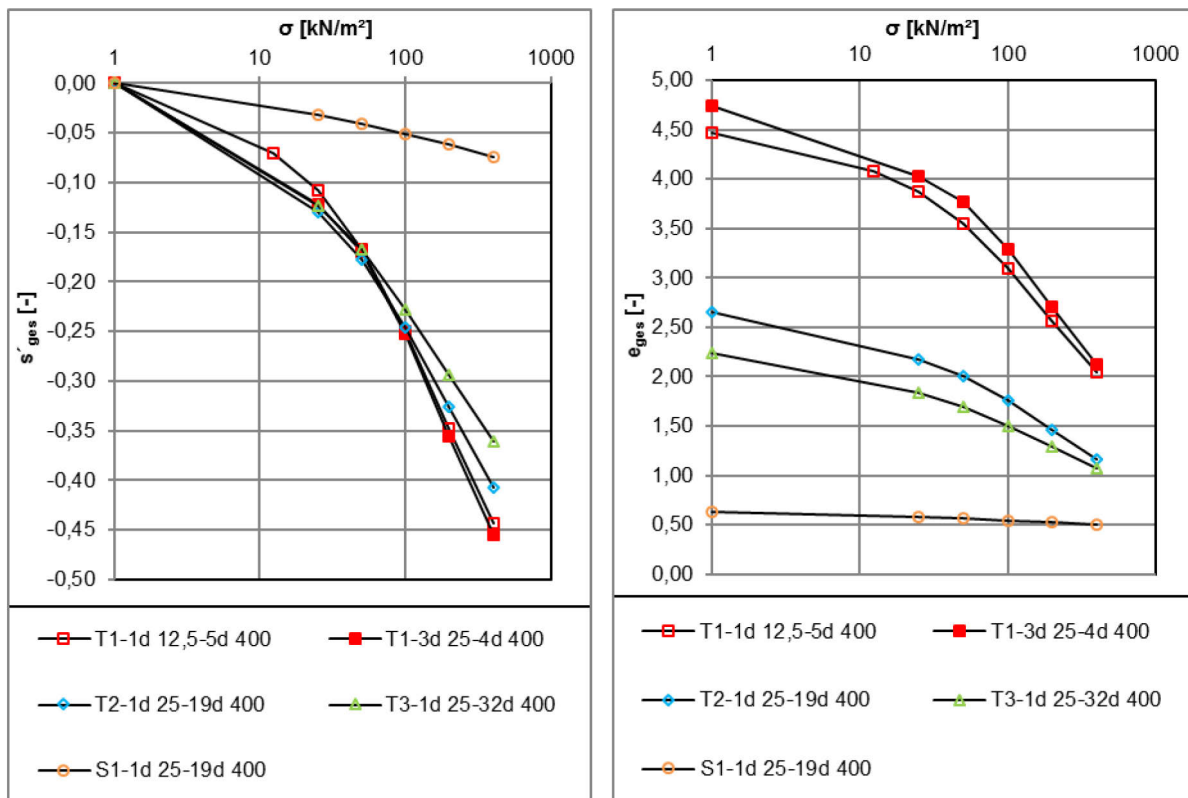


Abb. 9.2: Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

Die Versuchsreihen T2-1d 25-19d 400 und T3-1d 25-32d 400 zeigen in der Anfangsspannungsstufe etwas höhere bez. Setzungen als die vergleichbare T1 Versuchsreihe T1-3d 25-4d 400 entgegen der beträchtlich geringeren Porenzahlen.

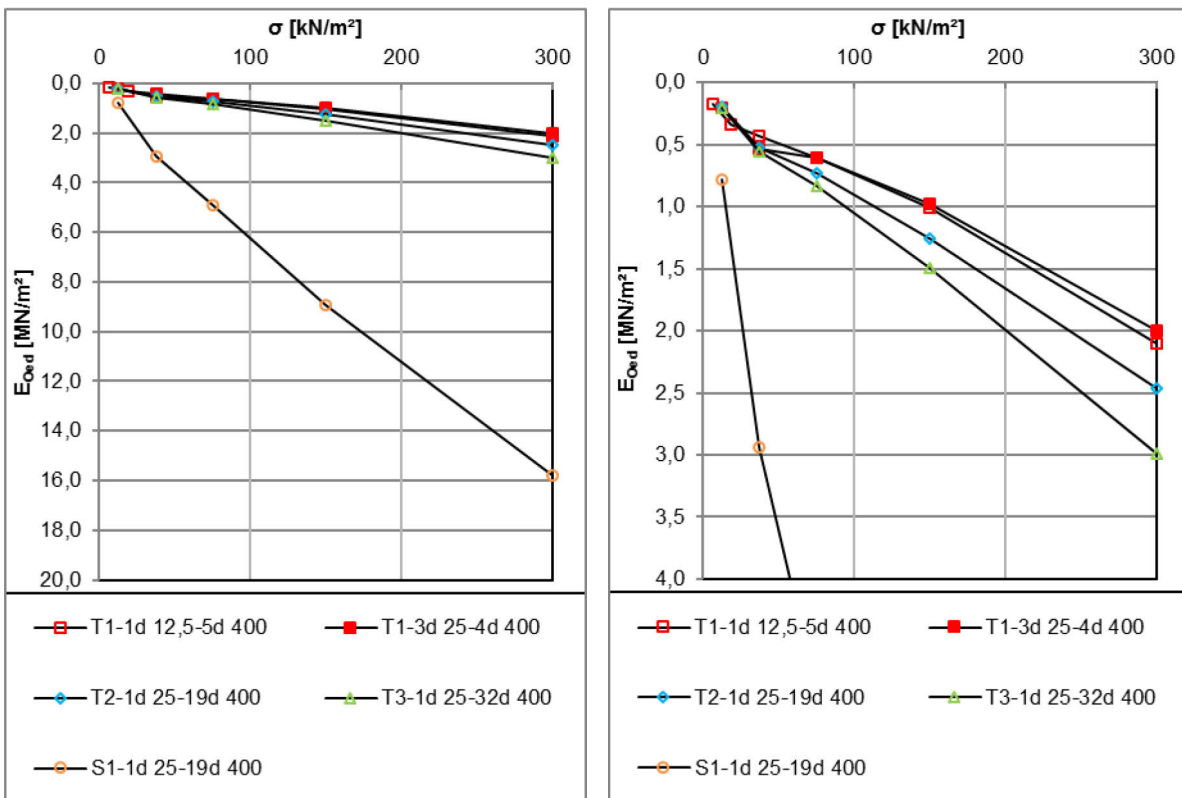
Die Reihe T2-1d 25-19d 400 zeigt hier bez. Setzungen von  $s'_{ges}$  bzw.  $s'_{ink} = 0,130$  [-] ( $E_{Oed} = 0,19$  MN/m<sup>2</sup>) nach 1 d Haltedauer. Die Versuchsreihe T3-1d 25-32d 400 hingegen setzt sich etwas geringer mit  $s'_{ges}$  bzw.  $s'_{ink} = 0,123$  [-] ( $E_{Oed} = 0,20$  MN/m<sup>2</sup>).

In der folgenden Zwischenlaststufe  $\sigma = 50,0$  kN/m<sup>2</sup> fallen die bez. ink. Setzungen mit  $s'_{ink} = 0,048$  und  $0,045$  [-] ( $E_{Oed} = 0,52$  bzw.  $0,56$  MN/m<sup>2</sup>) dann vergleichbar der T1-Versuchsreihen, die ebenfalls wesentlich geringere bez. Setzungen mit der ersten Zwischenlaststufe aufzeigen, deutlich geringer aus. Vergleichbar der T1 Reihen nehmen die bez. Setzungen dann mit den folgenden Erhöhungen der Spannung zu und bewegen sich in den Stufen  $\sigma = 200$  und  $400$  kN/m<sup>2</sup> auf etwa gleichem Niveau. Die bez. ink. Setzungen der T2-Reihe sind deutlich größer als die der T3-Reihe und betragen in den Laststufen  $\sigma = 100, 200$  und  $400$  kN/m<sup>2</sup>  $s'_{ink} = 0,068, 0,080, 0,081$  [-] mit  $E_{Oed} = 0,73, 1,25, 2,46$  MN/m<sup>2</sup> und  $s'_{ink} = 0,060, 0,067$  und  $0,067$  [-] mit  $E_{Oed} = 0,84, 1,50$  und  $2,99$  MN/m<sup>2</sup> nach 1 d Haltedauer. Die bez. gesamten Setzungen betragen nach 1 d Haltedauer auf der Endspannungsstufe  $\sigma = 400$  kN/m<sup>2</sup>  $s'_{ges} = 0,407$  bzw.  $0,360$  [-] mit  $E_{Oed(212,5)} = 1,35$  bzw.  $1,57$  und  $E_{Oed(200)} = 0,98$  bzw.  $1,11$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.2 bis Abb. 9.4).

Die Versuchsreihe des Schluffs, S1-1d 25-19d 400, zeigt demgegenüber nach einer verhältnismäßig großen bez. gesamten Setzung  $s'_{ges}$  bzw. ink. Setzung  $s'_{ink}$  von  $0,032$  [-] ( $E_{Oed(12,5)} = 2,94$

MN/m<sup>2</sup>) nach 1 d in der Anfangsspannungsstufe geringfügig zunehmende, aber nahezu konstante bez. ink. Setzung  $s'_{ink}$  in den nachfolgenden Laststufen  $\sigma=50,0, 100, 200$  und  $400$  kN/m<sup>2</sup> von  $s'_{ink}=0,009, 0,010, 0,011, 0,013$  [-] mit inneren  $E_{Oed}=2,94, 4,92, 8,96$  und  $15,79$  MN/m<sup>2</sup>. Die bez. gesamte Setzung nach 1 d in der Endlaststufe beträgt  $0,075$  [-] ( $E_{Oed(212,5/200)}=8,82 / 5,36$  MN/m<sup>2</sup>) und hebt sich damit deutlich von den Versuchstorfen ab (s. Abb. 9.2 bis Abb. 9.4).

Insgesamt betrachtet zeigen die Torfe T1 bis 3 ein sehr ausgeprägtes, aber entgegen ihren unterschiedlichen Zusammensetzungen, nahezu einheitliches Setzungsverhalten was die Endsetzungen nach 1 d anbelangt.

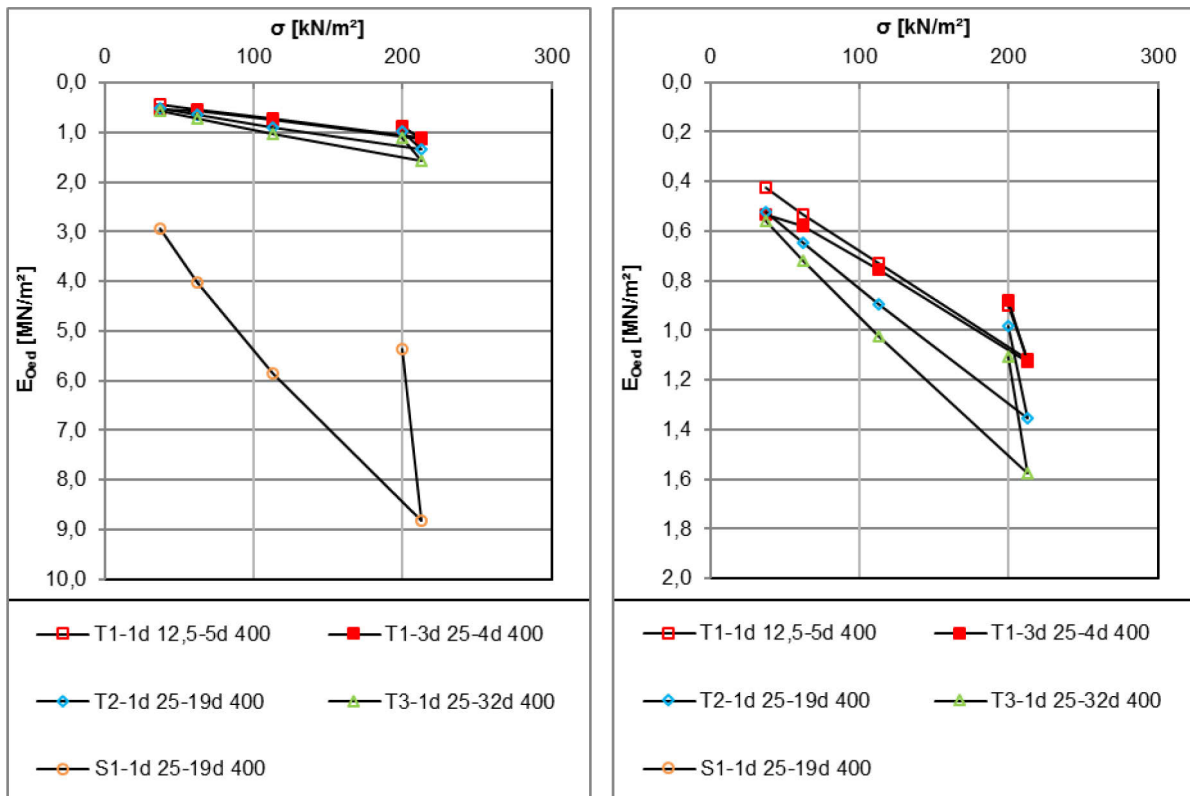


**Abb. 9.3:** Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – I.:  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$  –  $y_{max}=20,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$  –  $y_{max}=4,0$ .

Betrachtet man die ink. bez. Setzungen  $s'_{ink}$  innerhalb der Laststufen zeigt sich, dass sich die T1-1d 12,5-5d 400-Versuchsreihe mit der ersten Laststufe  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> wesentlich geringer setzt als die Reihe T1-3d 25,0-10d 400 in der ersten Laststufe, die hier mit der doppelten Spannung in der Anfangslaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> belastet wurde. Betrachtet man die Zeitsetzungslinien der bez. gesamten Setzungen  $s'_{ges}$  (log t- $s'_{ges}$ -Linien, s. Abschn. A. 9.1.1) der Laststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup>, dann ergibt sich eine Überlagerung der Linien zum Ende der Laststufe.

Im Verlauf der Untersuchungen zeigen sich bei den Torfen T1 bis T3 nach der Initiallaststufe, in der ersten Zwischenlaststufe ( $\sigma=25,0$  bzw.  $50,0$  kN/m<sup>2</sup>), geringere ink. bez. Setzungen, die dann sukzessive mit der Steigerung der eingebrachten Spannungen zunehmen bzw. sich die Zeitsetzungslinien (log t- $s'_{ink}$ -Linien) der einzelnen Versuchsreihen in den beiden letzten Laststufen ( $\sigma=200$  bzw.  $400$  kN/m<sup>2</sup>) nahezu kongruent darstellen (s. Abschn. A. 9.1.2).

Zudem zeigt sich, dass die  $\log t-s'_{ink}$ -Linien der bez. ink. Setzungen der T1-Versuchsreihen im Gegensatz zu den T2- und T3-Reihen, deutlich steiler fallen bzw. mit der ersten Zwischenlaststufe lineare fallende Verläufe der Zeitsetzungslinien in der abgebildeten halblogarithmischen Darstellung zeigen. Gegensätzlich setzten sich die T2- und T3-Reihen zu Beginn der einzelnen Laststufe wesentlich langsamer, zeigen konkave Verläufe zu Beginn der Laststufen und flachen zum Ende der Laststufen ab und bilden damit in der halblogarithmischen Darstellungen s-förmige Verläufe aus bzw. zeigen einen Übergang in die Sekundärsetzung (s. Abschn. A. 9.1.2).



**Abb. 9.4:** Versuchsreihen – unbehandelten Versuchsböden – l.:  $\sigma-E_{Oed(außen)} - y_{max}=10,0$ , r.:  $\sigma-E_{Oed(außen)} - y_{max}=2,0$ .

Diese Verläufe stellen sich bei den T1-Reihen nicht in dieser Form dar, ausgenommen bei der Reihe T1-1d 12,5-5d 400 in der Initialspannungsstufe. Aber auch hier deutet sich dieser Verlauf lediglich an. Die T1-3d 25,0-10d 400-Reihe zeigt in der Initialspannungsstufe einen konvexen Verlauf der  $\log t-s'_{ink}$ -Linie infolge deutlicher Sofort- und Primärsetzung zu Beginn der Laststufe, die dann nahezu linear bis zum Ende der Stufe ausläuft. Weiter sind aber auch bei den T2- und T3-Reihen mit der Zunahme der Spannungen, ausgenommen der ersten Zwischenlaststufe bzw. der Endlaststufe ( $\sigma=50,0$  bzw.  $400 \text{ kN/m}^2$ ), deutlich steiler fallende Graphen festzustellen. Betrachtet man die Zeitsetzungslinien der bez. gesamten Setzungen  $s'_{ges}$  der beiden unbehandelten Versuchsreihen des T1, zeigt sich das insgesamt ähnliche Setzungsverhalten deutlich. Hingegen der unbehandelten Versuchstorfe zeigt der Versuchsboden S1 nach einer verhältnismäßig großen ink. bez. Setzung in der Anfangslaststufe beinahe gleichbleibende ink. Verformungen über den Verlauf der Laststufen.

Ferner sind bei der S1-1d 25-19d 400-Versuchsreihen im dargestellten Maßstab keine s-förmigen Verläufe der  $\log t-s'_{ink}$ -Linien, mit Ausnahme der Initialspannungsstufe wo sich dieser andeutet, erkennbar.

Stellt man die Verläufe der Porenzahlen den Setzungen über die Spannungsstufen gegenüber lassen sich keine Korrelation bei den Versuchsreihen der Torfe erkennen. Die Versuchsreihen des T1 weisen hier bei etwa doppelt so hohen Porenzahlen wie die Versuchsreihen des T2 und T3 nahezu ähnliche bez. ges. Setzungen aus.

Betrachtet man die  $\log t-s'_{ink}$ -Linien der unbehandelten Torfe in der Endlaststufe bis 1d offerieren die Verläufe dieser augenscheinlich den Übergang zu einem deutlich abnehmendem Setzungsverhalten – vor allem die s-förmigen Graphen der Torfe 2 und 3. Befasst man sich dann mit den Verläufen bis zum Ende der Versuche, ist ein nahezu lineares Auslaufen der Zeitsetzungslinien erkennbar, welches sich auch teilweise in den behandelten Versuchsreihen abbildet und auf ein sehr ausgeprägtes noch vorhandenes Kriechpotential schließen lässt (s. Abschn. 9.1.2).

Die halblogarithmischen Darstellungen des Verlaufes der Porenzahl  $e_{ges}$  über die Spannung  $\sigma$  ( $\log \sigma-e_{ges}$ -Linien) zeigen bei den unbehandelten Versuchsreihen im Spannungsbereich  $\sigma = 100$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  einen linearen Verlauf, womit eine direkte Bestimmung des Kompressionsbeiwertes  $C_c$  über die tatsächlichen Porenzahlen möglich ist.

Die Versuchsreihen der Torfe T1, T1-1d 12,5-5d 400 und T1-3d 25-4d 400, zeigen  $C_c$ -Werte von 1,77 bzw. 1,95 [-]. Die Torfe T2 und T3 weisen mit einem flacheren Verlauf  $C_c$ -Werte von 0,97 und 0,72 [-] aus. Damit korrespondieren die  $C_c$ -Werte mit der Korrelation nach [195] (s. Abb. 7.20). Die im Gegensatz dazu deutlich flacher verlaufende Spannungs-Porenzahllinie der S1-Reihe zeigt eine Steigung von  $C_c=(-)0,07$  [-].

Der Torf 1 zeigt mit einem um >23% höheren Wasseranteil als der T2 und einem um >38 % höheren Wasseranteil als der T3 bis zum Ende der Spannungsstufe  $\sigma=50 \text{ kN/m}^2$  sehr ähnliche Endsetzungen. Die Endsetzungen zeigen dann erst mit den nachfolgenden Laststeigerungen Unterschiede, welche in Anbetracht der Kennwerte verhältnismäßig nur sehr gering ausfallen.

Zu beachten ist, dass der vermutliche Übergang von der Primär- in die Sekundärsetzung nur bei den Versuchsreihen der Torfe T2 und T3 sichtbar ist bzw. nicht explizit abgewartet wurde mit der Erhöhung der Spannungsstufen nach 1 d.

Erkennbar ist, dass die Zeitsetzungslinien der Torfe 2 und 3 über den logarithmischen Verlauf der Zeit wesentlich schneller und prägnanter abflachen als die des T1, was sich bei diesem in den über 1 d gehaltenen Zwischenlaststufen mit den fast linearen Verläufen in den halblog. Darstellungen deutlich darstellt.

Der Grund für die Unterschiede im Setzungsverhalten kann daher mit den im Bodengefüge enthaltenen organischen Bestandteilen erklärt werden.

Anzunehmen ist, dass das Porenwasser beim T1 zu einem Teil in feineren Porenstrukturen, den Mikroporen, gebunden ist (bzw. verhältnismäßig zum T2 und T3 zu einem größeren Anteil in diesen gebunden), aus denen im Gegensatz zu den Makroporen, das Porenwasser aufgrund der kleineren bzw. stark verzweigten Dränwege, nur deutlich langsamer abfließen kann bzw. dafür eine wesentlich höhere totale und damit höhere neutrale Spannungen notwendig ist.

## 9.9.2 T1-Versuchsreihen

### 9.9.2.1 Versuchsreihen – T1-60 und 105 °C

Insgesamt wurden am Versuchsboden T1 zwei durch Trocknung (s. Probenbehandlung) bei 60 und 105°C behandelte Versuchsreihen durchgeführt:

- T1-60°C-1d 12,5-20d 400 und
- T1-105°C-1d 12,5-20d 400.

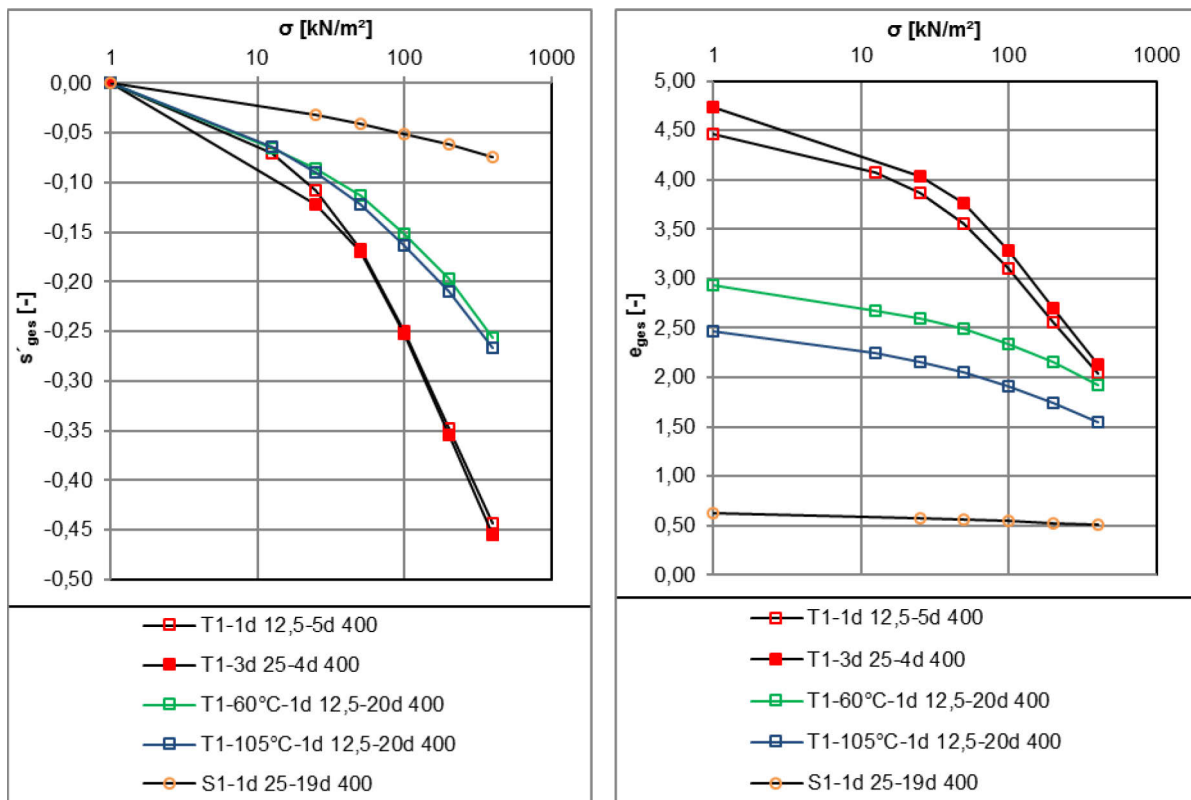
Die Initialspannung  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  wurde hier bei beiden Versuchsreihen über die Haltedauer von 1 d aufgebracht. Die Spannung der Endlaststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  wurde über insgesamt 20 d gehalten. Die Versuchsreihen T1-60°C-1d 12,5-20d 400 und T1-105°C-1d 12,5-20d 400 wurden mit Wasseranteilen  $w_{AE}=60,71$  bzw.  $55,71 \text{ M.-%}$  ( $w_E$  von  $154,53$  bzw.  $125,81 \text{ M.-%}$ ) eingebracht und zeigten damit Abweichungen zum mittleren bestimmten natürlichen Wasseranteil  $w_{An}$  von  $-11,47$  bzw.  $-18,76 \text{ %}$ . Die T1-60°C-1d 12,5-20d 400-Reihe weist bei einer Korndichten  $\rho_s$  von  $2,038 \text{ g/cm}^3$  (nach Trocknung bei 60°C) eine Anfangsporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  von  $2,93 [-]$  ( $n_{ges(0,0)}$  von  $0,75 [-]$ ) auf. Die Versuchsreihe T1-105°C-1d 12,5-20d 400-Reihe zeigt bei einer Korndichten  $\rho_s$  von  $2,057 \text{ g/cm}^3$  (nach Trocknung bei 105°C) eine Anfangsporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  von  $2,47 [-]$  ( $n_{ges(0,0)}$  von  $0,71 [-]$ ) (s. Abb. 9.5 bis Abb. 9.7).

Unter Betrachtung der Spannungs-Setzungslinien ergeben sich bei der T1-60°C-1d 12,5-20d 400-Reihe nach 1 d in der Anfangslaststufe bez. ges. bzw. bez. ink. Setzungen  $s'_{ges/ink}=0,065 [-]$  ( $E_{Oed(6,25)}=0,19 \text{ MN/m}^2$ ). Die Reihe T1-105°C-1d 12,5-20d 400 zeigt äquivalente Setzungen  $s'_{ges/ink}$  von  $0,064 [-]$  mit  $E_{Oed(6,25)}=0,20 \text{ MN/m}^2$ . In den nachfolgenden Spannungsstufen zeigen sich bei der mit niedrigerer Temperatur getrockneten Reihen zuerst kleinere als in der Anfangslaststufe gemessene bez. ink Setzungen die dann sukzessive mit den Laststeigerungen zunehmen und auch kleiner bzw. etwa gleich den bez. ink. Setzungen der 105 °C-Reihe sind mit  $s'_{ink}=0,021, 0,028, 0,038, 0,046$  und  $0,059 [-]$  ( $E_{Oed}=0,61, 0,90, 1,32, 2,17$  und  $3,37 \text{ MN/m}^2$ ). Die bez. ink Setzungen der 105 °C-Reihe betragen  $s'_{ink}=0,026, 0,033, 0,040, 0,047$  und  $0,058 [-]$  und  $s'_{ges(400)}=0,257 [-]$  ( $E_{Oed}=0,47, 0,76, 1,24, 2,14$  und  $3,47 \text{ MN/m}^2$ ).

Die Oedometermodule über das Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  belaufen sich hier auf  $2,19$  bzw.  $2,11 \text{ MN/m}^2$  – gesamt gesehen ergibt sich ein  $E_{Oed(200)}$  von  $1,56$  bzw.  $1,50 \text{ MN/m}^2$  (s. Abb. 9.5 bis Abb. 9.7).

Im Ganzen zeigen die durch Trocknung behandelten Versuchsreihen ein sehr einheitliches Setzungsverhalten, wobei die ink. bez. Setzungen, der mit der geringeren Trocknungstemperatur





**Abb. 9.5:** T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e'_{ges}$ .

behandelte Versuchsreihe T1-60°C-1d 12,5-20d 400, in den Zwischenlaststufen ( $\sigma=25, 50, 100, 200 \text{ kN/m}^2$ ) nach 1 d durchweg geringer sind als die der 105°C-Reihe.

Betrachtet man die  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ -Linien der bez. ink. Setzungen, zeigen sich in der Anfangslaststufe s-förmige Ausbildungen der beiden Graphen, die aber durch eine deutliche Kompression im Zeitintervall 0,1 bis 0,2 d hervorgerufen wurde und in den folgenden Spannungsstufen nicht mehr ersichtlich sind. Im Gegensatz zu den unbehandelten T1-Versuchsreihen zeigen sich wesentlich flachere Verläufe der Graphen, die mit der Spannungszunahme deutlich von den fast linearen Verläufen der unbehandelten abweichen und mit den Spannungszunahmen zunehmend konkav ausgebildet darstellten, also die Setzung deutlich über den Verlauf der Zeit  $t$  zunehmen.

Besonders auffällig zeigen sich hier die  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ -Linien der Endlaststufe, die nach Ablauf der 24 h steiler als zuvor fallen und damit noch ein erhebliches Setzungspotential anzeigen obwohl die Linien bei 1d einen anstehenden Übergang in die Sekundärsetzung bzw. den Übergang zum Wendepunkt der Linien vermuten lassen ähnlich der unbehandelten Versuchsreihen (s. Abschn. 9.2.2).

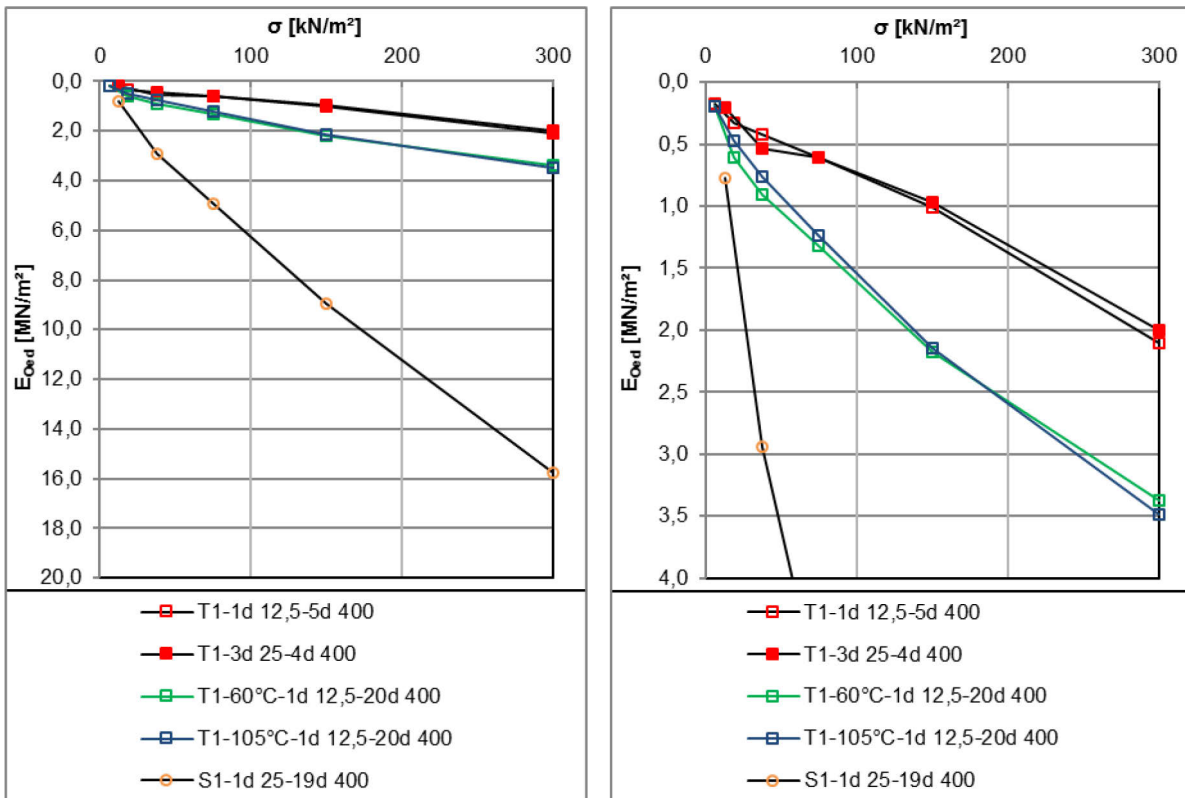


Abb. 9.6: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(innen)$  –  $y_{max}=20,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(innen)$  –  $y_{max}=4,0$ .

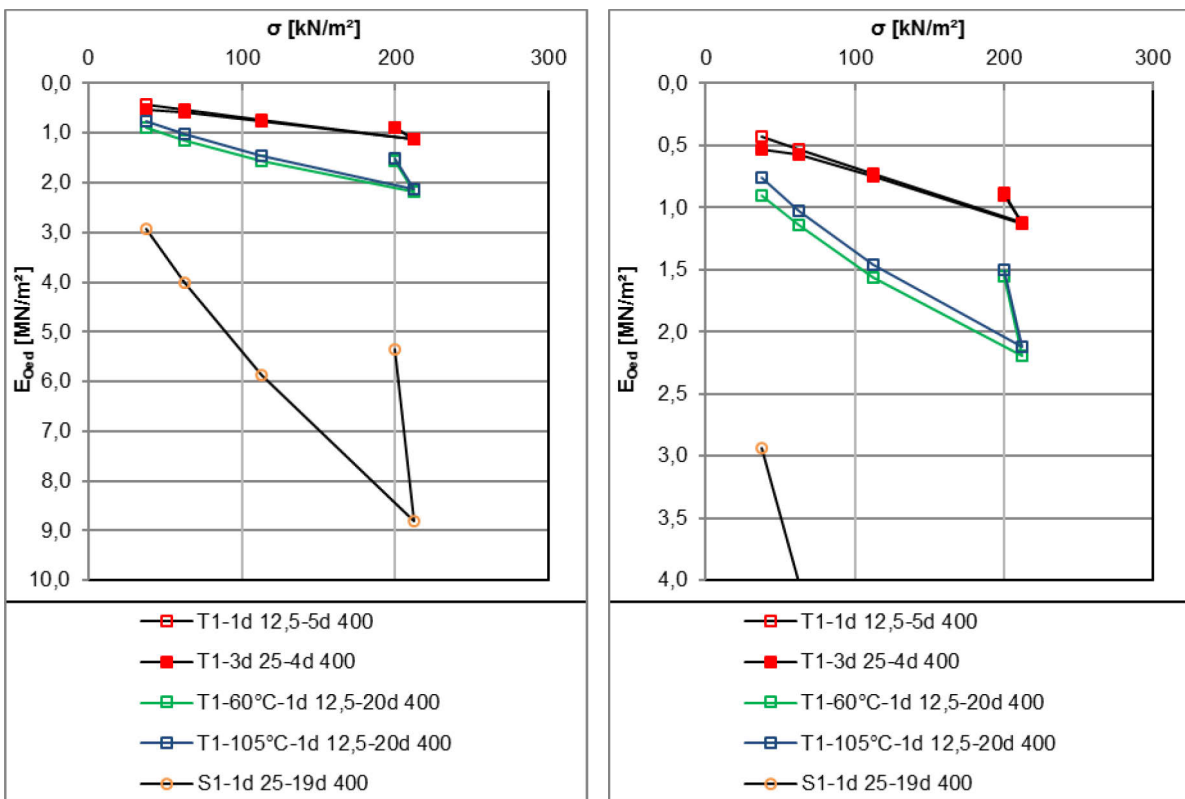


Abb. 9.7: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(au\beta en)$  –  $y_{max}=10,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(au\beta en)$  –  $y_{max}=4,0$ .

### 9.9.2.2 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Insgesamt wurden am Versuchsboden T1 2 Versuchsreihen durchgeführt, welche mit dem Blähton Liapor (LP) behandelt wurden:

- T1-DM-10 % LP-1d 12,5-5d 400 und
- T1-DM-20 % LP-1d 12,5-5d 400.

Die behandelten Versuchsreihen des T1 wurden mit Wasseranteilen  $w_A=61,32$  bzw.  $57,46$  M.-% ( $w_E=58,56$  bzw.  $135,05$  %) eingebaut. Die Abweichungen zum mittleren berechneten Wasseranteil  $w_{Acal}$  beliefen sich damit auf  $-1,65$  und  $-0,54$  %. Die Einbauporenzahlen  $e$  ergeben zu  $3,39$  und  $3,28$  [-] ( $n=0,77$  und  $0,77$  [-]).

Die Versuchsreihen wurden über einen Zeitraum von 1 d mit der Initialspannung  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> belastet und insgesamt über 5 d auf der Endlaststufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup> gehalten.

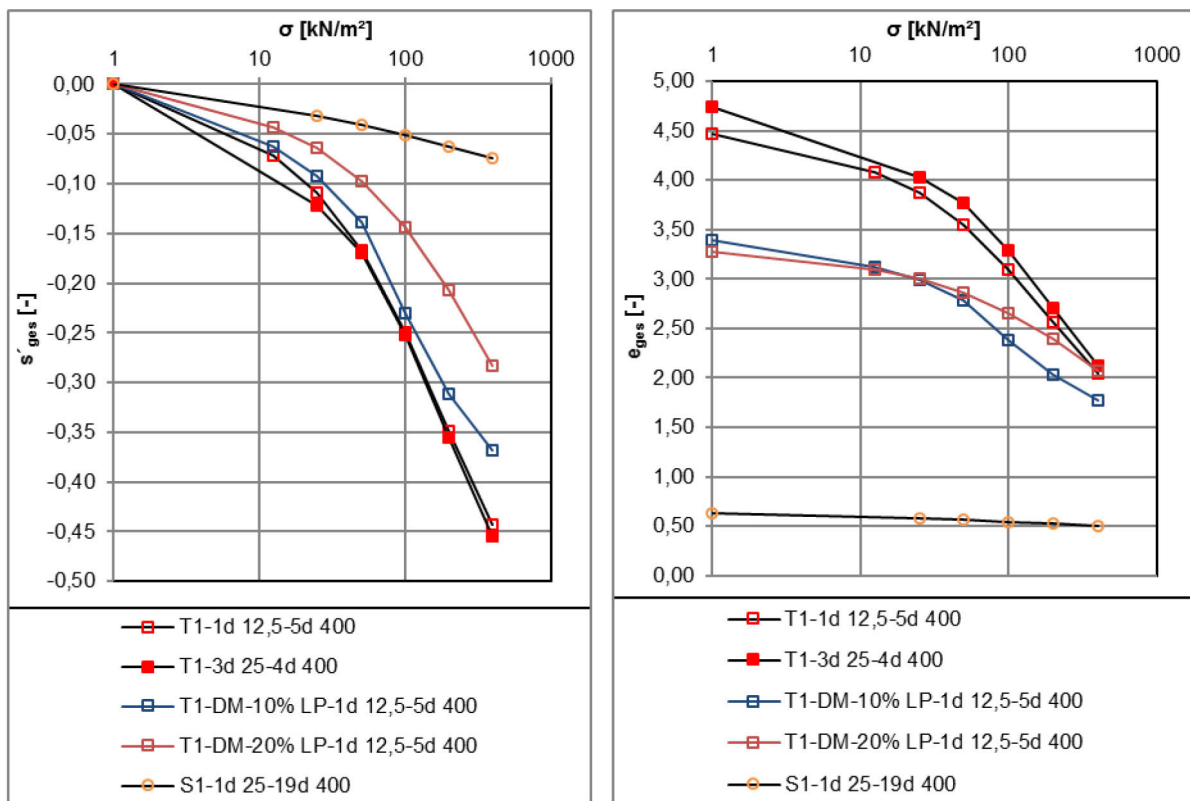


Abb. 9.8: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

In der Anfangslaststufe zeigen beide Versuchsreihen der unbehandelten T1 Reihe (T1-1d 12,5-5d 400) übereinstimmende s-förmige Verläufe  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ -Linien. Die  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ -Linien zeigen in den ersten beiden Zwischenlaststufen einen konkaven Verlauf über das ermittelte Zeitintervall und in den daran folgenden Laststufen lineare Verläufe (s. Abschn. A. 9.3.2).

Die bez. ges. bzw. ink Setzungen  $s'_{ges/ink}$  zum Ende der Laststufe betragen hier 0,063 bzw. 0,043 [-] mit  $E_{Oed(6,25)}$ -Werten von 0,20 und 0,29 MN/m<sup>2</sup>. In der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> zeigen die Reihen dann die geringsten bez. ink. Setzungen über den Versuchsverlauf in Höhe von  $s'_{ink}=0,030$  bzw. 0,021 [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,42$  bzw. 0,59 MN/m<sup>2</sup>).

Im Gegensatz zu der mit 20 M.-% behandelten Versuchsreihen, die mit den ansteigenden Spannungen über die Laststufen zunehmende bez. ink. Setzungen ausweist, zeigt die T1-DM-10 % LP-1d 12,5-5d 400-Reihe nur zunehmende bez. ink Setzungen bis zum Ende der Laststufe  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup>, daran sinken die bez. ink. Setzungen.

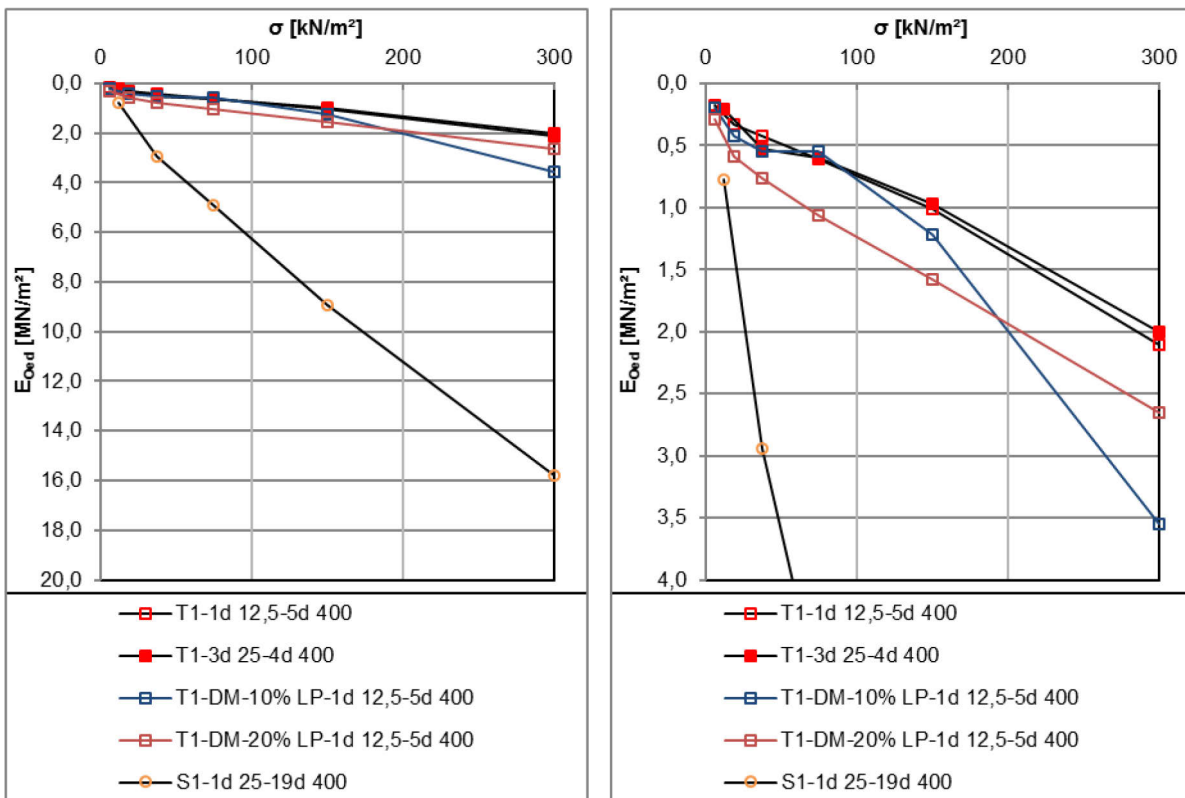


Abb. 9.9: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=20,0$ , r.:  $\sigma-E_{Oed(innen)} - y_{max}=4,0$ .

Über den Verlauf der Spannungsstufen ab  $\sigma=50$  kN/m<sup>2</sup> betragen diese bei der mit 10 M.-% behandelten Reihe  $s'_{ink}=0,046, 0,091, 0,082$  und  $0,056$  [-] ( $E_{Oed}=0,54, 0,55, 1,22$  und  $3,55$  MN/m<sup>2</sup>) bei einer bez. ges. Setzung  $s'_{ges}=0,368$  [-] nach 1 d in der Endlaststufe. Die mit 20 M.-% behandelte Reihe zeigt ab der Spannungsstufe  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup> über den Belastungsverlauf bez. ink Setzungen nach 1 d von  $s'_{ink}=0,033, 0,047, 0,064$  und  $0,076$  [-] ( $E_{Oed}=0,76, 1,06, 1,57$  und  $2,64$  MN/m<sup>2</sup>) bei einer bez. ges. Setzung  $s'_{ges}=0,283$  [-] nach 1 d in der Endlaststufe (s. Abb. 9.8 bis Abb. 9.10).

Auch hier zeigen die  $\sigma-s'_{ink}$ -Linien in der Endlaststufe nach Ablauf der 24 h linear abfallende Graphen, bei der mit 10 M.-% behandelten Reihe mit deutlich zunehmende Tendenzen.

Stellt man die äußeren Steifemodule über das Spannungsintervall 25,0 bis 400 kN/m<sup>2</sup> gegenüber ergeben sich  $E_{Oed(212,5)}$ -Werte von 1,36 bzw. 1,71 MN/m<sup>2</sup>. Ein Vergleich der Module über das gesamte Spannungsintervall ( $\sigma=0,00$  bis 400 kN/m<sup>2</sup>) ergibt  $E_{Oed(200)}=1,09$  bzw. 1,41 MN/m<sup>2</sup>.

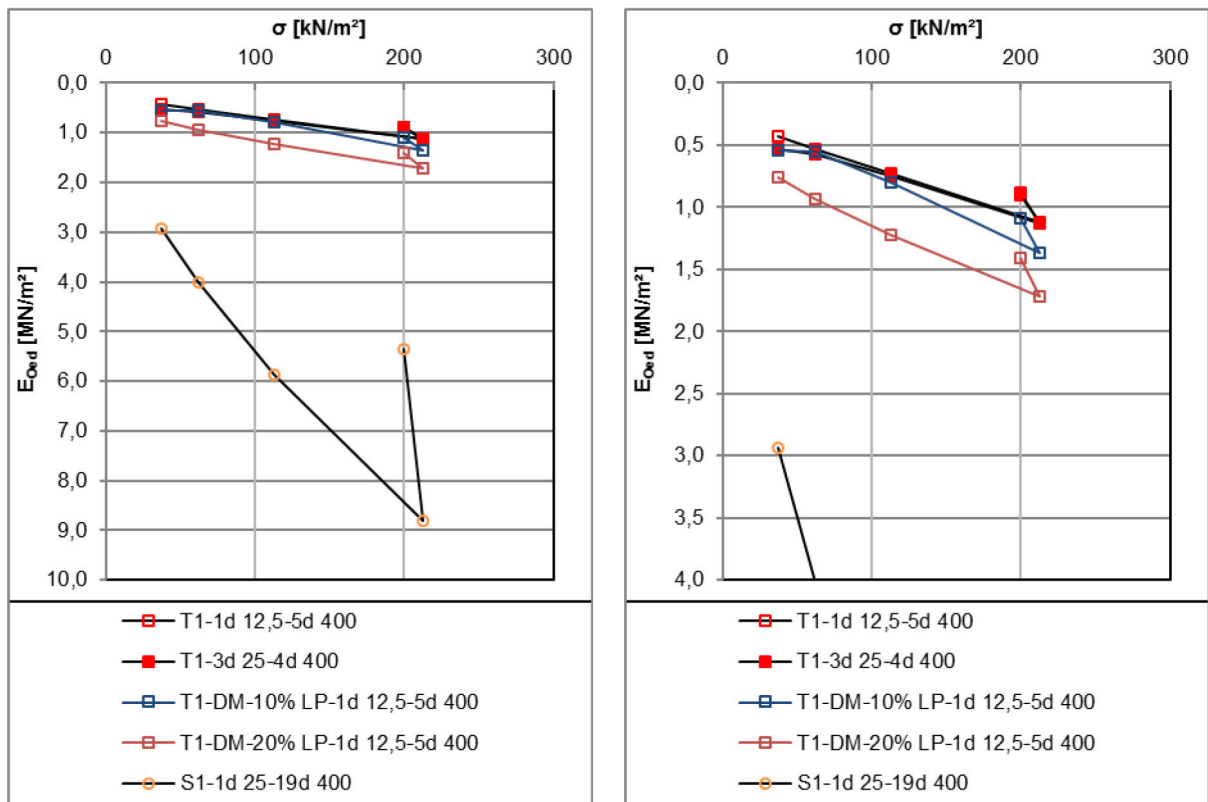


Abb. 9.10: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$  –  $y_{max}=10,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed(au\beta en)}$  –  $y_{max}=4,0$ .

### 9.9.2.3 T1-DM-B500-Versuchsreihen

Mit dem Mischbindemittel B500 wurden insgesamt 6 Versuchsreihen am Torf T1 durchgeführt. Die Versuchsreihen wurden mit zugemischten Anteile von jeweils 5, 10 und 20 M.-% der Feuchtmasse und Initialspannung  $\sigma=12,5$  bzw.  $25,0$  kN/m<sup>2</sup> gestartet. Die Haltedauer der Anfangslaststufen betrug 1 bzw. 3 d, die der Endlaststufe 4 bzw. 5 d:

- T1-DM-5, 10 und 20 % B500-1d 12,5-5d 400 und
- T1-DM-5, 10 und 20 % B500-3d 25-4d 400.

Die Versuchsreihen der Anfangslaststufe  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> wurden mit Wasseranteilen  $w_A=66,76$ ,  $62,47$  und  $55,51$  M.-% ( $w_E=200,84$ ,  $166,45$  und  $125,79$  M.-%, Abweichungen zum berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}= 2,20$ ,  $0,19$  und  $-2,86$  %) eingebaut. Die Einbauporenzahlen  $e$  belaufen sich nach steigenden Anteilen an zugemischtem Mischbindemittel auf  $e_{ges(0,0)}=4,09$ ,  $3,51$  und  $2,63$  [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80$ ,  $0,78$  und  $0,72$  [-]).

Die Einbauwasseranteile der Reihen mit der höheren Initialspannung betragen  $w_{AE}=66,92$ ,  $62,08$  und  $55,57$  M.-% ( $w_E=202,28$ ,  $163,72$  und  $125,07$  %, Abweichung zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}= 2,45$ ,  $-0,13$  und  $-2,77$  %) mit Einbauporenzahlen von  $e_{ges(0,0)}=4,15$ ,  $3,44$  und  $2,66$  [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,81$ ,  $0,77$  und  $0,73$  [-]).

Die Versuchsreihe T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400 zeigt in der Anfangslaststufe  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> die höchsten bez. ges. bzw. ink. Setzung  $s'_{ges/ink}$  von  $0,062$  [-] ( $E_{Oed(6,25)}=0,20$  MN/m<sup>2</sup>) nach 1 d. Die  $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linie der mit 10 M.-% behandelte Reihe hingegen zeigt bis ca. 5 h einen ähnlichen Verlauf, weist dann aber keine Setzungen mehr bis zum Ende der Laststufe ( $s'_{ges/ink}$  von  $0,051$  [-],  $E_{Oed(6,25)}=0,24$ ), sondern eine geringfügige Hebung von  $0,001$  [-] aus.

Die Reihe T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400 zeigt nach etwa 5 h in der Laststufe den Beginn von Hebungen, die bis zum Ende der Laststufe andauern und den Großteil der eingetretenen Setzungen eliminieren. Die bez. ges. bzw. ink. Endsetzung  $s'_{ges/ink}$  beträgt hier  $0,005$  [-] mit einem entsprechend hohen  $E_{Oed(6,25)}$ -Wert von  $2,78$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.11 bis Abb. 9.13).

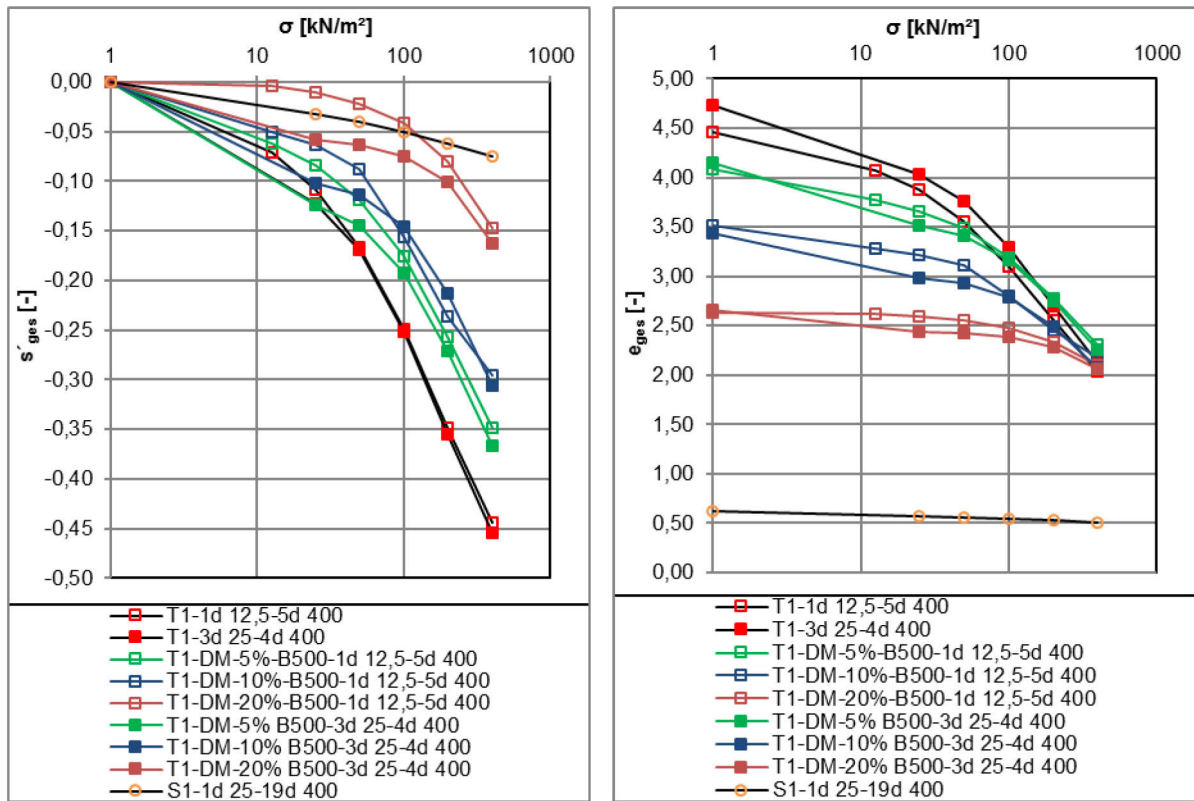


Abb. 9.11: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{\text{ges}}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{\text{ges}}$ .

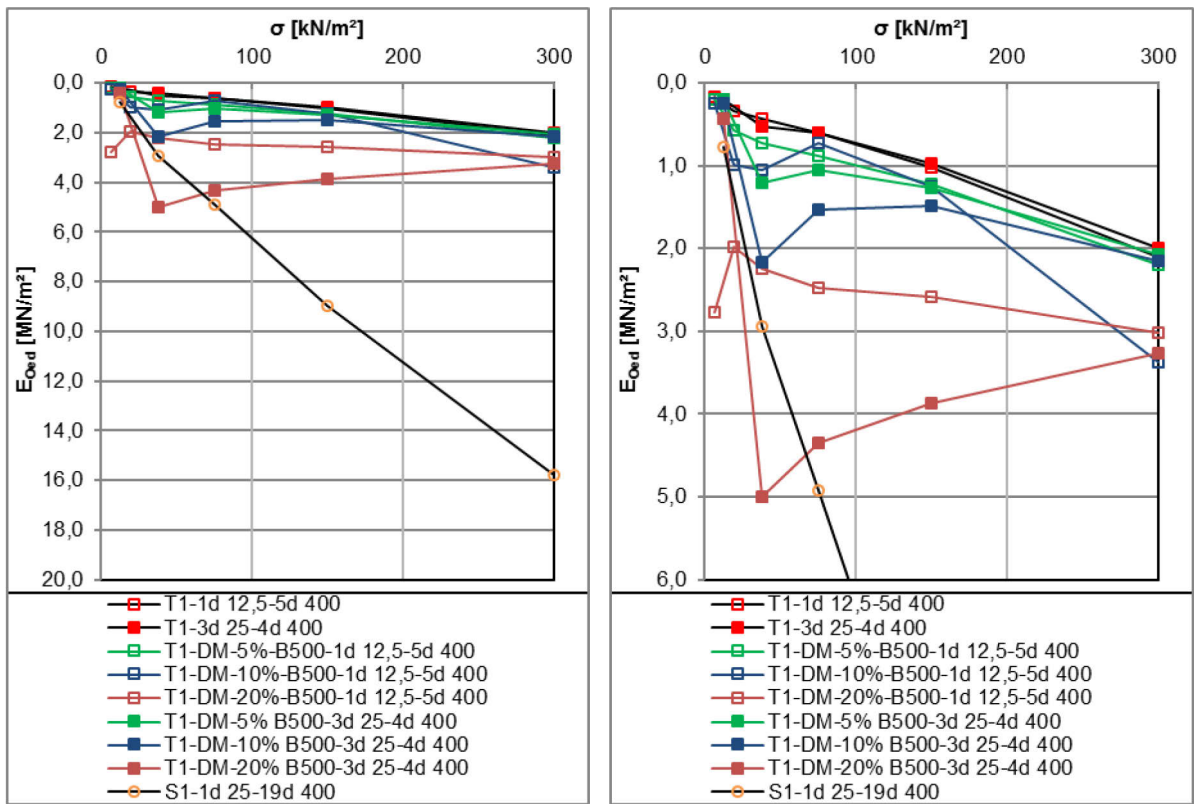


Abb. 9.12: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}(\text{innen}) - y_{\text{max}}=20,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}(\text{innen}) - y_{\text{max}}=6,0$ .



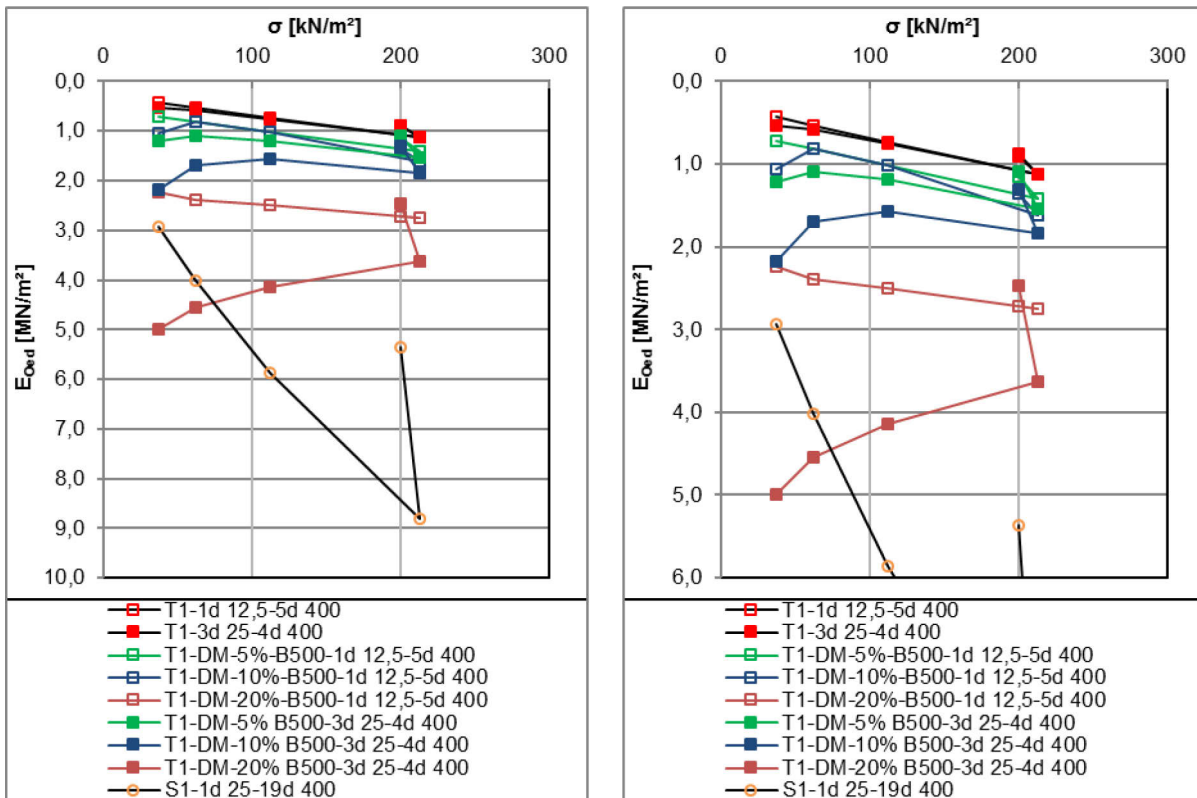


Abb. 9.13: T1-DM-B 500-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{au\ss}en) - y_{max}=10,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{au\ss}en) - y_{max}=6,0$ .

In den folgenden Laststufen zeigen die mit  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> initial belasteten Versuchsreihen dann in Abhängigkeit von dem zugemischten Anteil an Bindemittel erst abnehmende (1. Zwischenlaststufe) und dann zunehmende bez. ink. Setzungen.

Die Ausnahme stellt hier jedoch die 10 M.- %-Reihe die in der Laststufe  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup> wesentlich höhere bez. ink. Endsetzungen zeigt als die 5 M.- %-Reihe. In der nachfolgenden Laststufe  $\sigma=200$  kN/m<sup>2</sup> zeigen beide Reihen dann ähnliche bez. ink. Endsetzungen.

In der Endlaststufe ergeben sich dann bei der T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400 nach 1 d geringere bez. ink. Setzungen als bei der mit 20 M.-% behandelten Reihe, die sich aber folgend bis Versuchende wieder aufheben.

Bei der Reihe T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400 betragen die bez. ink. Setzungen über den Verlauf der Spannungsanhebungen nach 1d in den jeweiligen Laststufen ab der Stufe 25 kN/m<sup>2</sup>  $s_{ink}=0,022, 0,035, 0,057, 0,082$  und  $0,092$  [-] ( $E_{Oed}=0,57, 0,72, 0,88, 1,22$  und  $2,18$  MN/m<sup>2</sup>) mit  $s'_{ges(400)}=0,349$  [-] nach 1 d in der letzten Laststufe.

Die Versuchsreihe T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400 zeigt hier  $s_{ink}$  Werte von  $0,013, 0,024, 0,069, 0,080$  und  $0,060$  [-] ( $E_{Oed}=0,99, 1,06, 0,72, 1,26$  und  $3,36$  MN/m<sup>2</sup>) mit  $s'_{ges(400)}=0,296$  [-] nach 1 d in der Endlaststufe.

Die  $s_{ink}$  Werte der mit 20 M.-% behandelten Reihe betragen über den Versuchsverlauf  $0,006, 0,011, 0,020, 0,039$  und  $0,066$  [-] ( $E_{Oed}=1,97, 2,24, 2,48, 2,59$  und  $3,02$  MN/m<sup>2</sup>) mit  $s'_{ges(400)}=0,147$  [-].



Eine Gegenüberstellung der Oedometermodule des äußeren Spannungsintervalls  $\sigma=25,0$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  ergibt steigende Werte mit größeren Mischbindeanteilen von  $E_{\text{Oed}(212,5)}=1,41, 1,62$  und  $2,75 \text{ MN/m}^2$ .

Ein Vergleich des gesamten Spannungsintervalls  $\sigma=0,00$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  ergibt entsprechend der abweichenden bez. ges. Setzungen nach 1 d in der Endlaststufe  $E_{\text{Oed}(200)}$ -Werte von  $1,15, 1,35$  und  $2,72 \text{ MN/m}^2$ .

Die Versuchsreihen der Anfangsspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  zeigen den mit  $12,5 \text{ kN/m}^2$  initial belasteten Reihen vergleichbare Verläufe der Zeitsetzungslinien in der Anfangslaststufe, wobei sich die Setzungen aufgrund der höheren Spannung deutlich ausgeprägter darstellen. Auch hier ist nach ca. 5 h ein Abflachen (10 M.-%-Reihe) bzw. eine Hebung (20 M.-%-Reihe) ersichtlich. Die 5 M.-%-Reihe zeigt hingegen kein Abflachen der Linie. Im Gegensatz zu der mit 20 M.-% behandelten  $12,5 \text{ kN/m}^2$ -Reihe zeigt die T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400-Reihe deutlich geringere bez. ink. Hebungen von etwa  $0,02$  [-]. Entsprechend ist die hier zu beobachtende Quelldruckspannung bei den Versuchsreihen Reihen mit  $\sigma_{\text{Quell}} > 25$  (20 M.-% Bindemittelanteil),  $< 25$  (10 M.-% Bindemittelanteil) und  $> 12,5 << 25,0 \text{ kN/m}^2$  (20 M.-% Bindemittelanteil) zu beziffern und lässt damit darauf schließen, dass dieser auch bei den  $12,5 \text{ kN/m}^2$  Reihen die Setzungen in der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  beeinflusst bzw. gehemmt hat. Die Hebungen sind wahrscheinlich mit einer Reaktion des zugegebenen Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mit Calciumhydrogencarbonat  $(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)$ , welches im Bodenwasser des Versuchstorfes vorlag, zu Calciumcarbonat  $(\text{CaCO}_3)$  zu begründen (s. Abschn. 9.11).

Die 3 d mit  $25,0 \text{ kN/m}^2$  initial belasteten Reihen zeigen nach steigenden Mischbindemittelanteilen bez. ink. bzw. ges. Setzungen nach 3 d von  $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}=0,124, 0,102$  und  $0,059$  mit  $E_{\text{Oed}(12,5)}$ -Werten von  $0,20, 0,25$  und  $0,42 \text{ MN/m}^2$  ( $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}$  nach 1 d= $0,115, 0,199$  und  $0,063$  [-]) und damit etwas höhere Werte als die Versuchsreihen der Initialspannung  $12,5 \text{ kN/m}^2$  nach 1 d in der ersten Zwischenlaststufe.

Mit der Zunahme der Spannungen zeigen die anfangs mit  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  belasteten Versuchsreihen dann in Abhängigkeit von dem zugemischten Bindemittelanteil bez. ink. Setzungen von  $0,030, 0,048, 0,079$  und  $0,097$  [-] mit  $E_{\text{Oed}}$ -Werten von  $1,21, 1,05, 1,27$  und  $2,08 \text{ MN/m}^2$  (T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400),  $0,015, 0,033, 0,067$  und  $0,093$  mit  $E_{\text{Oed}}$ -Werten von  $2,17, 1,53, 1,49$  und  $2,16 \text{ MN/m}^2$  (T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400) und  $s'_{\text{ink}}=0,005, 0,012, 0,026$  und  $0,061$  [-] mit  $E_{\text{Oed}}=5,00, 4,34, 3,87$  und  $3,27 \text{ MN/m}^2$  (T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400).

Die bez. ges. Setzungen betragen nach 1d in der Endlaststufe ( $s'_{\text{ges}(400)}$ )  $0,368, 0,307$  und  $0,163$  [-] und liegen damit höher als die 1d  $12,5 \text{ kN/m}^2$ -belasteten Versuchsreihen. Hinsichtlich der übereinstimmenden Einbauporenzahlen der Versuchsreihenreihen sind die Abweichungen damit auf

die durch die unterschiedlichen Initialspannungen beeinflussten Calciumcarbonataufwüchse zurückzuführen.

Die Steifemodule über das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  zeigen damit Werte von  $E_{\text{Oed}(212,5)}=1,54, 1,84$  und  $3,62 \text{ MN/m}^2$  – insgesamt ergeben sich Oedometermodule (Intervall  $\sigma =0,00$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$ ) von  $E_{\text{Oed}(200)}= 1,09, 1,31$  und  $2,46 \text{ MN/m}^2$ .

Die Linien der bez. inkrementellen Zeit-Setzung ( $\log t$ - $s_{\text{ink}}$ -Linien) zeigen einen mit steigenden Spannungen zunehmenden konkaven Verlauf der sich in der Endlaststufe ab etwa  $0,01 \text{ d}$  fast linear darstellt und bei den mit 5 bzw. 10 M.-% (T1-DM-10 %-B500-3d 25-4d 400) behandelten Reihen steiler fällt als bei den unbehandelten Reihen des T1 und deren Werte erreicht (s. Abschn. A. 9.4.2).

### 9.9.2.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Die mit dem Mischbindemittel B300 hergestellten Versuchsreihen wurden nach der gleichen Anordnung der mit B 500 durchgeführten Reihen beprobt.

- T1-DM-5, 10 und 20 % B300-1d 12,5-5d 400 und
- T1-DM 5,10 und 20 % B300-3d 25-4d 400.

Die Versuchsreihen, die 1 d initial belastet wurden, zeigten bei Einbau nach steigenden Anteilen der Zugabemengen des Mischbinders B 300 Wasseranteile  $w_{AE}$  von 67,06, 64,02 und 56,56 M.-% ( $w_E=203,58, 177,96$  und  $130,21$  M.-%), womit die Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acalc}$  2,66, 2,68 und -1,03 % betragen. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  ergeben sich zu 4,26, 3,65 und 2,76 [-] ( $n=0,81, 0,79$  und  $0,73$  [-]).

Bei den Reihen der Anfangsspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> betragen die Einbauwasseranteile  $w_{AE}$  67,35, 63,81 und 56,35 M.-% ( $w_E=206,32, 176,30$  und  $129,08$ ). Damit ergeben sich rel. Differenzen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acalc}$  von 3,11, 2,34 und -1,40 %. Die sich ergebenden Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  mit 4,27, 3,65 und 2,72 [-] ( $n=0,81, 0,79$  und  $0,73$  [-]) entsprechen damit denen der geringer initial belasteten Reihen.

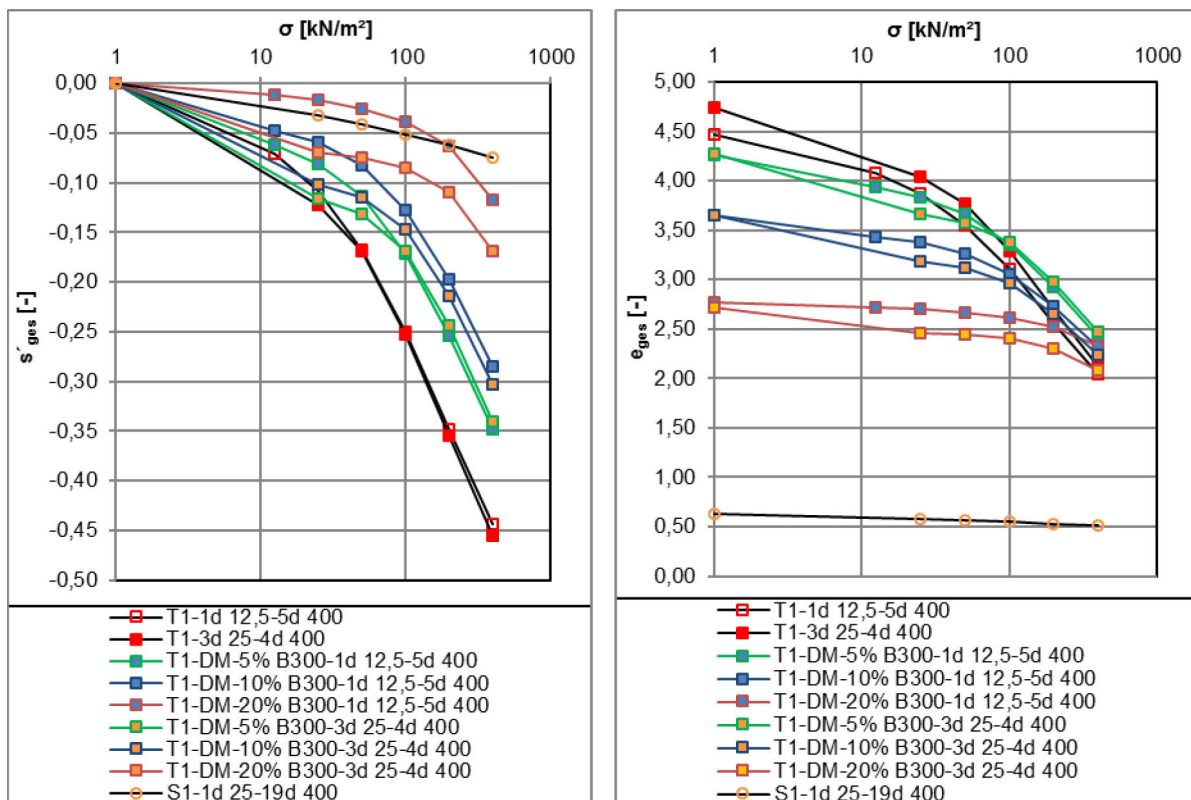


Abb. 9.14: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma-s_{ges}$ , r.:  $\log \sigma-e_{ges}$ .

Die Versuchsreihe T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400 zeigt in der Anfangslaststufe  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  die höchsten bez. ges. bzw. ink. Setzung  $s'_{\text{ges/ink}}$  von 0,062 [-] ( $E_{\text{Oed}(6,25)}=0,20 \text{ MN/m}^2$ ) nach 1 d. Die Zeitsetzungslinie ( $\log t-s'_{\text{ink}}$ ) der mit 10 M.-% behandelte Reihe hingegen verläuft ein wenig flacher und zeigt nach ca. 0,2 d stark abnehmende Setzungen bzw. einen beinahe horizontalen Verlauf (s. Abschn. 9.5.2). Die bez. ges. Setzungen belaufen sich hier zum Ende der Anfangslaststufe auf  $s'_{\text{ges/ink}}=0,047$  [-] ( $E_{\text{Oed}(6,25)}=0,26 \text{ MN/m}^2$ ). Bei der mit 20 M.-% behandelten Reihe T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400 zeigen sich nach anfänglichen Setzungen Hebungen, die etwa 0,2 d nach Aufbringung der Last eintreten und bis zum Ende der Laststufe anhalten, aber auch wieder abflachen. Insgesamt betragen die bez. ink Hebungen hier etwa 0,02 [-]. Die ges. bzw. ink. bez. Endsetzung  $s'_{\text{ges/ink}}$  in der Laststufe beträgt hier damit nur 0,012 [-] ( $E_{\text{Oed}(6,25)}=1,09 \text{ MN/m}^2$ ) (s. Abb. 9.14 bis Abb. 9.16).

Auch hier sind die Hebungen wahrscheinlich mit einer Reaktion des zugegebenen Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mit Calciumhydrogencarbonat ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) zu Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) zu begründen (s. Abschn. 9.11). In der folgenden Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  zeigen die mit  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  initial belasteten Reihen die geringsten bez. ink. Setzungen  $s'_{\text{ink}}$ , die sich dann in den anschließenden Laststufen in Abhängigkeit von dem zugemischten Anteil zunehmend darstellen.

Als auffällig ist die T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400-Reihe zu bewerten, die zu Beginn der Laststufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  sprunghafte Setzungen vorzeigt.

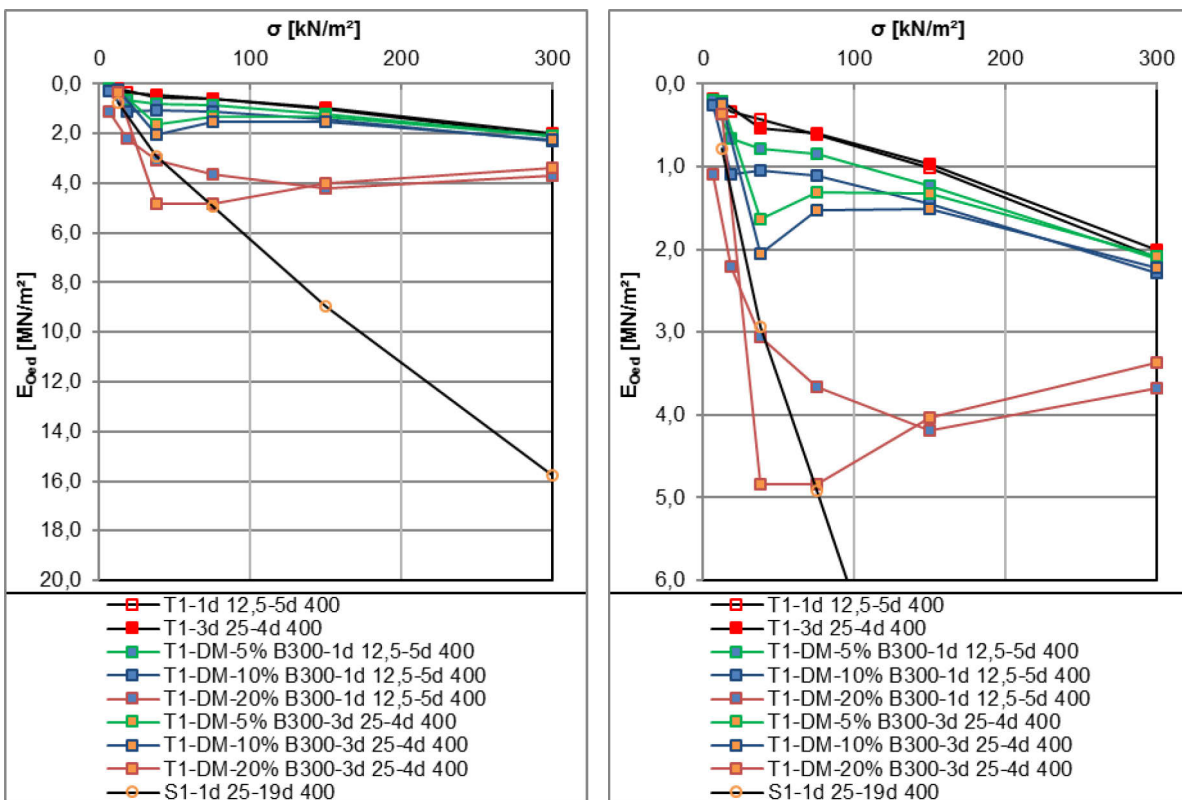


Abb. 9.15: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}(\text{innen})}$  –  $y_{\text{max}}=20,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}(\text{innen})}$  –  $y_{\text{max}}=6,0$ .

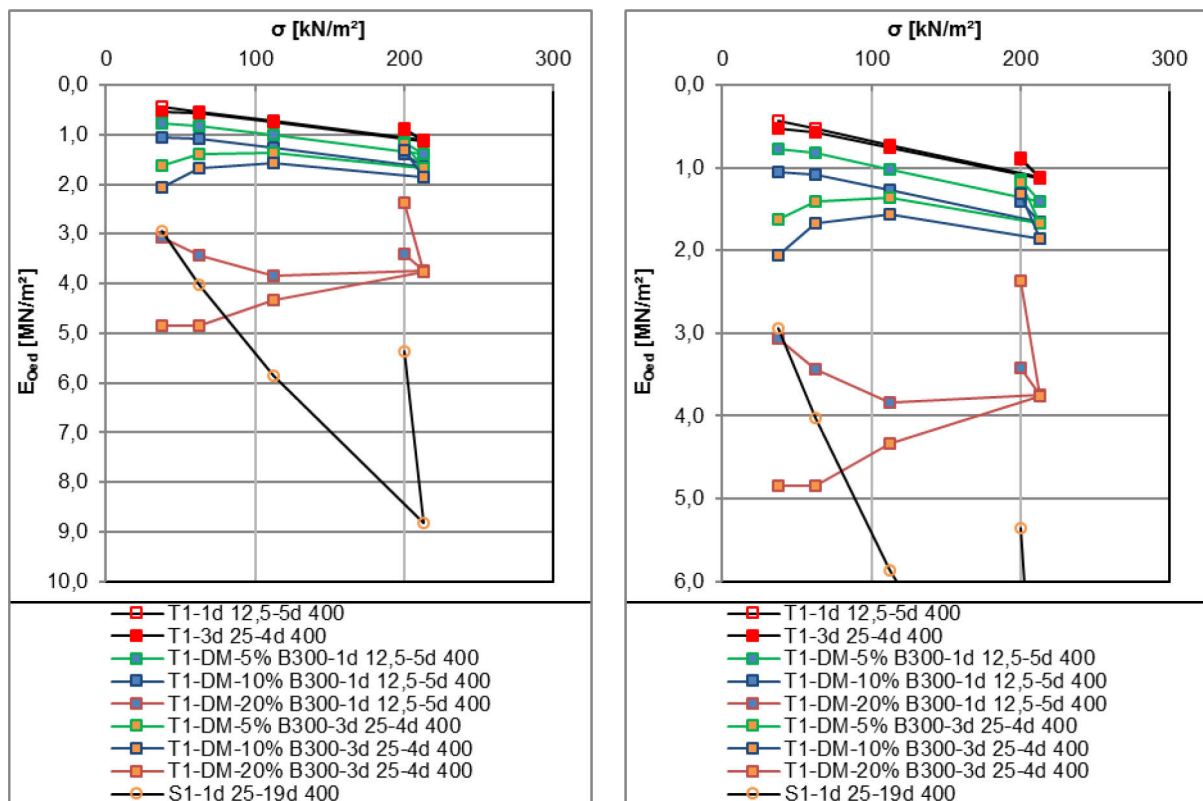


Abb. 9.16: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed(\text{au\ss en})} - y_{\text{max}}=10,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed(\text{au\ss en})} - y_{\text{max}}=6,0$ .

Im Einzelnen stellen sich die ink. Setzungen in der Zwischenlaststufe und der Endlaststufe nach 1 d nach steigenden beigemischten Anteilen B 300 mit  $s_{\text{ink}}=0,019, 0,032, 0,059, 0,082$  und  $0,095$  [-] ( $E_{Oed}=0,66, 0,78, 0,85, 1,23$  und  $2,11$  MN/m<sup>2</sup>),  $s_{\text{ink}}=0,012, 0,024, 0,045, 0,069$  und  $0,090$  [-] ( $E_{Oed}=1,09, 1,05, 1,10, 1,44$  und  $2,22$  MN/m<sup>2</sup>) und  $s_{\text{ink}}=0,006, 0,008, 0,014, 0,024$  und  $0,054$  [-] ( $E_{Oed}=2,21, 3,06, 3,66, 4,20$  und  $3,68$  MN/m<sup>2</sup>) dar (s. Abb. 9.14 und Abb. 9.15).

In der Endlaststufe ergeben bez. ges Setzungen  $s'_{\text{ges}(400)} = 0,349, 0,288$  und  $0,117$  [-] nach 1 d mit Oedometermodulen über das gesamte Spannungsintervall von 1,15, 1,39 und 3,41 MN/m<sup>2</sup>. Über das äußere Intervall ( $\sigma=25,0$  bis 400 kN/m<sup>2</sup>) ergeben sich Werte  $E_{Oed(400)}$  von 1,40, 1,64 und 3,75 MN/m<sup>2</sup>.

Die abgebildeten rel. Differenzen zu den  $E_{Oed}$ -Werten des Referenzbodens T1-3d 25-4d zeigen auch bei den mit 20 M.-% B300 behandelten Böden einen deutlichen Abfall der Steifigkeit mit der Zunahme der Spannungen.

Die Versuchsreihen der Anfangsspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> zeigen den mit anfänglich 12,5 kN/m<sup>2</sup> belasteten Reihen komparable Verläufe der Zeitsetzungslinien in der Anfangslaststufe, wobei sich die Setzungen aufgrund der höheren, doppelt so hohen Spannung, deutlich größer darstellen. Ebenso ist nach ca. 0,2 d ein Abflachen der 10 M.-%-Reihe bzw. eine Hebung der 20 M.-%-

Reihe erkennbar. Die 5 M.-%-Reihe hingegen zeigt kein deutliches Abflachen der Zeitsetzungslinie ( $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien). Im Unterschied zu der mit 20 M.-% behandelten 12,5 kN/m<sup>2</sup>-Reihe, zeigt die T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400-Reihe deutlich geringere bez. ink Hebungen von etwa 0,01 [-] (s. Abschn. A. 9.5.2).

Folglich ist auch hier die zu beobachtende Quelldruckspannung bei den mit 20, 10 und 5 M.-% behandelten Reihen mit  $\sigma_{\text{Quell}} > 25$  (20 M.-% Bindemittelanteil),  $< 25$  (10 M.-% Bindemittelanteil) und  $> 12,5$  bzw.  $< 25,0$  kN/m<sup>2</sup> (5 M.-% Bindemittelanteil) zu beziffern und lässt damit darauf schließen, dass dieser auch bei den 12,5 kN/m<sup>2</sup> Reihen die Setzungen in der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> beeinflusst bzw. gehemmt hat. In der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> der Versuchsreihen zeigen diese dann übereinstimmend den 1d 12,5, Versuchen, die geringsten bez. ink. Setzungen im Versuchsverlauf, die dann mit der Zunahme der Spannungen in Abhängigkeit von dem zugemischten Anteil zunehmen.

Weiter zeigen die  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien über die verschiedenen Spannungsstufen ähnliche Verläufe, wie die vorher beschriebenen Versuchsreihen (T1-DM-B500), welche allerdings etwas flacher fallen und sich in der Endlaststufe ebenfalls für die mit 5 M.-% behandelten Reihen, ab etwa 0,1 d linear darstellen. Zudem flachen die Linien der mit 20 M.-% behandelten Reihen deutlich ab und zeigen damit im beobachteten Intervall einen konkaven Verlauf der sich auch bei den mit 10 m.-% B300 behandelten Reihen andeutet (s. Abschn. 9.5.2).

Die bez. ges. Setzungen betragen nach 1d in der Endlaststufe  $s'_{\text{ges}}=0,341$ , 0,304 und 0,170 [-] ( $E_{\text{Oed}(200)}=1,17$ , 131 und 2,36 MN/m<sup>2</sup>) und liegen damit höher als die 1d 12,5 kN/m<sup>2</sup>-belasteten Versuchsreihen. Gemäß der fast deckungsgleichen Einbauporenzahlen der Versuchsreihen sind die Abweichungen damit auf die durch die unterschiedlichen Initialspannungen beeinflussten Calciumcarbonataufwüchse zurückzuführen (s. Abschn. 9.11).

Die bez. ink. ges. Setzungen nach 3 d in der Anfangslaststufe betragen bei den mit 25 kN/m<sup>2</sup> Anfangsspannung durchgeführten Versuchsreihen  $s'_{\text{ink}(25,0)}=0,116$ , 0,102 und 0,070 mit  $E_{\text{Oed}(12,5)}=0,22$ , 0,24 und 0,36 MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{\text{ink}}$  nach 1d=0,110, 0,099 und 0,069 [-]).

In den nachfolgenden Spannungsstufen betragen die bez. ink. Anteile nach 1d nach steigenden Anteilen der Beimengungen  $s'_{\text{ink}}=0,015$ , 0,038, 0,075 und 0,096 [-] ( $E_{\text{Oed}}=1,63$ , 1,31, 1,33 und 2,09 MN/m<sup>2</sup>),  $s'_{\text{ink}}=0,012$ , 0,033, 0,067 und 0,090 [-] ( $E_{\text{Oed}}=2,05$ , 1,52, 1,50 und 2,22 MN/m<sup>2</sup>) und  $s'_{\text{ink}}=0,005$ , 0,010, 0,025 und 0,060 [-] ( $E_{\text{Oed}}=4,84$ , 4,84, 4,03 und 3,36 MN/m<sup>2</sup>).

Die Steifemodule über das äußere Intervall 25,0 bis 400 kN/m<sup>2</sup> betragen  $E_{\text{Oed}(212,5)}=1,67$ , 1,86 und 3,76 MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.14 und Abb. 9.15).

### 9.9.2.5 T1-DM-BK-Versuchsreihen

Die mit dem Bindemittel Branntkalk (BK) hergestellten Versuchsreihen wurden nach der gleichen Anordnung der mit den Mischbindern B 300 bzw. B 500 durchgeführten Reihen beprobt:

- T1-DM-5, 10 und 20 % BK-1d 12,5-5d 400 und
- T1-DM 5,10 und 20 % BK-3d 25-4d 400.

Die Auswirkungen einer Branntkalkzugabe wurde wie bei den Mischbindern B300 und B 500 nur am T1 untersucht.

Die mit der Anfangsspannung 12,5 kN/m<sup>2</sup> über eine Haltedauer von 1 d initial belasteten Versuchsreihen zeigten bei Einbau nach der Zugabe des Branntkalks Wasseranteile  $w_{AE}$  von 66,76, 61,52 und 53,64 M.-% ( $w_E=200,84, 159,85$  und  $115,71$  %), wodurch die rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  2,20, -1,34 und -6,14 % betragen.

Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  lagen bei 3,95, 3,34 und 2,58 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80, 0,77$  und  $0,72$  [-]).

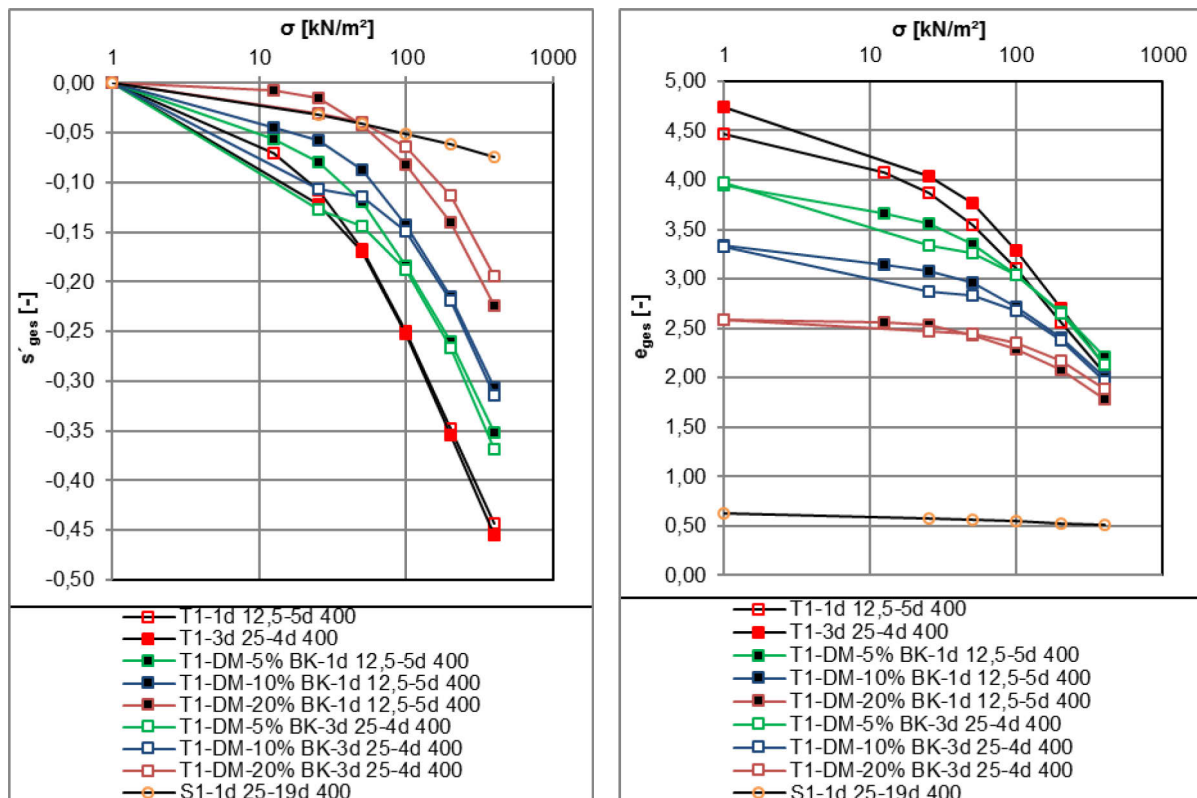


Abb. 9.17: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma - s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma - e_{ges}$ .

Die anfangs mit 25 kN/m<sup>2</sup> über 3 d belasteten Reihen zeigten übereinstimmende Einbauwasseranteil  $w_{AE}$  von 66,18, 61,59 und 53,41 M.-% ( $w_E=195,71, 160,33$  und  $114,65$  M.-%) mit Differenzen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  von 1,32, -1,22 und -6,54 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  lagen damit bei 3,97, 3,33 und 2,58 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80, 0,77$  und  $0,72[-]$ ).

Die deutlichen Abweichungen des Wasseranteils der mit 20 M.-% BK behandelten Reihen von -6,14 bzw. -6,54 % ist auf die als intensiv zu beschreibende exotherme Reaktion des Branntkalk während des Mischvorgangs mit dem Porenwasser des Versuchsbodens zurückzuführen (vgl. Abschn. 8.2.2).

Die mit BK behandelten 1d 12,5-Versuchsreihen zeigen den mit den Mischbindemittel B300 und B500 sehr ähnliche Zeitsetzungslinien (log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien) in der Anfangslaststufe (s. Abschn. A.9).

Die Versuchsreihe T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400 zeigt hier die höchsten bez. ges. bzw. ink. Setzung  $s'_{ges/ink}$  von 0,057 [-] ( $E_{Oed(6,25)}=0,22$  MN/m<sup>2</sup>) nach 1 d. Die Zeitsetzungslinie der mit 10 M.-% behandelte Reihe hingegen verläuft etwas flacher und zeigt nach ca. 0,2 h stark abnehmende Setzungen bzw. einen horizontalen Verlauf. Die bez. ges. Setzungen belaufen sich hier zum Ende der Anfangslaststufe auf  $s'_{ges/ink}=0,044$  [-] ( $E_{Oed(6,25)}=0,28$  MN/m<sup>2</sup>). Die mit 20 M.-% behandelte Reihe T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400 zeigt nach einem im Vergleich sehr flachen Setzungsverlauf Hebungen, die etwa 0,2 d nach Beginn der Belastung auftreten und bis zum Ende der Laststufe anhalten. Insgesamt betragen die bez. ges. bzw. ink. Hebungen hier bez. auf die Anfangshöhe etwa 0,012 [-]. Die bez. ges. bzw. ink. Endsetzung  $s'_{ges/ink}$  in der Laststufe beträgt hier damit 0,008 ( $E_{Oed(6,25)}=1,63$  MN/m<sup>2</sup>) nach anfänglichen bez. ges. bzw. ink. Setzungen von max. 0,020 [-] (s. Abb. 9.17 bis Abb. 9.19).

Analog zu den mit B500 und B300 behandelten Versuchsreihen sind auch hier die Hebungen vermutlich mit Calciumcarbonataufwüchsen zu erklären (s. Abschn. 9.11).



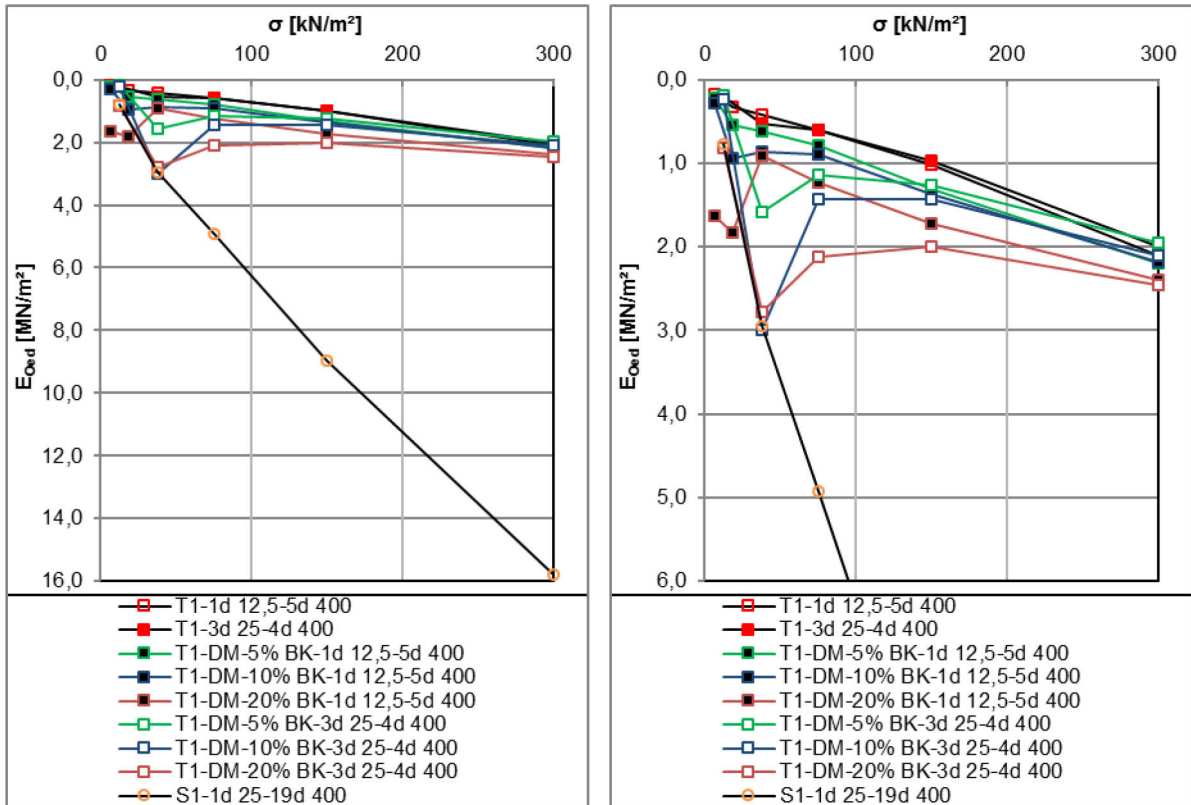


Abb. 9.18: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{innen}) - y_{\max}=16,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{innen}) - y_{\max}=6,0$ .

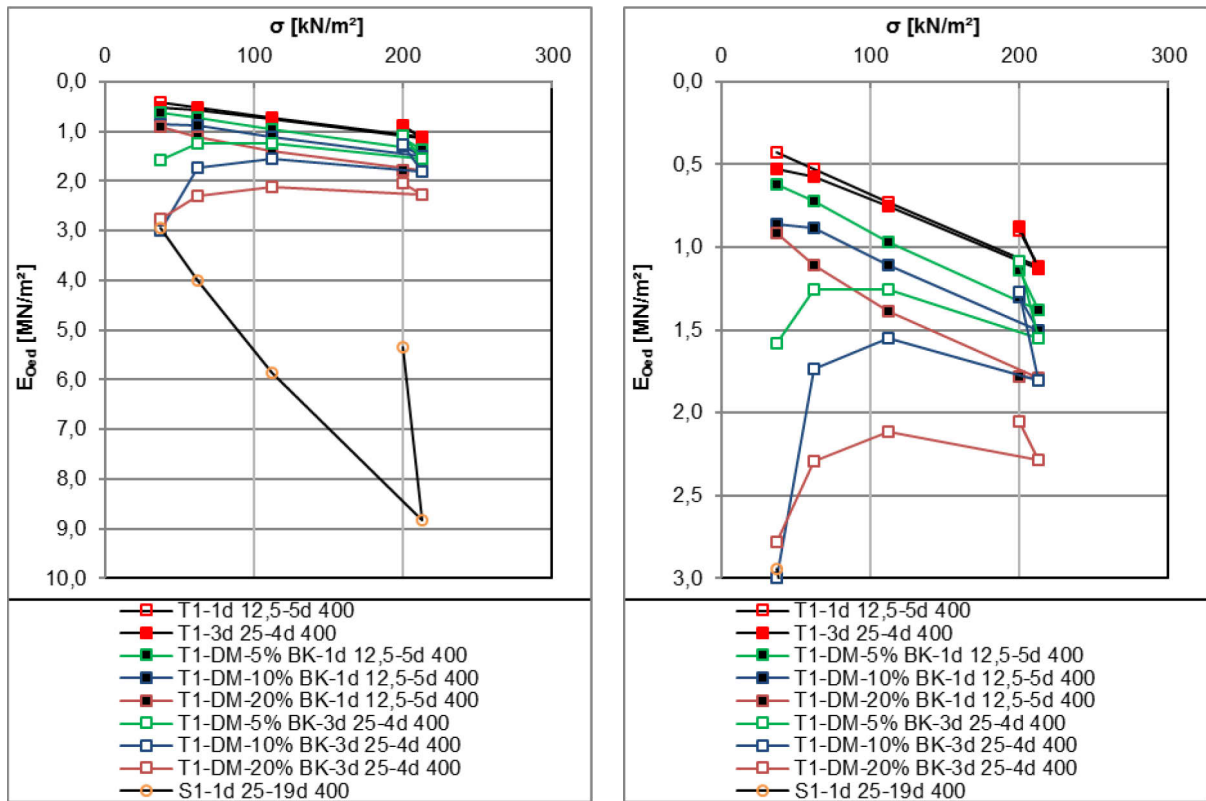


Abb. 9.19: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{außen}) - y_{\max}=10,0$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{außen}) - y_{\max}=3,0$ .

In der folgenden Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  zeigen die mit  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  initial belasteten Reihen die geringsten bez. ink. Setzungen  $s'_{\text{ink}}$ , die sich in den anschließenden Laststufen dann in Abhängigkeit von dem zugemischten Anteil ansteigend darstellen.

Die T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400 zeigt hier über den Versuchsverlauf bez. ink. Anteile von  $s'_{\text{ink}}=0,023, 0,040, 0,064, 0,076$  und  $0,092$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=0,55, 0,62, 0,78, 1,31$  und  $2,19 \text{ MN/m}^2$ ) nach 1d in den jeweiligen Laststufen.

Die Reihen T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400 und T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400 zeigen über den Verlauf Werte in Höhe von  $s'_{\text{ink}}=0,013, 0,029, 0,056, 0,073$  und  $0,092$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=0,94, 0,86, 0,89, 1,38$  und  $2,19 \text{ MN/m}^2$ ) und  $s'_{\text{ink}}=0,007, 0,027, 0,041, 0,058$  und  $0,084$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=1,83, 0,91, 1,23, 1,71$  und  $2,39 \text{ MN/m}^2$ ).

In der Endlaststufe  $400 \text{ kN/m}^2$  ergeben sich damit bez. ges Setzungen  $s'_{\text{ges}(400)}$  von  $0,352, 0,308$  und  $0,225$  [-] nach 1 d und Oedometermodule über das gesamte Spannungsintervall von  $E_{\text{Oed}(200)}=1,14, 1,30$  und  $1,78 \text{ MN/m}^2$ . Über das äußere Intervall von 25 bis  $400 \text{ kN/m}^2$  betragen die Steifemodule  $E_{\text{Oed}(212,5)} 1,38, 1,50$  und  $1,79 \text{ MN/m}^2$  (s. Abb. 9.17 bis Abb. 9.19).

Die Versuchsreihen der Anfangsspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  zeigen den mit anfänglich  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  belasteten Reihen vergleichbare Entwicklung der inkrementellen Zeitsetzungslinien ( $\log t$ - $s'_{\text{ink}}$ -Linien) in der Anfangslaststufe, wobei sich die Setzungen aufgrund der höheren, doppelt so hohen Spannung, deutlich größer darstellen.

Ebenso ist nach ca. 0,2 d ein Abflachen und ein geringer Anstieg der 10 M.-%-Reihe bzw. eine deutliche Hebung der 20 M.-%-Reihe erkennbar, welche sich bei beiden Reihen über die Halte-dauer der Anfangslaststufe fortsetzen.

Die 5 M.-%-Reihe hingegen zeigt kein deutliches Abflachen der Zeitsetzungslinie. Im Unterschied zu der mit 20 M.-% behandelten  $12,5 \text{ kN/m}^2$ -Reihe, zeigt die T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400-Reihe wesentlich höhere bez. ges. bzw. ink Hebungen von knapp  $0,05$  [-] nach einer bez. ges. bzw. ink. Setzung von fast  $0,080$  [-].

Folglich ist die Quelldruckspannung ähnlich der B500- und B300-Versuchsreihen zu beziffern und lässt auch hier darauf schließen, dass dieser bei den  $12,5 \text{ kN/m}^2$ -Reihen, zusätzlich die Setzungen in der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  beeinflusst bzw. gehemmt hat.

Insgesamt belaufen sich die Setzungen in der Initialspannungsstufe der Versuchsreihen auf  $0,128, 0,107$  und  $0,031$  [-] ( $E_{\text{Oed}(12,5)}=0,20, 0,23, 0,81 \text{ MN/m}^2$ ) ( $s'_{\text{ink/ges}}$  nach 1d=  $0,123, 0,108$  und  $0,057$  [-]) und fallen damit nahezu doppelt so hoch aus wie die der 1d 12,5-Versuchsreihen.

In der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  der Versuchsreihen zeigen diese dann übereinstimmend mit den 1d 12,5-Versuchen, die geringsten bez. ink. Setzungen im Versuchsverlauf, die dann mit Zunahme der Spannungen in Abhängigkeit von den zugemischten Anteilen zunehmen.

Im Einzelnen betragen die bez. ink. Anteile nach zunehmenden Anteilen an Branntkalk in den folgenden Spannungsstufen nach 1d  $s'_{\text{ink}}=0,016, 0,044, 0,080$  und  $0,102$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=1,58, 1,14, 1,26$  und  $1,96$  MN/m<sup>2</sup>),  $s_{\text{ink}}=0,008, 0,035, 0,070$  und  $0,095$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=3,00, 1,44, 1,44$  und  $2,10$  MN/m<sup>2</sup>) und  $s'_{\text{ink}}=0,009, 0,024, 0,050$  und  $0,081$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=2,78, 2,11, 2,00$  und  $2,46$  MN/m<sup>2</sup>) (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23) (s. Abb. 9.17 bis Abb. 9.19).

Die bez. ges. Setzungen betragen nach 1d in der Endlaststufe  $s'_{\text{ges}}=0,369, 0,315$  und  $0,195$  [-] und liegen damit bei den mit 5 bzw. 10 M.-% behandelten Reihen höher als die 1d 12,5 kN/m<sup>2</sup>-belasteten Versuchsreihen. Über das äußere Spannungsintervall 25 bis 400 kN/m<sup>2</sup> betragen die Steifemodule  $E_{\text{Oed}(212,5)} 1,55, 1,80$  und  $2,29$  MN/m<sup>2</sup> – gesamt betrachtet ( $E_{\text{Oed}(200)}$ )  $1,08, 1,27$  und  $2,05$  MN/m<sup>2</sup>.

Gemäß den fast deckungsgleichen Einbauporenzahlen der Versuchsreihen sind die Abweichungen damit auf die durch die unterschiedlichen Initialspannungen beeinflussten Calciumcarbonataufwüchse zurückzuführen.

Die log t- $s'_{\text{ink}}$ -Linien BK-Reihen zeigen ähnlich den B500 bzw. B300-Reihen mit der Erhöhung der Spannungen einen konkaven und zunehmend steileren Verlauf und nähern sich in der Endlaststufe den Linien der unbehandelten Reihen des T1 wesentlich stärker an bzw. zeigen höhere ink. Endsetzungen. Weiter liegen die Linien der mit unterschiedlichen Masseanteilen BK behandelten Reihen hier deutlich näher beieinander und zeigen in der Endlaststufe abweichend den mit B500 und B300 behandelten Reihen nur geringfügig voneinander abweichende Setzungsanteile (s. Abschn. 9.6.2)

### 9.9.2.6 T1-CEM I-Versuchsreihen

Das Kompressionsverhalten des T1 nach Konditionierung mit dem Bindemittel CEM I wurde in insgesamt 22 Versuchsreihen untersucht. 13 dieser Versuchsreihen wurden im DM-Verfahren behandelt, die restlichen 9 Reihen im WM-Verfahren (8 Reihen mit einem w/z-Wert=1,5 [-], 1 Reihe mit einem w/z-Wert=0,5 [-])

#### 9.9.2.6.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Die durchgeführten 13 DM-Versuchsreihen unterteilen sich wie folgend:

- T1-DM-5, 10 und 20%-1d 12,5-28d 400,
- T1-DM-5, 10 und 20%-3d 25-4d 400,
- T1-DM-5, 10 und 20%-5d 25-9d 400,
- T1-DM-20%-7d 25-170d 400,
- T1-DM-5 und 20%-14d 25-54d 400,
- T1-DM-20%-10d 0-1d 25-4d 400.

Die Versuchsreihen mit der Initialspannung  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  wurden nach steigenden Anteilen der Zugabemengen des Bindemittels mit Wasseranteilen  $w_{AE}$  von 66,49, 63,31 und 57,01 M.-% ( $w_E=198,46, 172,57$  und  $132,59$  M.-%) eingebaut. Die die rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{AEcal}$  betragen 1,80, 1,54 und -0,25 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  ergeben sich zu 3,95, 3,51 und 2,88 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80, 0,78$  und  $0,74$  [-]).

Die 3 d auf der Anfangsspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  belasteten Versuchsreihen wurden mit Wasseranteilen  $w_{AE}$  von 66,75, 63,47 und 56,22 M.-% ( $w_E=200,71, 173,72$  und  $123,33$  M.-%) eingebaut. Hier liegen die Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{AEcal}$  bei 2,18, 1,79 und -3,37 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  fallen hier mit 4,09, 3,55 und 2,81 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80, 0,78$  und  $0,74$  [-]) komparabel den vorgenannten aus.

Der Einbau der T1-DM-5,10 und 20% CEM I-5d 25-9d 400-Versuchsreihen erfolgte mit Wasseranteilen  $w_{AE}$  von 66,11, 61,94 und 56,28 M.-% ( $w_E=195,08, 162,74$  und  $128,74$  M.-%) mit sich ergebenden Differenzen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{AEcal}$  von 1,21, -0,66 und -1,52 %. Die Einbauporenzahlen liegen hier bei 4,00, 3,38 und 2,80 [-] ( $n=0,80, 0,77$  und  $0,74$  [-]).

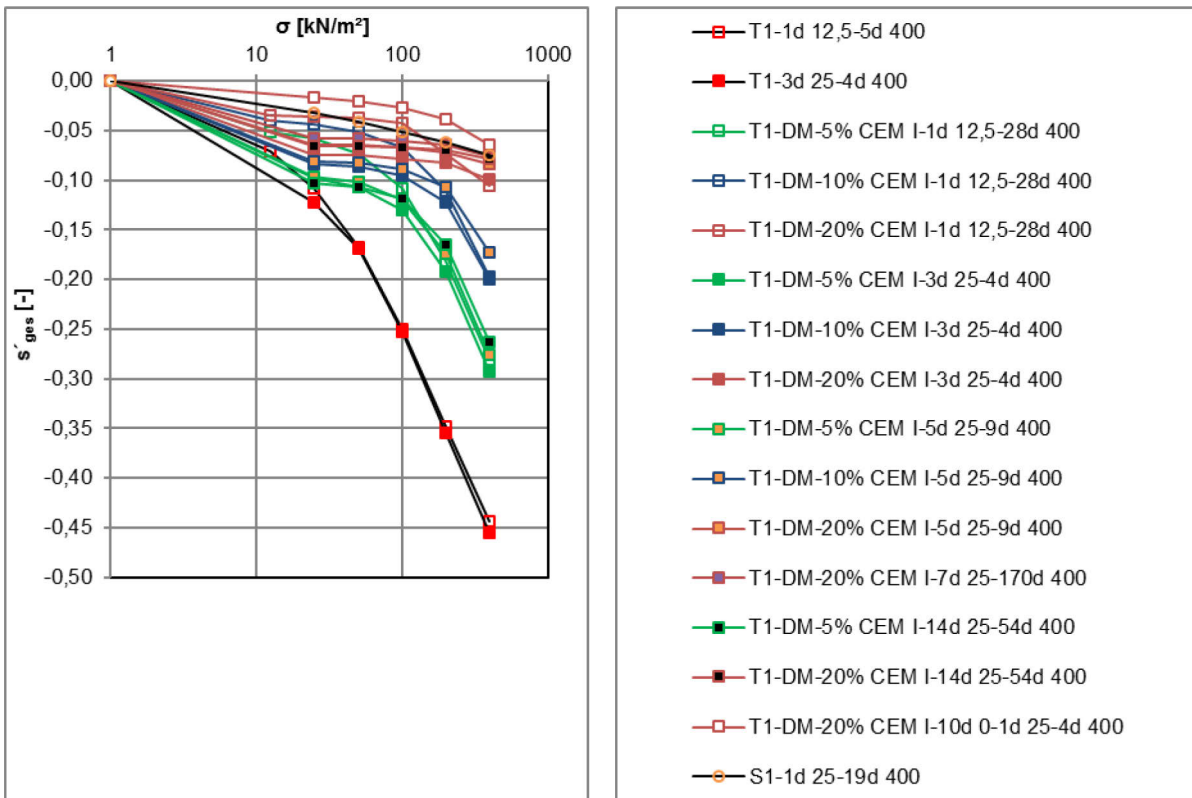
Die 7 d mit der Initialspannung  $25,0 \text{ kN/m}^2$  belastete Reihe T1-DM-20 % CEM I-7d 25-170d 400 wurde mit einem um  $-1,53 \%$  zu  $w_{AEcal}$  abweichenden Wasseranteil von  $w_{AE}=128,47 \text{ M.-%}$  ( $w_E=56,28 \%$ ) und einer Porenzahl  $e_{ges(0,0)}=4,05 [-]$  ( $n_{ges(0,0)}=0,80 [-]$ ) eingebaut.

Die Reihen T1-DM-5 und 20% CEM I-14d 25-54d 400 zeigten bei Einbau Wasseranteile  $w_{AE}$  von  $66,53$  und  $56,23 \text{ M.-%}$  ( $w_E=198,74$  und  $128,47 \text{ M.-%}$ ) mit Abweichungen zum berechneten Wasseranteil  $w_{AEcal}$  von  $1,85$  bzw.  $-1,61 \%$ . Die Porenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  bei Einbau der Reihen lagen bei  $4,08$  und  $2,80 [-]$  ( $n_{ges(0,0)}=0,80$  und  $0,74 [-]$ ).

Die über einen Zeitraum von 10 d unbelastet gelagerte Versuchsreihe T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400 wurde mit einer Differenz zu  $w_{Acal}$  von  $-3,29 \%$  mit einem Wasseranteil  $w_{AE}=55,27 \text{ M.-%}$  ( $w=123,56 \%$ ) eingebaut. Bei Einbau lag die Porenzahl  $e_{ges(0,0)}$  damit bei  $2,78 [-]$  ( $n_{ges(0,0)}=0,74 [-]$ ).

Betrachtet man die Spannungs-Setzungslinien ergeben sich bei den mit der geringeren Initialspannung  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$  belasteten Versuchsreihen gegenüber den mit der höheren Anfangsspannung  $\sigma=25,0 \text{ kN/m}^2$  belasteten Reihen plausibel nachvollziehbar auch geringere bez. ink. bzw. ges. Setzungen  $s'_{ink/ges(12,5)}$  in der Anfangslaststufe  $\sigma=12,5 \text{ kN/m}^2$ . Die Ausnahme bildet hier die über 10 d unbelastete Versuchsreihe, die mit  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,017 [-]$  nach 1 d in der Laststufe auch wesentlich kleinere bez. Setzungen ausweist als die T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400-Reihe mit  $s'_{ink/ges(12,5)}=0,034 [-]$  und damit den höchsten Steifemodul über das erste Spannungsintervall ( $\sigma=0,0$  bis  $25,0 \text{ kN/m}^2$ ) in Höhe von  $E_{Oed(12,5)} = 1,15 \text{ MN/m}^2$  aufzeigt.

Insgesamt zeigen sich auch hier in der auf die Anfangslaststufe ( $\sigma=12,5$  bzw.  $25,0 \text{ kN/m}^2$ ) folgenden Zwischenlaststufe ( $\sigma=25,0$  bzw.  $50,0 \text{ kN/m}^2$ ) deutlich geringere bez. ink. Setzungen.



**Abb. 9.20:** T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – log  $\sigma$ - $s'_{ges}$ .

Vergleicht man die mit 5 M.-% behandelten Versuchsreihen fallen die bez. ink bzw. ges. Setzungen  $s'_{ink/ges}$  der Reihen mit der initialen Laststufe  $\sigma=25,0$  mit  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,099$  und  $0,096$  bzw.  $0,104$  [-] mit  $E_{Oed(12,5)}=0,25$  und  $0,26$  bzw.  $0,24$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{ink/ges(25,0)}=0,096$  und  $0,094$  bzw.  $0,100$  [-] nach 1d) fast bzw. genau doppelt so hoch aus wie die der T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28 d 400 Laststufe mit  $s'_{ink/ges(12,5)}=0,52$  [-] ( $E_{Oed(6,25)}=0,24$  MN/m<sup>2</sup>) bei äquivalenten Einbauporenzahlen von 3,95 bis 4,05 [-]. Betrachtet man den Verlauf der bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  der T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28 d 400 über die Spannungsstufen ergeben sich hier ink. Setzungsanteile ab der Zwischenlaststufe nach 1d von  $s'_{ink}=0,006, 0,015, 0,034$  und  $0,101$  [-] mit einer bez. ges. Setzungen nach 1 d in der Endlaststufe 400 kN/m<sup>2</sup> von  $s'_{ges(400)}=0,282$  [-] und inneren Steifemodulen  $E_{Oed}=1,92, 1,65, 1,46, 1,36$  und  $1,98$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Bei der 3 d auf der Anfangsspannung  $\sigma=25$  kN/m<sup>2</sup> gehaltenen Reihe wurden ab der ersten Zwischenlaststufe ink. Setzungsanteile  $s'_{ink}$  von  $0,008, 0,024, 0,062$  und  $0,100$  [-] mit einer bez. ges. Setzung nach 1 d in der Endlaststufe von  $0,293$  [-] gemessen. Die inneren Oedometermodule betragen hier  $E_{Oed}=3,19, 2,07, 1,61$  und  $2,00$  MN/m<sup>2</sup> und fallen damit geringfügig höher aus als die vorgenannten. Die 5d mit der Initialspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> belastete Reihe zeigt ab der ersten Zwischenlaststufe ink. Setzungsanteile  $s'_{ink}$  von  $0,005, 0,018, 0,055,$  und  $0,102$  [-] mit einer bez. ges. Setzung nach 1 d in der Endlaststufe von  $0,276$  [-]. Die inneren Oedometermodule betragen hier  $E_{Oed}=5,00, 2,73, 1,82$  und  $1,97$  MN/m<sup>2</sup> und weisen damit zum größten Teil wieder höhere Werte aus als die vorgenannten. Die insgesamt 14 d auf der ersten Laststufe belastete

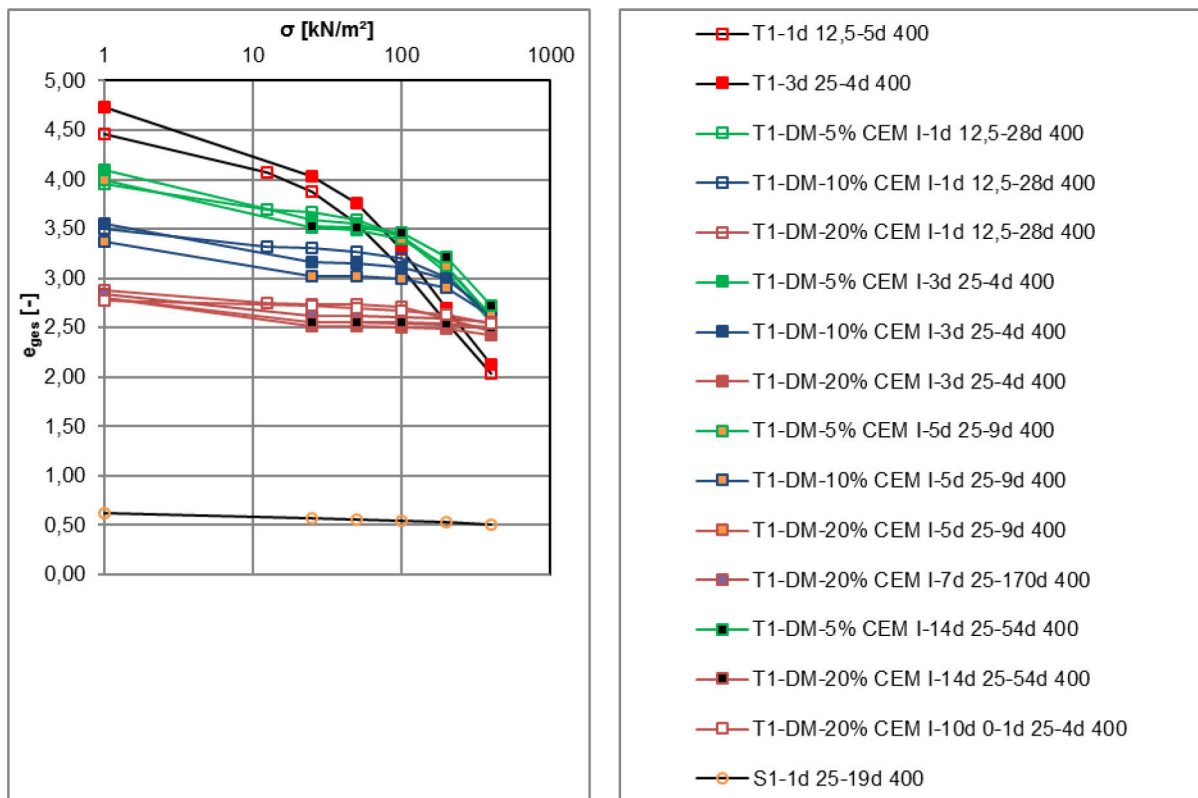


Abb. 9.21: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen –  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

Reihe T1-DM-5% CEM I-14d 25-54d 400 weist bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  ab der ersten Zwischenlaststufe von 0,003, 0,012, 0,047 und 0,098 bei einer bez. ges. Setzung  $s'_{ges}=0,264$  [-] nach 1 d in der letzten Laststufe 400 kN/m<sup>2</sup> mit dementsprechenden inneren Oedometermodulen  $E_{Oed}=8,82, 4,29, 2,11$  und  $2,04$  MN/m<sup>2</sup> aus. Die  $E_{Oed}$ -Werte liegen wiederum teils deutlich über beiden zuvor beschriebenen (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23). Stellt man die äußeren Steifemodule über das Spannungsintervall 25,0 bis 400 kN/m<sup>2</sup> gegenüber mit  $E_{Oed(212,5)}=1,68, 1,93, 2,08$  und  $2,34$  MN/m<sup>2</sup> legt sich der Unterschied mit tendenziell steigenden Werten insgesamt dar.

Vergleicht man hingegen die Module über das gesamte Spannungsintervall ( $\sigma=0,00$  bis 400 kN/m<sup>2</sup>) ergeben sich mit  $E_{Oed(200)}=1,42, 1,37, 1,45$  und  $1,52$  MN/m<sup>2</sup> den bez. ges. Setzungen nach 1 d in der Endlaststufe entsprechende geringe Unterschiede, die bei den Reihen T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400, T1-DM-20% CEM I-5d 25-9d 400 bzw. T1-DM-20% CEM I-14d 25-54d 400 durch die Setzungen der initialen Laststufe geprägt sind.

Die mit 10 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen T1-DM-10-1d 12,5-28d 400, T1-DM-10%-3d 25-4d 400 und T1-DM-10%-5d 25-9d 400 zeigen im Vergleich zu den 5 M.-%-Reihen in der ersten Laststufe geringere Setzungen in Höhe von  $s'_{ink/ges}=0,040, 0,084$  und  $0,081$  [-] bei Oedometermodulen von  $E_{Oed(6,25/12,5)}=0,31, 0,30$  und  $0,31$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{ink/ges(12,5/25,0)}=0,040, 0,083$  und  $0,080$  nach 1d). Die bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  im Versuchsverlauf ab der Zwischenlaststufe der mit 12,5 kN/m<sup>2</sup> initial belasteten Versuchsreihe nach 1 d betragen 0,004, 0,007, 0,016, 0,043 und 0,087 [-] bei einer bez. ges. Setzung  $s_{ges(400)}$  nach 1d in der Endlaststufe 400 kN/m<sup>2</sup> von 0,198 [-] mit inneren Steifemodulen von 3,00, 3,41, 3,23, 2,31 und 2,29 MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

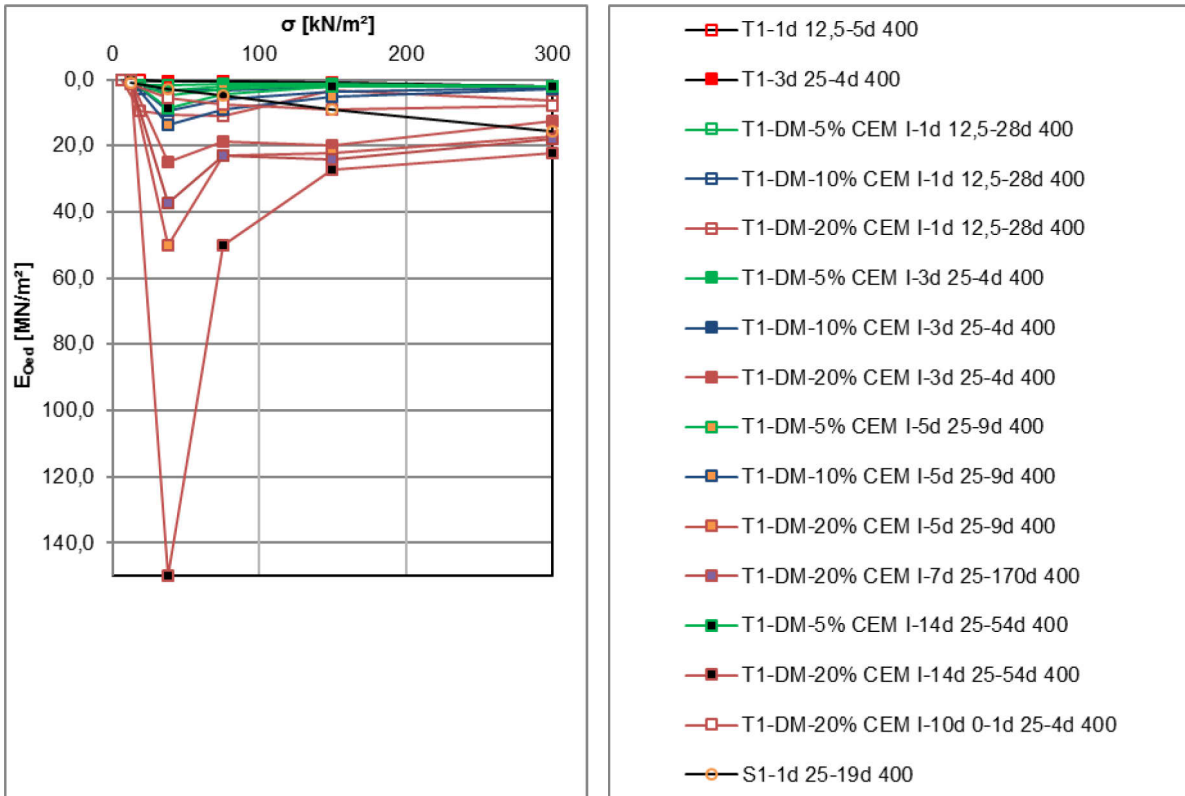


Abb. 9.22: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen –  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ .

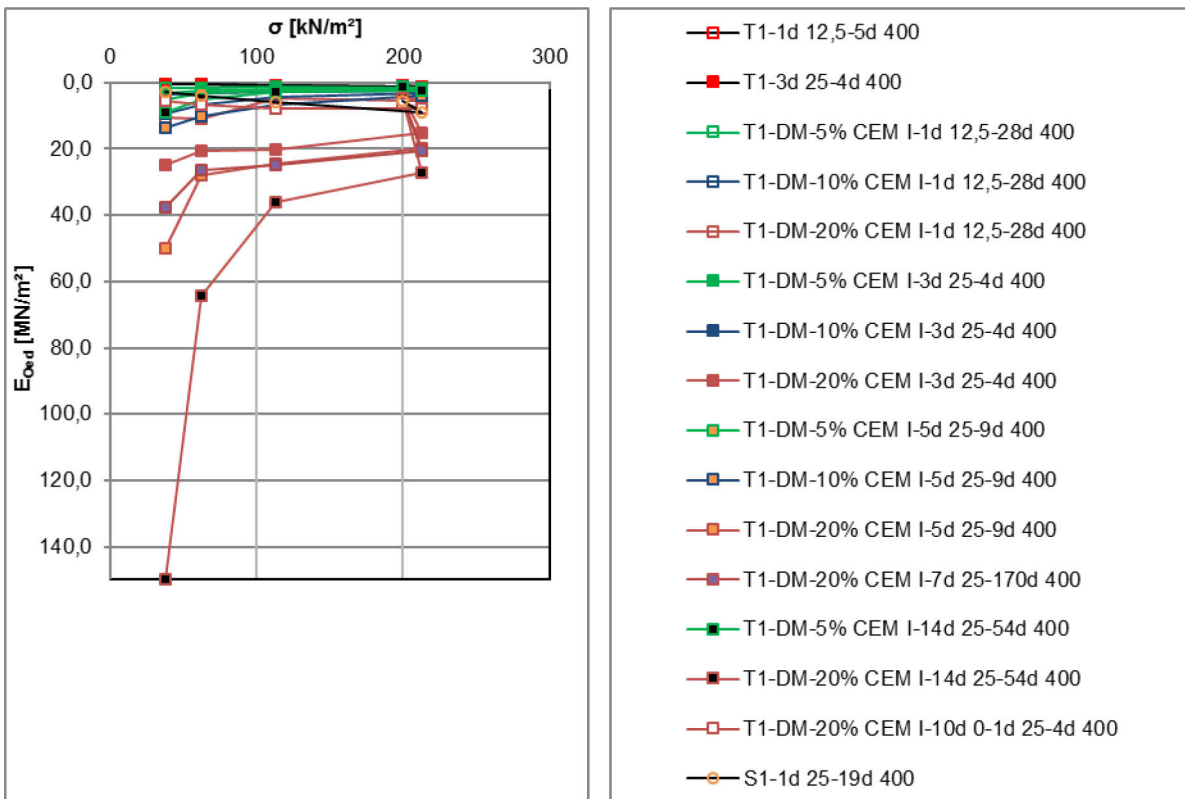


Abb. 9.23: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen –  $\sigma$ - $E_{Oed(außen)}$ .



Die Versuchsreihe T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400 hingegen zeigt vergleichsweise niedrigere bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  ab der ersten Zwischenlaststufe nach 1d in den jeweiligen Spannungsstufen von 0,003, 0,008, 0,028 und 0,077 [-] bei einer ähnlichen bez. Ges. Setzung  $s'_{ges}$  von 0,200 [-].

Die innere Module  $E_{Oed}$  belaufen sich entsprechend den bez. ink. Setzungsanteilen auf 9,37, 5,88, 3,61 und 2,61 MN/m<sup>2</sup>.

Die am längsten auf der Anfangslaststufe belastete Reihe T1-DM-10% CEM I-5d 25-9d 400 weist mit der ersten Zwischenlaststufe  $\sigma=50,0$  kN/m<sup>2</sup> insgesamt die geringsten bez. ink. Anteile über die Versuche mit  $s'_{ink}=0,002, 0,005, 0,019, 0,066$  [-] bei einer bez. ges. Setzung von  $s'_{ges}=0,173$  [-] nach 1 d in der Laststufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup> aus. Hier sind die inneren Oedometermodule  $E_{Oed}=13,64, 9,09, 5,41$  und  $3,03$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Die Oedometermodule über das Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> belaufen sich bei den 3 Versuchsreihen nach 5 d Haltedauer der Initialspannung auf  $E_{Oed(212,5)}=2,44, 3,25$  und  $4,08$  MN/m<sup>2</sup>. Insgesamt, über das Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>, ergeben sich übereinstimmende  $E_{Oed(200)}$ -Werte in Höhe von  $2,02, 2,01$  und  $2,31$  MN/m<sup>2</sup>.

Die unterschiedlichen mit 20 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen zeigten entsprechend des hohen Bindemittelanteils, die geringsten Verformungen in den Oedometern. Die Reihe T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400 weist bez. ink. bzw. ges. Setzungen nach 1 d in der ersten Laststufe von  $0,37$  [-] ( $E_{Oed}=0,37$  MN/m<sup>2</sup>) aus, die etwas unter der mit 10 M.-% behandelten Reihe ( $s'_{ink/ges(12,5)}=0,40$  [-]) mit deutlich höherer Porenzahl liegen.

Über den Verlauf der Versuchsreihe belaufen sich die bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  auf  $0,001, 0,002, 0,005, 0,032$  und  $0,032$  [-] mit einer ges. bez. Setzung nach 1 d in der Endlaststufe von  $s'_{ges(400)}=0,106$  [-]. Entsprechend der bez. ink. Setzungen ergeben sich innere Steifemodule  $E_{Oed}$  über die Spannungssteigerungen von  $9,38, 10,71, 11,11, 3,16$  und  $6,28$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Die 3 d auf der Anfangsspannung  $25,0$  kN/m<sup>2</sup> gehaltene Reihe zeigt mit  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,074$  [-] einen  $E_{Oed(12,5)}=0,34$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{ink/ges(25,0)}=0,074$  [-] nach 1 d) und fast doppelt so hohe bez. ink. bzw. ges. Setzungen in der ersten Laststufe wie vorgenannte Reihe. Mit der ersten Zwischenlaststufe stellen sich hier die bez. ink. Setzungen über die verschiedenen Laststufen nach 1 d mit  $s'_{ink}=0,001, 0,003, 0,005$  und  $0,016$  [-] dar. Die bez. ges. Setzung nach 1d auf der letzten Spannungsstufe beträgt  $s'_{ges(400)}=0,099$  [-]. Hinsichtlich der ink. Setzungsanteile fallen hier die inneren Oedometermodule mit  $25,00, 18,75, 20,00$  und  $12,63$  MN/m<sup>2</sup> höher als die vorher genannten aus.

Die Versuchsreihe T1-DM-20 % CEM I-5d 25-9d 400 zeigt mit der gleichen Einbauporenzahl wie die 3 d auf  $25$  kN/m<sup>2</sup> gehaltene Reihe ( $e_{ges(0,0)}=2,80$  zu  $2,81$  [-]) etwas geringere bez. ink. bzw.

ges. Setzungen in der Initialspannungsstufe mit  $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}=0,065$  [-] mit  $E_{\text{Oed}(12,5)}=0,39$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}=0,064$  [-] nach 1 d). In den folgenden Spannungsstufen wurden dann bez. ink. Setzungen nach 1 d in Höhe von 0,001, 0,002, 0,004 und 0,012 [-] und eine bez. ges. Setzung  $s'_{\text{ges}(400)}$  nach 1 d in der Endlaststufe von 0,083 [-] gemessen. Diesbezüglich stellen sich hier mit  $E_{\text{Oed}}=50,00, 23,08, 22,22$  und  $17,14$  MN/m<sup>2</sup> höhere innere Oedometermodule ein (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Die 7 d auf der Initialspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> gehaltene Versuchsreihe zeigt bei einer etwas höheren Einbauporenzahl ( $e_{\text{ges}(0,0)}=2,84$  [-]) als die zuvor beschriebene Reihe, geringere bez. ink. bzw. ges. Setzungen  $s'_{\text{ink/bez}(25,0)}$  in der Anfangslaststufe mit  $0,058$  [-] ( $E_{\text{Oed}}=0,43$  MN/m<sup>2</sup>). Die sich mit den Spannungserhöhungen einstellenden bez. ink. Setzungen hier mit  $s'_{\text{ink}}=0,001, 0,002, 0,004$  und  $0,012$  ( $s'_{\text{ges}(400)}=0,076$  [-]) fallen fast übereinstimmend zu der 5d-25-Reihe aus. Die inneren Steifemodule betragen hier geringfügig abweichend über die Spannungsstufen  $E_{\text{Oed}}=37,50, 23,08, 24,00$  und  $17,91$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Die über den längsten Zeitraum von 14 d auf der Anfangslaststufe gehaltenen und mit 20 M.-% CEM I behandelte Reihe zeigt nach 1 d in dieser bez. ink. bzw. ges. Setzungsanteile  $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}$  wie die 5d-25-Reihe mit  $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}=0,065$  [-] und  $E_{\text{Oed}(12,5)}=0,38$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}=0,064$  [-] nach 1 d) bei gleicher Einbauporenzahl ( $e_{\text{ges}(0,0)}=2,80$  [-]). Die bez. ink. Setzungen über den Versuchsverlauf nach 1 d in den verschiedenen Laststufen betragen  $s'_{\text{ink}}=0,000, 0,001, 0,004$  und  $0,009$  ( $s'_{\text{ges}(400)}=0,079$  [-]) mit entsprechenden Steifemodulen  $E_{\text{Oed}}=150,00, 50,00, 27,27$  und  $22,22$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.20 bis Abb. 9.23).

Stellt man die Steifemodule des äußeren Spannungsintervalls  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> der Versuchsreihen gegenüber ergeben sich mit zunehmender Haltedauer dieser steigende Werte von  $E_{\text{Oed}(212,5)}=5,33, 15,31, 19,91, 20,64$  und  $27,11$  MN/m<sup>2</sup>. Ein Vergleich des insgesamt Spannungsintervalls ( $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>) ergibt entsprechend der abweichenden bez. ges. Setzungen nach 1 d in der Endlaststufe  $E_{\text{Oed}(200)}$ -Werte von  $3,78, 4,05, 4,80, 5,26$  und  $5,06$  MN/m<sup>2</sup>.

Betrachtet man die Versuchsreihe die 10 d vor Aufbringung der initialen Spannungsstufe geruht hat ergeben sich signifikante Unterschiede. Diese Versuchsreihe zeigte wie bereits beschrieben mit bez. ink. bzw. ges. Setzungen  $s'_{\text{ink/ges}(25,0)}$  in der ersten Laststufe in Höhe von  $0,017$  [-] ( $E_{\text{Oed}(25,0)}=1,52$  MN/m<sup>2</sup>), die geringsten der hier beschriebenen Reihen, zeigte aber im weiteren Versuchsablauf deutlich höhere bez. ink. Setzungen nach 1 d von  $0,005, 0,007, 0,011$  und  $0,025$  mit einer bez. ges. Setzung nach 1 d in der letzten Spannungsstufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup> von  $s'_{\text{ges}(400)}=0,064$  [-] und inneren Oedometermodulen von  $E_{\text{Oed}}=5,56, 7,69, 8,96$  und  $7,89$  MN/m<sup>2</sup>. Der Modul über das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> stellt sich hier aufgrund

der hohen bez. Ink. Setzungsanteile der verschiedenen Spannungsstufen mit  $E_{Oed(212,5)} = 6,25$  MN/m<sup>2</sup> sehr gering dar. Insgesamt betrachtet weist diese Versuchsreihe aber den höchsten Steifemodul über das gesamte Belastungsintervall aufgrund der geringsten bez. ges. Setzungen mit  $E_{Oed(200)} = 6,25$  MN/m<sup>2</sup> aus.

Betrachtet man die  $\log t-s'_{ink}$ -Linien der DM-CEM I-Reihen zeigen diese mit längerer Haltedauer der Anfangslaststufe entsprechend deutlich geringer abfallende konvexe Linien, die teilweise, je nach Bindemittelanteil, in lineare Verläufe übergehen. Gegenüber den vorgenannten behandelten Versuchsreihen verlaufen die ebenso als konkav zu beschreibenden Linien in den nachfolgenden Spannungsstufen jedoch deutlich flacher (s. Abschn. A. 9.7.1.2).

Analog den mit Mischbindemitteln bzw. BK behandelten Versuchsreihen zeigen auch die mit 5 M.-% CEM I behandelten Reihen in der Endlaststufe ein dem unbehandelten T1 Reihen entsprechendes Kompressionsverhalten, mit teilweise höheren bez. ink. Setzungen und einem annähernd linearen Verlauf der  $\log t-s'_{ink}$ -Linien. Die mit 10 M.-% behandelten Reihen zeigen ebenfalls einen linearen Verlauf, sind dann aber mit einer Abflachung ab ca. 1 d als konvex verlaufend zu beschreiben. Die mit 20 M.-% behandelten Reihen zeigen demgegenüber einen beinahe linear fallenden Verlauf über das gesamte beobachtete Intervall.

### 9.9.2.6.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen

Es wurden insgesamt 9 im WM-Verfahren hergestellte Versuchsreihen untersucht, die allesamt mit der Initialspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> belastet wurden. Diese unterteilen sich in:

- T1-WM-5, 10 und 20% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400,
- T1-WM-5, 10 und 20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400,
- T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400,
- T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-4d 400,
- T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400.

Die Versuchsreihen die über einen Zeitraum von 1 d auf der Anfangsspannung gehalten wurden, wurden nach steigenden Anteilen der Zugabemengen des Bindemittels mit Wasseranteilen  $w_{AE}$  von 65,69, 64,76 und 63,67 M.-% ( $w_E=191,48, 183,74$  und  $175,28$  %) eingebaut. Die rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  betragen damit -2,87, -3,16 und 3,11 % und die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  ergeben sich zu 4,04, 3,86 und 3,66 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,80, 0,79$  und  $0,79$  [-]).

Die Versuchsreihen, die über 5 d auf der Anfangsspannung 25,0 kN/m<sup>2</sup> wurden, zeigen etwas geringere Einbauwasseranteile  $w_{AE}$  von 65,06, 63,57 und 62,75 M.-% ( $w_E=186,17, 174,52$  und  $168,47$  %). Hier liegen die Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  bei -3,81, -4,93 und -4,52 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  fallen somit mit 3,70, 3,46 und 3,50 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,79, 0,78$  und  $0,78$  [-]) ebenfalls geringer aus.

Die Versuchsreihen T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400 und T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400 wurden mit Wasseranteilen  $w_{AE}$  von 65,72 und 63,23 M.-% ( $w_E=170,51$  und  $171,99$  M.-%, Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}=-4,09$  bzw.  $-3,78$ ) und Porenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  von 3,66 bzw. 3,73 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,79$  bzw.  $0,79$  [-]) eingebaut.

Die Versuchsreihe, welche mit einem niedrigeren w/z-Wert der Zementsuspension von 0,5 [-] angemischt wurde, hatte bei Einbau einen Wasseranteil  $w_A$  von 59,35 M.-% ( $w_E=145,98$  M.-%) und zeigte damit Abweichungen zu  $w_{Acal}$  in Höhe von -1,83 %. Die Einbauporenzahl  $e_{ges(0,0)}$  lag bei 3,28 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,77$  [-]).

Allgemein zeigen auch die WM-Versuchsreihen des T1 in der ersten Zwischenlaststufe deutlich geringere bez. ink. Setzungen als in der Initialspannungsstufe, die daran in den nachfolgenden Stufen sukzessive ansteigen.

Ein Vergleich der mit 5 M.-% behandelten Versuchsreihen (T1-WM-5% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400 und T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-4d 400) veranschaulicht, dass zuerst genannte, trotz wesentlich höherer Einbauporenzahl ( $e_{ges(0,0)}=4,04$  [-]) in der ersten Laststufe geringere ink bzw. ges.

Setzungen  $s'_{ink/ges}$  von 0,033 [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,75 \text{ MN/m}^2$ ) gegenüber der 5d auf der Anfangsspannung gehaltenen Versuchsreihe mit  $s'_{ink/ges}$  von 0,052 [-] mit  $E_{Oed(2)}=0,49$  ( $s'_{ink/ges}=0,049$  [-] nach 1d) zeigt. Im weiteren Verlauf zeigen sich dann bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  von 0,016, 0,039, 0,078 und 0,277 [-] mit  $s'_{ges}=0,277$  [-] ( $E_{Oed}=1,56, 1,29, 1,29$  und  $1,79 \text{ MN/m}^2$ ) nach 1 d in den Laststufen bei der Reihe T1-WM-2d 0-1d 25-4d 400, die in der ersten Zwischenlaststufe deutlich höher ausfallen als bei der 5 d initial belasteten Reihe mit  $s'_{ink}=0,007, 0,031, 0,081$  und  $0,112$  [-] mit  $s'_{ges}=0,282$  [-] ( $E_{Oed}=3,49, 1,60, 1,24$  und  $1,79 \text{ MN/m}^2$ ) (s. Abb. 9.24 und Abb. 9.25).

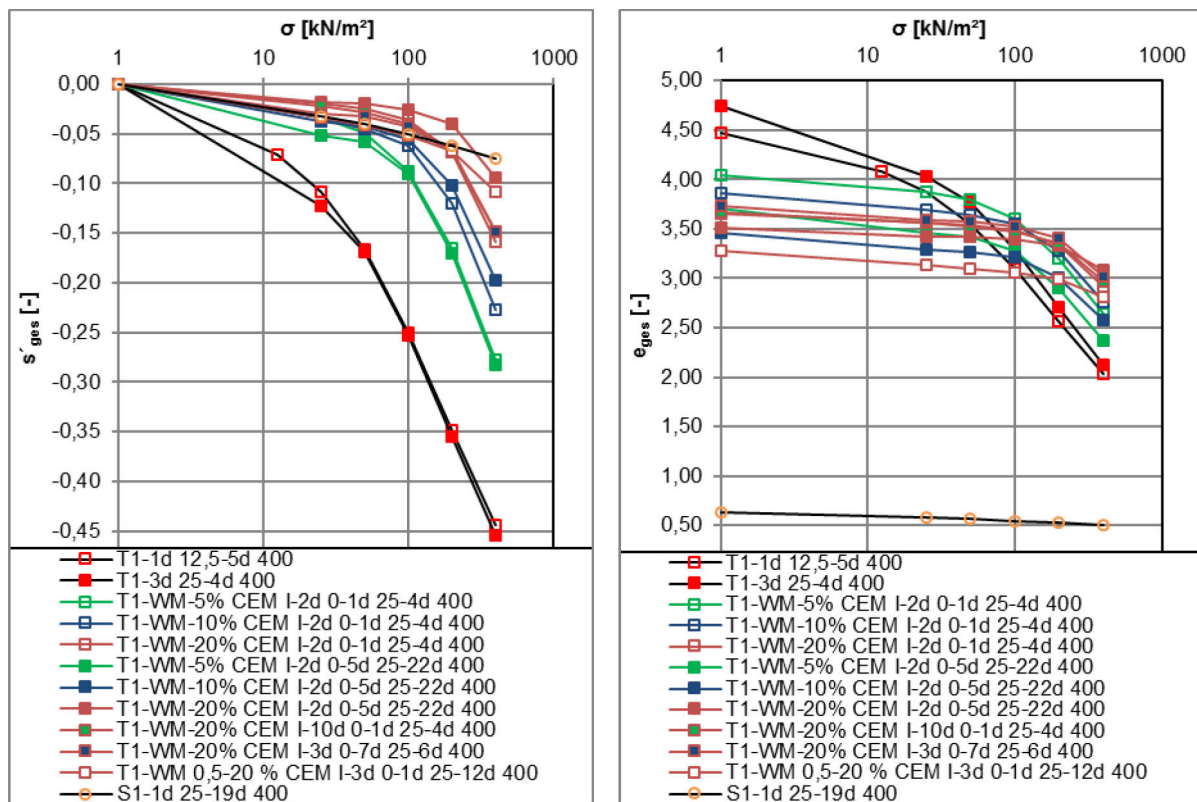


Abb. 9.24: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

Eine Gegenüberstellung des äußeren Spannungsintervalls  $\sigma=25,0$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  zeigt damit nur geringer Unterschiede von  $E_{Oed(212,5)}=1,54$  zu  $1,62 \text{ MN/m}^2$ . In Folge der höheren Setzungen der 5 d auf Anfangsspannung gehaltenen Versuchsreihe in der ersten Laststufe und damit insgesamt höheren Setzungen ergibt sich für den Oedometermodul über das gesamte Intervall  $0,00$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  hier ein geringer Wert von  $1,42$  zu  $1,44 \text{ MN/m}^2$ .

Bei den mit 10 M.-% CEM I behandelten Reihen zeigt die 1 d auf der Anfangslaststufe gehaltene Reihe mit einer höheren Einbauporenzahl  $e_{ges(0,0)}$  als die 5 d initial belastete Versuchsreihe ( $e_{ges(0,0)}=3,86$  zu  $3,70$  [-]) mit bez. ink. bzw. ges. Setzungen  $s'_{ink/ges(12,5)}$  von  $0,034$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,75 \text{ MN/m}^2$ ) geringere Setzungen als diese ( $s'_{ink/ges(12,5)}=0,038$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,66 \text{ MN/m}^2$ ,  $s'_{ink/ges(12,5)}=0,037$  nach 1d).

Im Verlauf über die Spannungsstufen zeigen sich dann aber auffallende Unterschiede mit höheren bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  bei T1-WM-10% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400 mit 0,011, 0,018, 0,057 und 0,107 [-] ( $s'_{ges(400)}=0,227$  [-]) und inneren  $E_{Oed}=2,24, 2,86, 1,74$  und  $1,87$  MN/m<sup>2</sup>. Bei T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400 betragen die  $s'_{ink}$  0,004, 0,014, 0,046 und 0,096 [-] ( $s'_{ges(400)}=0,0,197$  [-]) und inneren  $E_{Oed}=6,00, 3,61, 2,18$  und  $2,09$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.24 und Abb. 9.25).

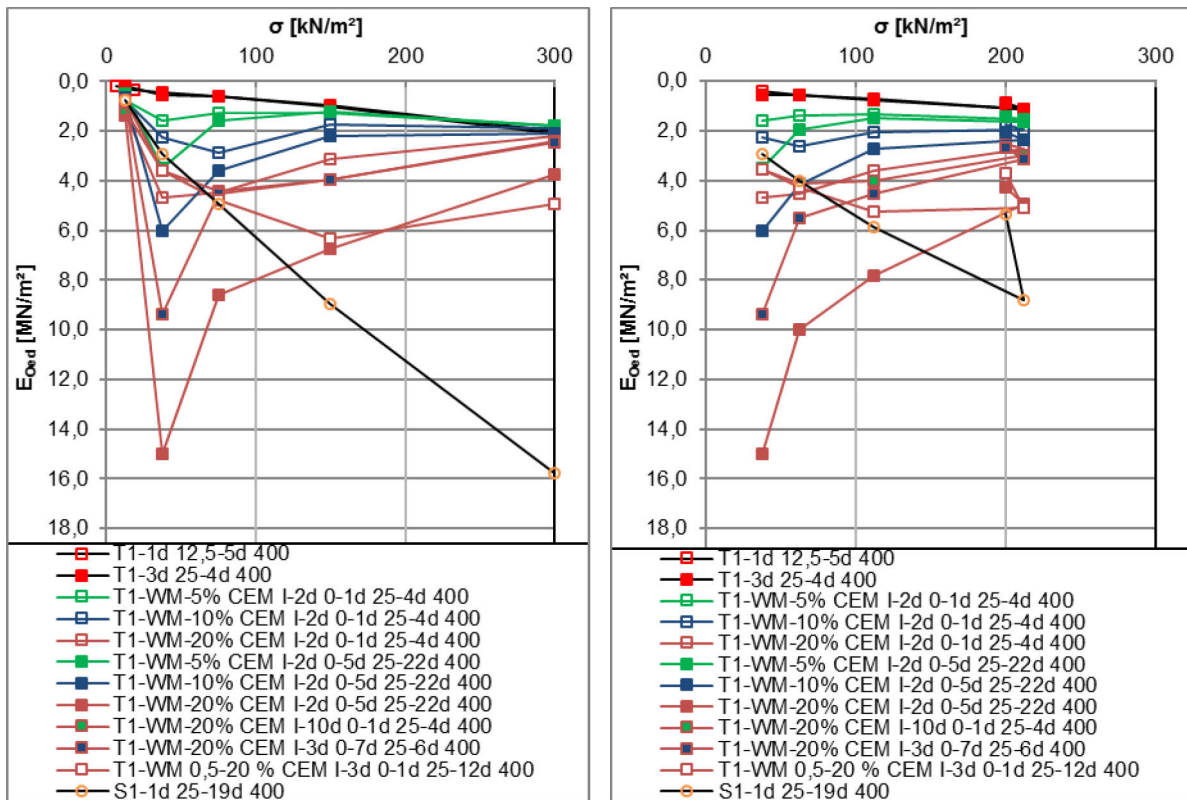


Abb. 9.25: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – I.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Die Oedometermodule über das Spannungsintervall 25,0 bis 400 kN/m<sup>2</sup> belaufen sich bei den genannten Versuchsreihen der Initialspannung auf  $E_{Oed(212,5)}=1,94$  und  $2,35$  MN/m<sup>2</sup>. Insgesamt, über das Spannungsintervall 0,00 bis 400 kN/m<sup>2</sup>, ergeben sich  $E_{Oed(200)}$ -Werte von  $1,76$  zu  $2,03$  MN/m<sup>2</sup>.

Die Gegenüberstellung der Versuchsreihen, die mit einem Anteil von 20 M.-% behandelt wurden, zeigen dementsprechend noch ausgeprägtere Unterschiede im Verformungsverhalten. Die bez. ink. bzw. ges. Setzungen der Anfangslaststufe belaufen sich hier auf  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,020$  (T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-22d 400) bzw.  $0,018$  (T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400) mit  $E_{Oed(12,5)}=1,26$  bzw.  $1,39$  MN/m<sup>2</sup> bei Einbauporenzahl  $e$  von  $3,66$  bzw.  $3,50$  [-]. Über die Spannungssteigerung zeigt die über 1d mit  $25$  kN/m<sup>2</sup> belastete Reihe bez. ink. Setzungen von  $0,005, 0,011, 0,032$  und  $0,091$  [-] mit einer  $s_{ges(400)}$  von  $0,159$  [-] und  $E_{Oed}=4,69, 4,48, 3,14$  und  $2,21$

MN/m<sup>2</sup>. Hingegen zeigt die 5d-Reihe kleinere bez. ink. Setzungen in Höhe von 0,002, 0,006, 0,015 und 0,054 mit  $s_{ges(400)}=0,094$  [-] und  $E_{Oed}=15,00, 8,57, 6,74$  und  $3,73$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.24 und Abb. 9.25).

Ein Vergleich der Steifemodule des äußeren Spannungsintervalls  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> ergibt  $E_{Oed}$ -Werte von  $2,70$  zu  $4,93$  MN/m<sup>2</sup>. Über das gesamte Spannungsintervall ( $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>) ergeben sich entsprechend der abweichenden bez. ges. Setzungen nach  $1$  d in der Endlaststufe  $E_{Oed(200)}$ -Werte von  $2,52$  zu  $4,26$  MN/m<sup>2</sup>.

Bei den 5d-25-Reihen ergibt sich damit eine Verdreifachung bzw. Verdopplung der Steifigkeit über das gesamte Spannungsintervall gegenüber den mit  $5$  bzw.  $10$  M.-% behandelten Reihen, wohingegen bei den 1d 25-Reihen lediglich eine Steigerung der Steifigkeit des  $1,75$ - bzw. knapp  $1,43$ -fachen zu beobachten ist.

Die insgesamt  $10$  d auf der Initialspannung gehaltene Reihe T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400 zeigt gegenüber der nur  $1$  d initial belasteten Reihe vergleichbare nur gering abweichende Verformungen. Die Einbauzahlen  $e$  sind hier mit  $3,66$  [-] identisch. Die bez. ink. bzw. ges. Setzung in der ersten Laststufe liegt hier bei  $0,022$  ( $E_{Oed(12,5)}=1,15$  MN/m<sup>2</sup>). Die weiteren über den Spannungsverlauf gemessenen bez. ink. Setzungen liegen bei  $0,007, 0,011, 0,025$  und  $0,083$  [-] bei einer bez. ges. Setzung  $s'_{ges(400)}=0,149$  [-] mit  $E_{Oed}=3,57, 4,41, 3,97$  und  $2,40$  MN/m<sup>2</sup>. Der Oedometermodul des äußeren Spannungsintervalls  $25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>  $E_{Oed(212,5)}$  liegt damit bei  $2,96$  MN/m<sup>2</sup>, insgesamt (Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>) ergeben sich  $2,69$  MN/m<sup>2</sup>.

Die Reihe die  $3$  d unbelastet gelagert wurde und dann über eine Haltedauer von  $7$  d mit der Initialspannung belastet wurde, T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-4d 400, zeigt ein ebenfalls der zuvor genannten und der T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-22d 400-reihe komparables Kompressionsverhalten mit einer vergleichsweise hohen Einbauporenzahl  $e$  von  $3,73$  [-].

Die bez. ink. bzw. ges. Setzung der ersten Laststufe liegt hier bei  $0,029$  mit  $E_{Oed(12,5)}=0,85$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{ink/ges(25,0)} = 0,029$  [-] nach  $1$  d) gefolgt von bez. ink. Setzungen über den Spannungsanstieg von  $0,003, 0,011, 0,025$  und  $0,081$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,149$  [-] und Oedometermodulen  $E_{Oed}=9,38, 4,55, 3,97$  und  $2,48$  MN/m<sup>2</sup>.

Für das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>  $E_{Oed(212,5)}$  ergibt sich ein Steifemodul von  $3,14$  MN/m<sup>2</sup> – insgesamt (Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>):  $2,69$  MN/m<sup>2</sup>.

Die mit dem niedrigeren w/z-Wert hergestellte Reihe T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 mit einer entsprechend kleineren Einbauporenzahl  $e$  von  $3,28$  [-] zeigt im Vergleich bez. ink. Setzungen, die überwiegend denen der T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400-Versuchsreihe vergleichbar sind. Die bez. ink. bzw. ges. Setzung der Anfangslaststufe liegt hier bei  $0,034$  mit  $E_{Oed(12,5)}=0,74$  MN/m<sup>2</sup>. Die bez. ink. Setzungen über den Versuchsablauf betragen  $0,007, 0,011, 0,016$  und  $0,041$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,108$  [-] und Oedometermodulen  $E_{Oed}=3,57, 4,76, 6,32$  und  $4,94$  MN/m<sup>2</sup>. Folglich der ink. Anteile ergibt sich für das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$

$\text{kN/m}^2$   $E_{\text{Oed}(212,5)}$  ein Steifemodul von  $5,08 \text{ MN/m}^2$ . Insgesamt (Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$ ) liegt der Modul bei  $3,71 \text{ MN/m}^2$ .

Betrachtet man die  $\log t$ - $s'_{\text{ink}}$ -Linien der WM-CEM I-Reihen des T1 zeigen diese, abweichend zu den vorherigen Laststufen, in der Endlaststufe größtenteils deutlich steiler fallende Linien zu Beginn der Endlaststufe als die unbehandelten Versuchsreihen des T1. Die T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400 und T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 hingegen zeigen deutlich flacher abfallende Linien (s. Abschn. A. 9.7.2.2).



### 9.9.3 T2-Versuchsreihen

Das Verformungsverhalten nach Konditionierung wurde beim Torf T2 allein mit dem Bindemittel CEM I untersucht. Insgesamt wurden 8 Versuchsreihen durchgeführt, von welchen 5 im DM-Verfahren hergestellt wurden und 3 Reihen im WM-Verfahren (2 mit einem  $w/z$ -Wert=1,5 [-], 1 mit einem  $w/z$ -Wert=0,5 [-]). Die Initialspannung betrug bei diesen Versuchsreihen immer 25,0 kN/m<sup>2</sup>.

#### 9.9.3.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen

Die untersuchten 5 DM-Versuchsreihen unterteilen sich wie nachstehend in:

- T2-DM-5, 10 und 20% CEM I-1d 25-5d 400,
- T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400,
- T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400.

Die Versuchsreihen die über die Dauer von 1 d initial belastet wurden, zeigten bei Einbau nach steigenden Anteilen der Zugabemengen des CEM I Wasseranteile  $w_{AE}$  von 51,76, 49,89 und 45,44 M.-% ( $w_E=107,29, 99,58$  und  $83,29$  M.-%), womit die rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  -1,39, -1,26 und 1,90 % betragen. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  ergeben sich zu 2,28, 2,18 und 1,67 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,69, 0,69$  und  $0,66$  [-]).

Bei den Reihen T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 und T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 betrug der Einbauwasseranteil  $w_{AE}$  46,83 bzw. 44,82 M.-% ( $w_E=88,08$  bzw.  $81,24$  M.-%). Damit ergeben sich rel. Differenzen zum berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  von 1,10 bzw. -3,23 %.

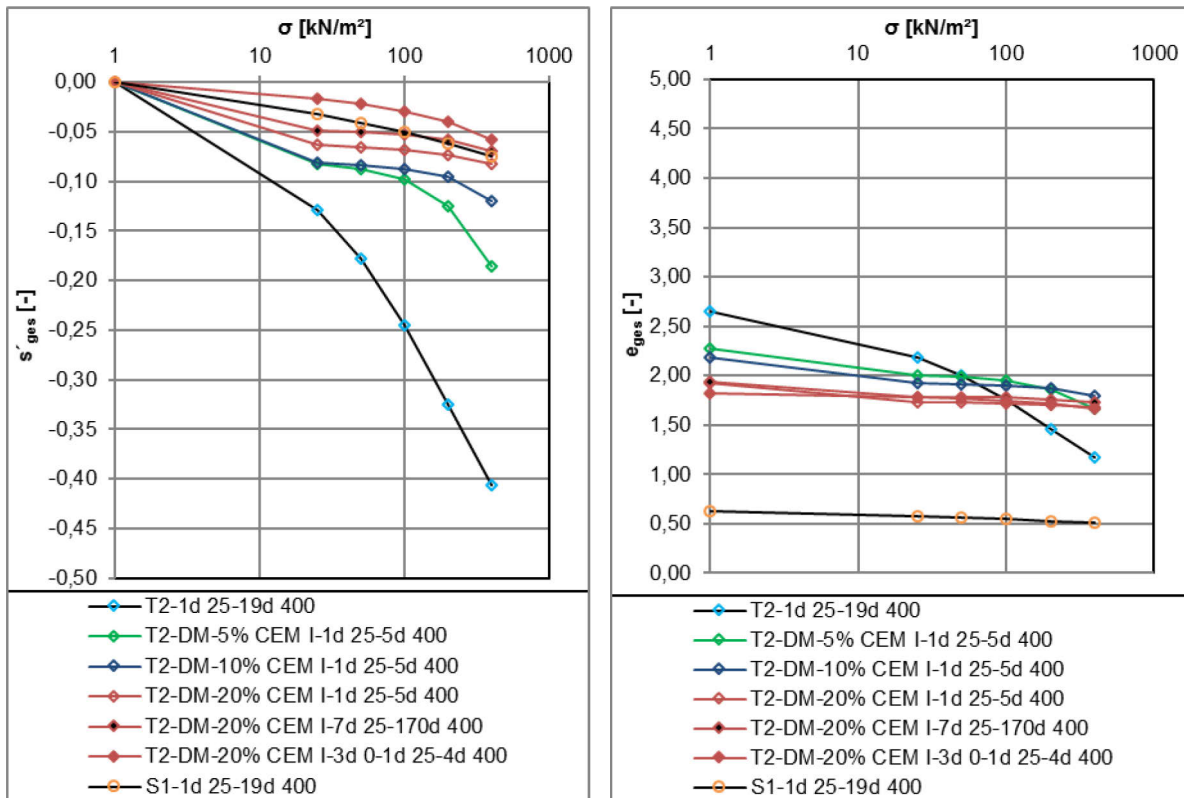


Abb. 9.26: T2-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

Im Vergleich zeigen die Reihen T2-DM-5, 10 und 20% CEM I-1d 25-5d 400 nach 1d in der Anfangslaststufe gering abweichende bez. ink bzw. ges. Setzungen von  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,082, 0,081$  und  $0,063$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,30, 0,31, 0,39 \text{ MN/m}^2$ ), die mit den folgenden Spannungssteigerungen zunehmen. Die Versuchsreihe T2-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400 zeigt in nachfolgenden Spannungsstufen bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,005, 0,010, 0,028$  und  $0,060$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,185$  [-] mit inneren  $E_{Oed}=4,84, 4,84, 3,55$  und  $3,56 \text{ MN/m}^2$ . Die bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  der mit 10 M.-% behandelten Reihe betragen  $0,002, 0,004, 0,008$  und  $0,024$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,120$  [-] nach 1 d und inneren  $E_{Oed}=10,71, 12,50, 11,76$  und  $8,22 \text{ MN/m}^2$ . Bei der Versuchsreihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 belaufen sich die bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  auf  $0,002, 0,003, 0,005$  und  $0,009$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,083$  [-] nach 1 d mit inneren  $E_{Oed}=10,71, 16,67, 21,43$  und  $21,82 \text{ MN/m}^2$  (s. Abb. 9.26 und Abb. 9.27).

Die Oedometermodule über das Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  belaufen sich bei den 3 Versuchsreihen auf  $E_{Oed(212,5)}=3,63, 9,57$  und  $19,57 \text{ MN/m}^2$ . Über das gesamte Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$ , ergeben sich  $E_{Oed(200)}$ -Werte  $2,16, 3,33$  und  $4,85 \text{ MN/m}^2$ .

Die Versuchsreihe T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 zeigt mit der Reihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 gleichwertige Einbauparameter. Dennoch liegen die bez. ink. bzw. ges. Setzungen der Anfangslaststufe mit  $s_{ink/ges(25,0)}=0,049$  und  $E_{Oed(12,5)}=0,51 \text{ MN/m}^2$  ( $s'_{ink/ges}=0,49$  [-] nach 1 d) geringfügig unter denen der Reihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400.

Die bez. ink. Setzungen der folgenden Laststufen betragen 0,001, 0,003, 0,005 und 0,012 [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,070$  [-] und inneren von  $E_{Oed}=18,75, 18,75, 18,75$  und  $17,14$  MN/m<sup>2</sup> und weichen nur gering von der T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400-Versuchsreihe ab. Der Modul über das Spannungsintervall  $\sigma =25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>  $E_{Oed(212,5)}$  liegt bei  $=17,86$  MN/m<sup>2</sup>. Über das gesamte Spannungsintervall  $\sigma =0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> ergibt sich ein  $E_{Oed(200)}$ -Wert von  $5,70$  MN/m<sup>2</sup>, der durch die im Vergleich etwas kleinere Setzung der Anfangslaststufe über dem der Reihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 liegt (s. Abb. 9.26 und Abb. 9.27).

Stellt man die 3 d unbelastete Versuchsreihe, die eine etwas geringere Einbauporenzahl  $e_{ges(0,0)}$  aufweist, diesen gegenüber, zeigen sich deutliche Unterschiede. Die bez. ink. bzw. ges. Setzung  $s'_{ink/ges(25,0)}$  beträgt hier lediglich  $0,017$  [-] mit  $E_{Oed(12,5)}=1,44$  MN/m<sup>2</sup>. Die über den Versuchsablauf folgenden bez. ink. Setzungen betragen  $0,005, 0,007, 0,011$  bzw.  $0,018$  [-] ( $s'_{ges(400)}=0,059$  [-] nach 1 d innere  $E_{Oed}=5,00, 6,82, 9,52$  und  $10,91$  MN/m<sup>2</sup>), womit diese beachtlich höher ausfallen als die der Reihen T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 und T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 und sich ebenso in einem niedrigen  $E_{Oed(212,5)}$ -Wert von  $9,11$  MN/m<sup>2</sup> reflektieren.

Hingegen zeigt der Oedometermodul  $E_{Oed(200)}$  mit  $6,84$  MN/m<sup>2</sup> infolge der geringen bez. ges. Setzung, die höchste Steifigkeit der T2-Versuchsreihen.

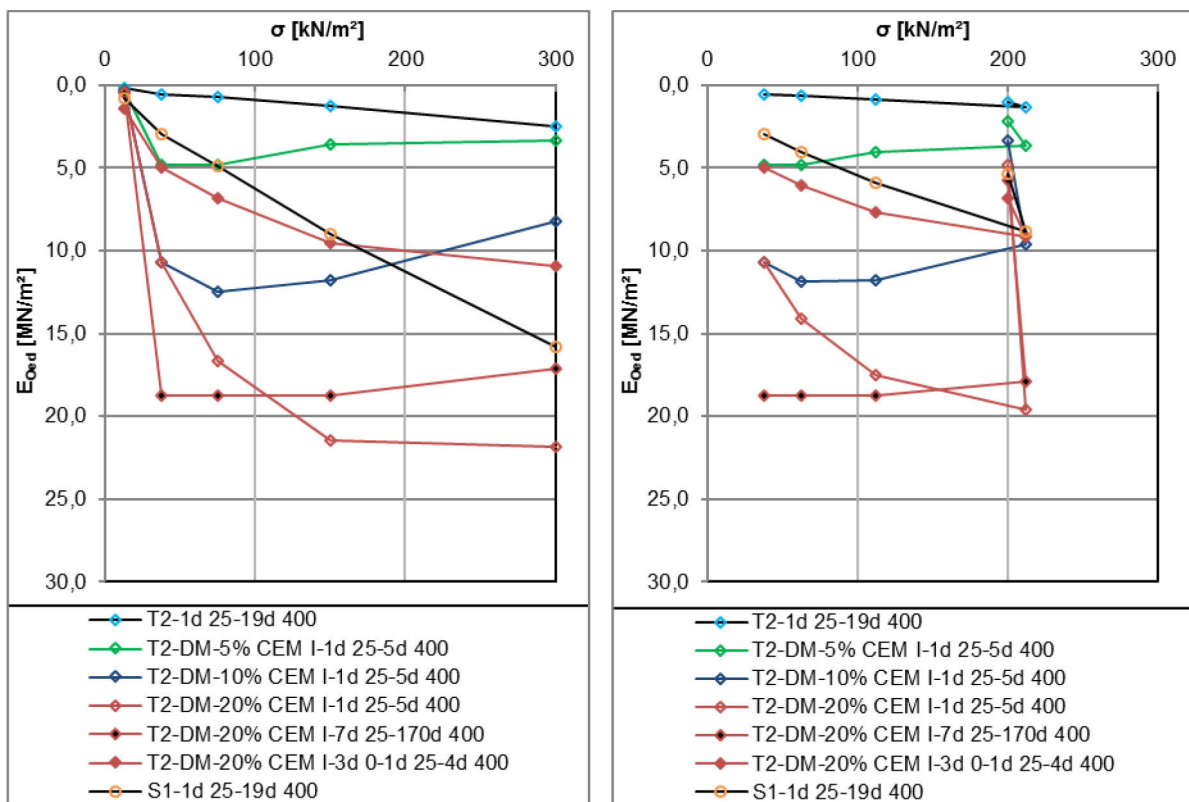


Abb. 9.27: T2-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed(außen)}$ .

Die Zeitsetzungslinien ( $\log t-s'_{ink}$ -Linien) der T2-DM-Versuchsreihen zeigen in der Anfangslaststufe, mit Ausnahme der 3d 0-Reihe einen einheitlichen Verlauf der zuerst als konkav und dann als beinahe linear horizontal auslaufend zu beschreiben ist. Die 3d 0-Reihe zeigt nach geringer Kompression durch Lastaufbringung eine linear auslaufende und sehr flach abfallende Linie. In der folgenden Laststufe sind die Linien zum Ende des Beobachtungszeitraums idealisiert als konkav geformt zu beschreiben. Mit den Laststeigerungen zeigen die mit 5 bzw. 10 M.-% behandelten Reihen deutliches Setzungspotential und stellen sich gegenüber den restlichen Versuchsreihen, die lineare Linien bzw. konvexe Verläufe (T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400) über die beobachteten Intervalle zeigen, als konkav über das Beobachtungsintervall dar (s. Abschn. A. 9.8.1.1).

### 9.9.3.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen

Die 3 im WM-Verfahren hergestellten Reihen unterteilen sich folgend in:

- T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400,
- T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400,
- T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400.

Die mit einem  $w/z$ -Wert von 1,5 [-] angemischten Versuchsreihen wiesen bei Einbau Wasseranteile  $w_{AE}$  von 55,65 bzw. 65,01 M.-% ( $w_E=125,47$  bzw. 127,34 M.-%) auf und zeigten rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  von -2,47 bzw. -1,83 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  betragen 2,74 bzw. 2,78 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,73$  bzw. 0,74 [-]).

Die mit dem  $w/z$ -Wert=0,5 [-] hergestellte Versuchsreihe T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 wurde mit einem Wasseranteil  $w_A$  von 51,45 M.-% ( $w=105,96$  %, rel. Abweichungen=1,98 % zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$ ) und einer Porenzahl  $e_{ges(0,0)}=2,37$  [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,70$  [-]) eingebaut.

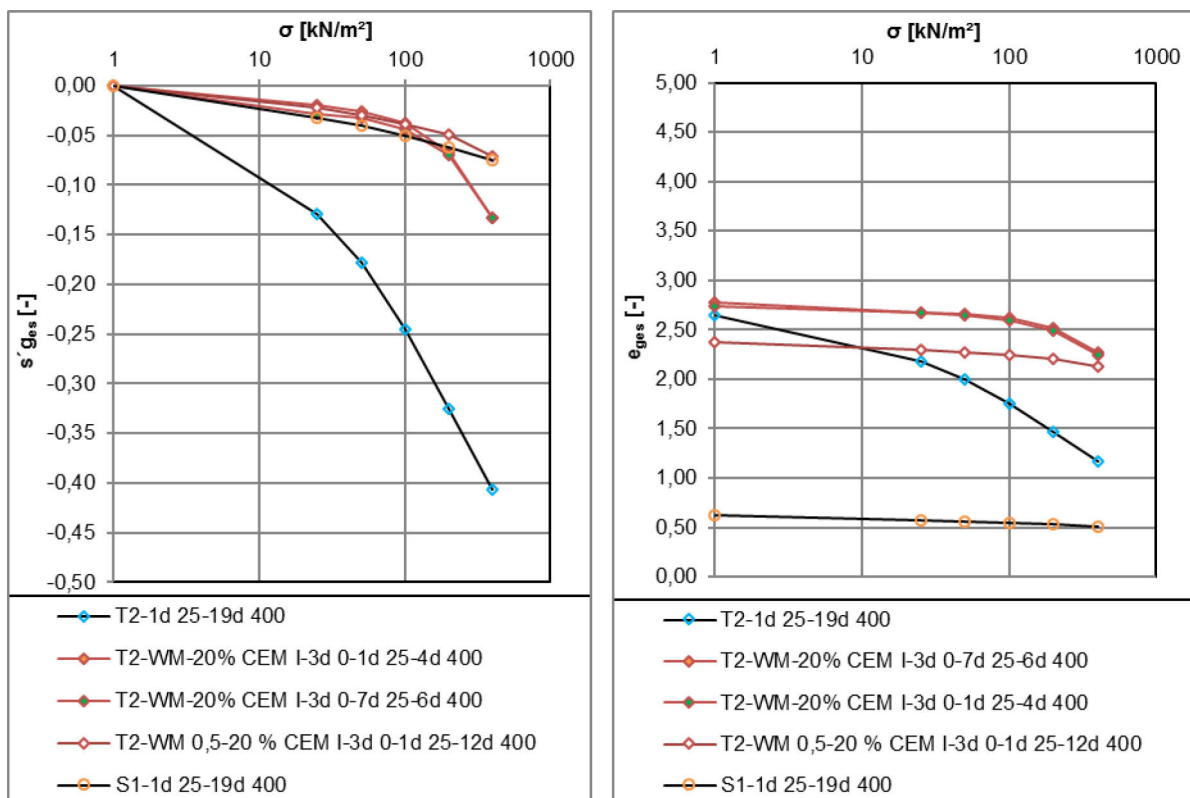


Abb. 9.28: T2-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

Die Gegenüberstellung der  $w/z=1,5$ -Versuchsreihen verdeutlicht, dass die 7 d auf der Anfangslaststufe gehaltene Reihe etwas geringere bez. ink. Setzungen ab der ersten Zwischenlaststufe zeigt. Die bez. ink bzw. ges. Setzungen  $s'_{ink/ges(25,0)}$  betragen zum Ende der Anfangslaststufe

0,019 bzw. 0,029 [-] ( $s'_{ink/ges(25,0)}=0,028$  [-] nach 1d bei T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) mit  $E_{Oed(12,5)}=1,29$  bzw.  $0,86$  MN/m<sup>2</sup>. Im weiteren Verlauf zeigen sich bei der Reihe T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-6d 400 bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,006, 0,012, 0,029$  und  $0,067$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,134$  nach 1d [-] und inneren  $E_{Oed}=3,95, 4,23, 3,43$  und  $2,99$  MN/m<sup>2</sup>. Die Versuchsreihe T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400 hingegen weist bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  in Höhe von  $0,004, 0,011, 0,026$  und  $0,064$  [-] aus mit  $s'_{ges(400)}=0,134$  [-] nach 1d und inneren  $E_{Oed}=6,82, 4,55, 3,92$  und  $3,11$  MN/m<sup>2</sup>. Der  $E_{Oed(200)}$  der beiden Versuchsreihen beträgt entsprechend der gleichen bez. ges. Setzung der Reihen  $3,00$  MN/m<sup>2</sup>. Über das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  betragen die  $E_{Oed(212,5)}$ -Werte  $3,28$  bzw.  $3,59$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.28 und Abb. 9.29).

Die Reihe T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 zeigt insgesamt wesentlich geringere Setzungen, wobei hier der Setzungsanteil der ersten Zwischenlaststufe unverhältnismäßig hoch erscheint. Die bez. ink bzw. ges. Setzung  $s'_{ink/ges(25,0)}$  beträgt entgegen der niedrigeren Einbauporenzahl  $0,023$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=1,10$  MN/m<sup>2</sup>). Mit den Spannungserhöhungen wurden bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,008, 0,009, 0,011$  und  $0,022$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,071$  [-] nach 1 d und  $E_{Oed}=3,33, 5,88, 9,09$  und  $9,30$  gemessen. Die  $E_{Oed}$ -Werte  $E_{Oed(212,5)}$  bzw.  $E_{Oed(200)}$  betragen hier  $7,73$  und  $5,62$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.28 und Abb. 9.29).

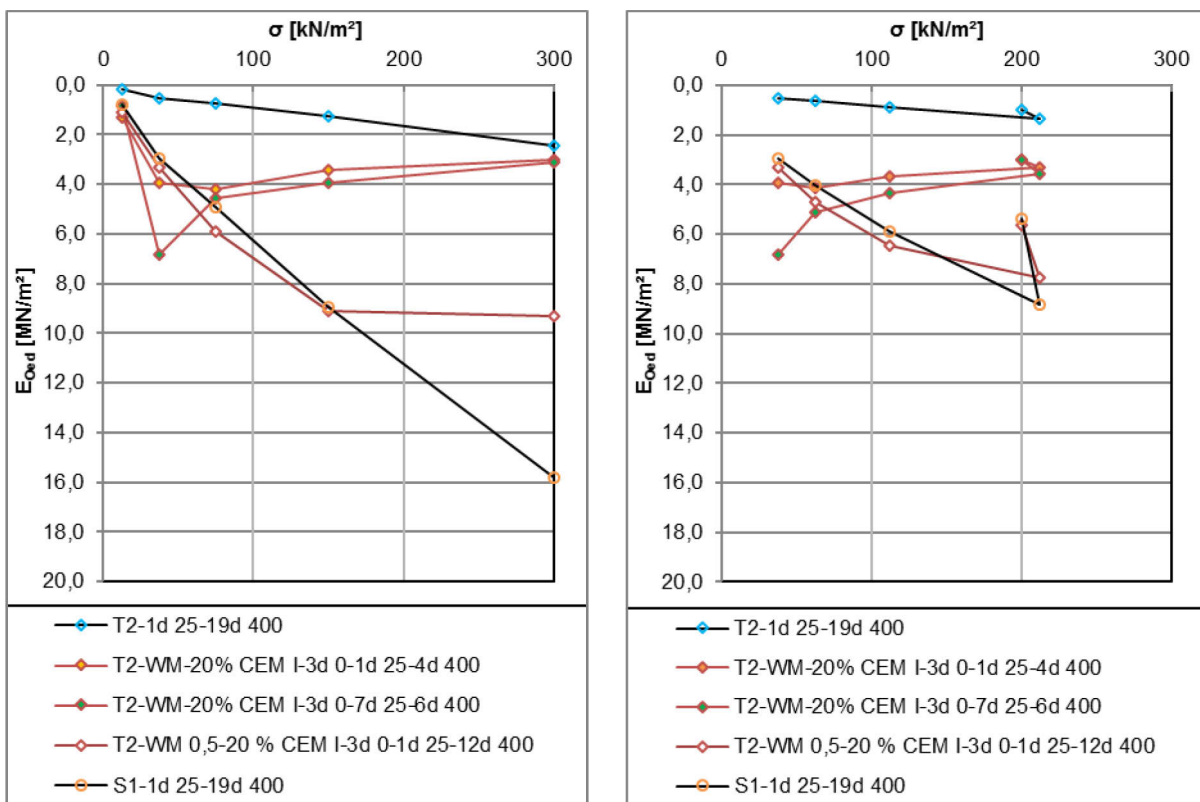


Abb. 9.29: T2-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Betrachtet man die  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien der Initialspannungsstufe zeigen diese nach der Sofortsetzung, die den Großteil der inkrementellen Setzungen dieser Laststufe ausmacht, einen annähernd linearen Verlauf bis zum Ende der Beobachtung. Lediglich die Reihe T2-WM 20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 zeigt einen Bruch des linearen Verlaufs bei 0,2 d. In den nachfolgenden Laststufen sind die inkrementellen Zeitsetzungslinien ( $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien) ebenfalls als linear fallend bzw. zum Ende der Laststufe als konkav im Verlauf zu beschreiben. In der Laststufe  $\sigma=200 \text{ kN/m}^2$  zeigen sich bei den  $w/z=1,5$ -Reihen (T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 und T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400), dann aber deutlich konvexe Verläufe der Linien, die dann bis zum Versuchsende beinahe linear auslaufen. Die mit einem  $w/z$ -Wert von 0,5 [-] angemischte Reihe hingegen zeigt weitestgehend lineare Verläufe ähnlich den DM-Reihen. Ähnlich der WM-Versuchsreihen des T1 zeigen auch hier die im Nassmischverfahren mit einem  $w/z$ -Wert=0,5 [-] behandelten Reihen des T2 deutlich steiler fallende  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien zu Beginn der Endlaststufe als die unbehandelte Versuchsreihe des T2 (s. Abschn. A. 9). Dieses Verhalten zeigt sich auch zu Beginn der letzten Zwischenlaststufe  $\sigma=200 \text{ kN/m}^2$  (s. Abschn. A. 9.8.1.2).

## 9.9.4 T3-Versuchsreihen

Das Kompressionsverhalten nach Konditionierung wurde beim Torf T3 analog zum T2 ausschließlich mit dem Bindemittel CEM I untersucht.

### 9.9.4.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen

Die untersuchten 5 DM-Versuchsreihen unterteilen sich folgend in:

- T3-DM-5, 10 und 20% CEM I-1d 25-5d 400,
- T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400,
- T3-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400.

Die 1 d initial belasteten Versuchsreihen, wiesen bei Einbau nach steigenden Anteilen der Zugabemengen des CEM I Wasseranteile  $w_{AE}$  von 46,08, 43,85 und 39,68 M.-% ( $w_E=85,47, 78,10$  und  $65,78$  M.-%) aus, womit die rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  -2,08, -2,38 und -3,68 % betragen. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  lagen bei 2,06, 1,90 und 1,62 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,67, 0,66$  und  $0,62$  [-]).

Die Reihen T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 und T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 zeigten Einbauwasseranteil  $w_{AE}$  von 40,24 bzw. 39,41 M.-% ( $w_E=67,34$  bzw.  $65,04$  %) mit rel. Differenzen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  von -2,28 bzw. -4,30 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  ergeben sich somit zu 1,56 bzw. 1,60 [-].

Gegenübergestellt zeigen die Reihen T3-DM-5, 10 und 20% CEM I-1d 25-5d 400 nach 1d in der Anfangslaststufe bez. ink bzw. ges. Setzungen von  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,061, 0,045$  und  $0,042$  [-] ( $E_{Oed(12,5)}=0,41, 0,55$  und  $0,60$  MN/m<sup>2</sup>), die mit den daran anschließenden folgenden Spannungserhöhungen in der ersten Zwischenlaststufe abnehmen und daran wieder zunehmen.

Die Versuchsreihe T3-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400 zeigt anschließend bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,009, 0,019, 0,038$  und  $0,058$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,185$  [-] nach 1d und inneren  $E_{Oed}=2,68, 2,70, 2,63$  und  $3,47$  MN/m<sup>2</sup>.



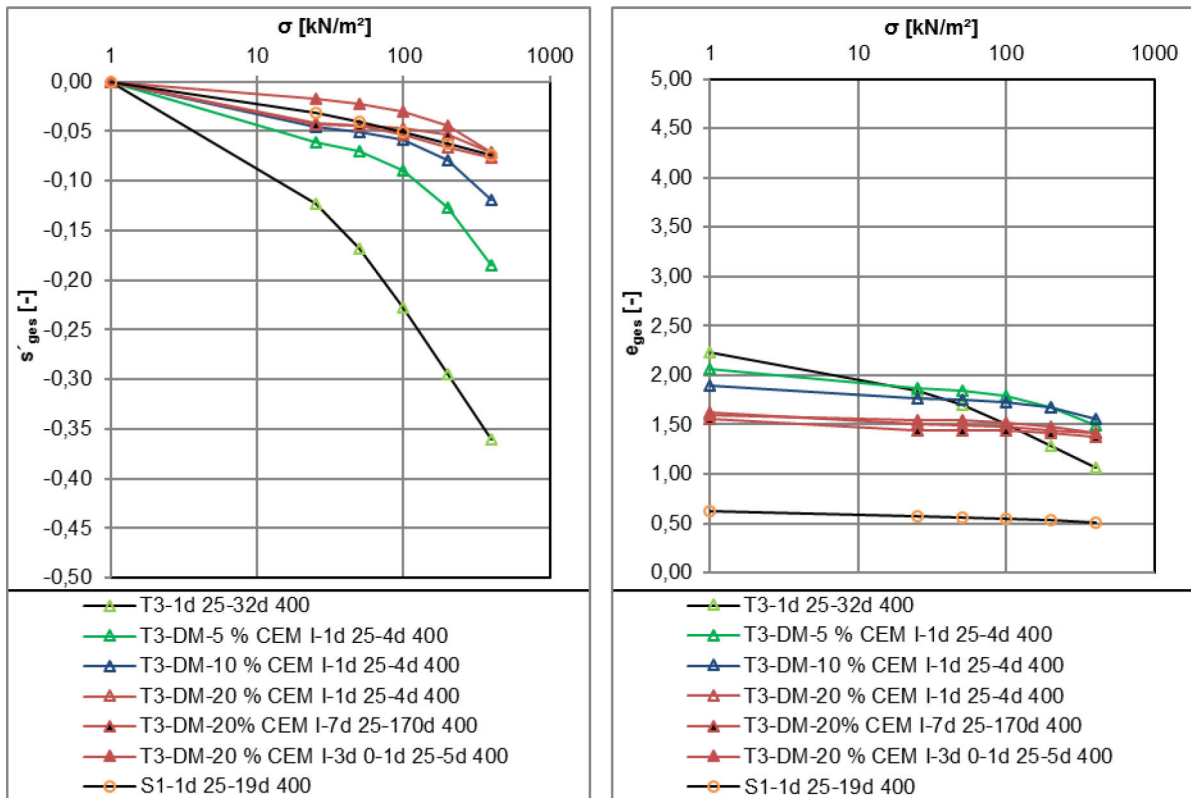


Abb. 9.30: T3-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{ges}$ .

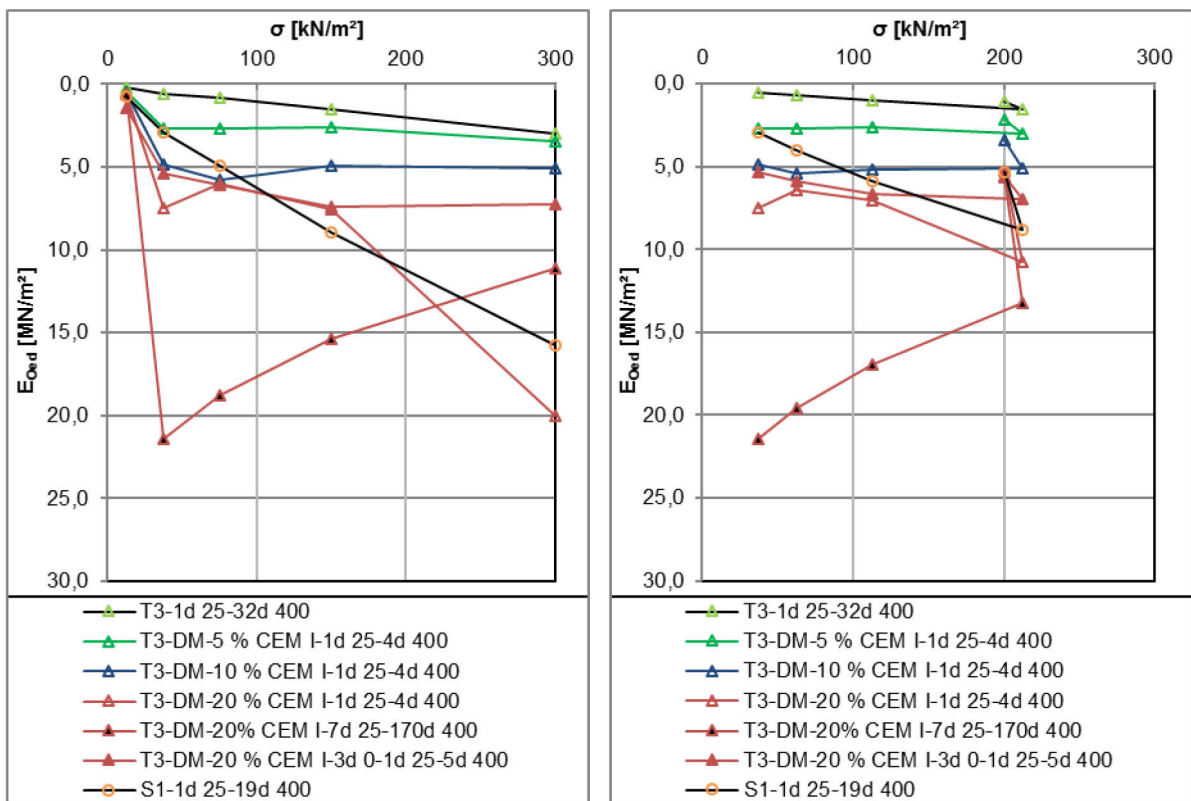


Abb. 9.31: T3-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Die bez. ink. Setzungen  $s'_{\text{ink}}$  der mit 10 M.-% behandelten Reihe betragen ab der ersten Zwischenlaststufe 0,005, 0,009, 0,020 und 0,040 [-] mit  $s'_{\text{ges}(400)}=0,119$  [-] nach 1d und  $E_{\text{Oed}}=4,84, 5,77, 4,96$  und  $5,06$  MN/m<sup>2</sup>.

Bei der Versuchsreihe T3-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 belaufen sich die bez. ink. Setzungen  $s'_{\text{ink}}$  in den folgenden Stufen auf 0,001, 0,003, 0,007 und 0,018 [-] mit  $s'_{\text{ges}(400)}=0,071$  [-] nach 1d mit  $E_{\text{Oed}}=7,50, 6,00, 7,59$  und  $20,00$  MN/m<sup>2</sup>.

Die Oedometermodule der 3 Reihen über das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> betragen  $E_{\text{Oed}(212,5)}=3,04, 5,10$  und  $10,77$  MN/m<sup>2</sup> und über das gesamte Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> belaufen sich die  $E_{\text{Oed}(200)}$ -Werte auf  $2,17, 3,37$  und  $5,23$  MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.30 und Abb. 9.31).

Die Versuchsreihe T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 zeigt im Vergleich zur Reihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 eine wie beschrieben geringfügig niedrigere Einbauporenzahl  $e_{\text{ges}(0,0)}$ . Dagegen liegen die bez. ink. bzw. ges. Setzungen der Anfangslaststufe mit  $s'_{\text{ink}/\text{ges}(25,0)}=0,043$  und  $E_{\text{Oed}(12,5)}=0,58$  MN/m<sup>2</sup> ( $s'_{\text{ink}/\text{ges}}=0,042$  nach 1 d) etwas über denen der Reihe T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400.

Die bez. ink. Setzungen mit den anschließenden Spannungsänderungen betragen nach 1d  $0,001, 0,003, 0,007$  und  $0,018$  [-] mit  $s'_{\text{ges}(400)}=0,071$  [-] und  $E_{\text{Oed}}=21,43, 18,75, 15,38$  und  $11,11$  MN/m<sup>2</sup> und zeigen damit, bis auf die Endlaststufe, geringere Setzungsanteile als die T3-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400. Über das Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> liegt der  $E_{\text{Oed}(212,5)}$  bei  $13,24$  MN/m<sup>2</sup> – insgesamt (Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>) ergibt sich ein  $E_{\text{Oed}(200)}$ -Werte von  $5,62$  MN/m<sup>2</sup>, welcher durch die im Vergleich etwas kleinere Setzung der initialen Laststufe über dem der Reihe T3-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 liegt (s. Abb. 9.30 und Abb. 9.31).

Betrachtet man die Versuchsreihe T3-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 und stellt diese den vorgenannten mit 20 M.-% behandelten Reihen, die nach Herstellung sofort belastet wurden, gegenüber ergeben sich analog zu den vergleichbaren T1 und T2-Versuche deutliche Unterschiede der bez. ink. Setzungen über die gesamten untersuchten Spannungsstufen. Die bez. ink. bzw. ges. Setzung  $s'_{\text{ink}/\text{ges}(25,0)}$  beträgt hier nur  $0,018$  [-] mit  $E_{\text{Oed}}=1,42$  MN/m<sup>2</sup> und die über den Versuchsablauf folgenden bez. ink. Setzungen betragen  $0,005, 0,008, 0,014$  bzw.  $0,028$  ( $s'_{\text{ges}(400)}=0,072$  und  $E_{\text{Oed}}=5,36, 6,12, 7,41$  und  $7,23$  MN/m<sup>2</sup>). Damit zeigen die bez. ink. Setzungen hier bedeutend höhere Werte als die der Reihen T3-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400 und T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400, was sich in dem  $E_{\text{Oed}(212,5)}$ -Wert von  $6,94$  MN/m<sup>2</sup> widerspiegelt.

Dagegen beträgt der  $E_{\text{Oed}(200)}$  infolge der geringen bez. ges. Setzung  $5,58$  MN/m<sup>2</sup> und zeigt damit die höchste Steifigkeit über das Spannungsintervall  $\sigma=0,00$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup> der T3-Versuchsreihen.

Die Zeitsetzungslinien (log t-s'<sub>ink</sub>-Linien) der T3-DM-Böden zeigen mit der Initialspannung, auch hier mit Ausnahme der 3d 0-Reihe, bei den mit 20 M.-% behandelten Reihen einen einheitlichen

Verlauf der zuerst als konkav und dann als beinahe linear horizontal auslaufend zu beschreiben ist. Die mit 5 bzw. mit 10 M.-% behandelten Reihen zeigen hingegen insgesamt einen s-förmigen Verlauf der Linien und einen zum Ende der Beobachtung hin flach abfallenden Graphen. In der folgenden Laststufe sind die Linien zum Ende des Beobachtungszeitraums idealisiert als konkav geformt zu beschreiben – die 7d auf der Initialspannung gehaltene Reihe zeigt dagegen einen fast horizontalen und linearen Verlauf mit geringerer Kompression zum Ende der Beobachtung. Mit den Laststeigerungen zeigen die mit 5 bzw. 10 M.-% behandelten Reihen deutliche Kompressionen und die Verläufe der Linien sind zu Beginn der Beobachtung als konkav und dann linear stark fallend zu beschreiben. Die restlichen Reihen zeigen über die Laststufen linear fallend verlaufende  $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linien, wobei die 3d 0-Reihe in der Endlaststufe einen konkaven Verlauf annimmt (s. Abschn. A. 9.9.1.1).

### 9.9.4.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen

Die im WM-Verfahren hergestellten Reihen unterteilen sich in:

- T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400,
- T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400,
- T3-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400.

Die mit einem w/z-Wert von 1,5 [-] angemischten Versuchsreihen zeigten Einbauwasseranteile  $w_{AE}$  von 51,65 bzw. 51,52 M.-% ( $w_E=106,81$  bzw.  $106,25$  %) und damit rel. Abweichungen zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$  von -2,44 bzw. -2,59 %. Die Porenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  betragen zum Einbauzeitpunkt 2,62 bzw. 2,47 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,72$  bzw.  $0,71$  [-]).

Die Versuchsreihe T3-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 die mit dem w/z-Wert=0,5 [-] angemischt wurde, hatte bei Einbau einen Wasseranteil  $w_{AE}$  von 44,52 M.-% ( $w_E=80,23$  %, rel. Abweichungen=-2,59 % zu den berechneten Wasseranteilen  $w_{Acal}$ ) und eine Porenzahl  $e_{ges(0,0)}$  von 1,91 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,66$  [-]).

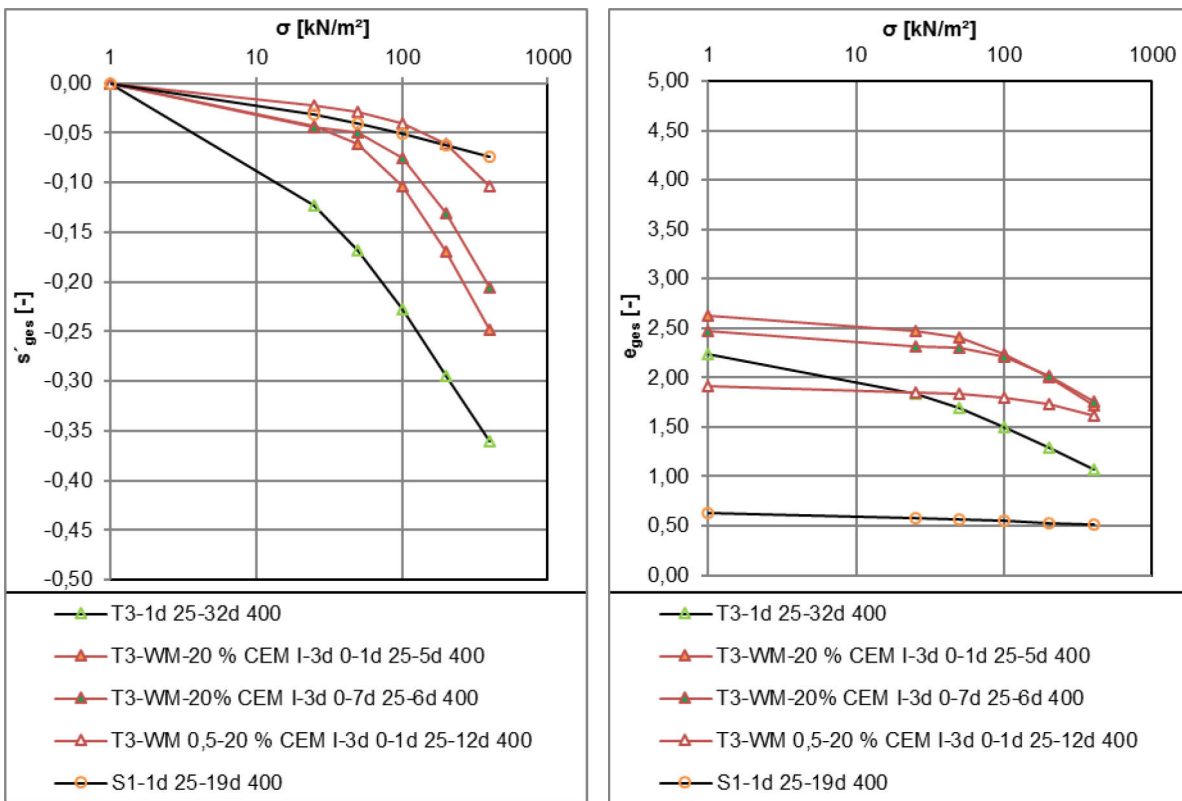


Abb. 9.32: T3-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma - s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma / e_{ges}$ .

Ein Vergleich der w/z=1,5-Versuchsreihen verdeutlicht, dass die 7 d auf der Anfangslaststufe gehaltene Reihe beachtlich geringere bez. ink. Setzungen ab der ersten Zwischenlaststufe ausweist. Die bez. ink bzw. ges Setzungen  $s'_{ink/ges(25,0)}$  betragen zum Ende der Anfangslaststufe 0,043 bzw. 0,044 [-] ( $s'_{ink/ges(25,0)}=0,042$  [-] nach 1d bei T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) mit  $E_{Oed(12,5)}=0,58$  bzw. 0,57 MN/m<sup>2</sup>. Im Verlauf der Spannungserhöhungen zeigen sich bei der Reihe T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-6d 400 bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,018, 0,044, 0,065$  und 0,080 [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,249$  [-] und  $E_{Oed}=1,42, 1,15, 1,55$  und 2,52 MN/m<sup>2</sup>. Die Versuchsreihe T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400 hingegen weist bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  in Höhe von 0,005, 0,026, 0,055 und 0,075 [-] aus mit  $s'_{ges(400)}=0,205$  [-] und  $E_{Oed}=5,00, 1,91, 1,81$  und 2,67 MN/m<sup>2</sup>. Die  $E_{Oed(200)}$ -Werte der beiden Versuchsreihen betragen 1,61 bzw. 1,95 MN/m<sup>2</sup>. Über das äußere Spannungsintervall  $\sigma=25,0$  bis 400 betragen die  $E_{Oed(212,5)}$ -Werte 1,82 bzw. 2,32 MN/m<sup>2</sup> (s. Abb. 9.32 und Abb. 9.33).

Die Reihe T3-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 zeigt insgesamt viel geringere Setzungen. Die bez. ink. bzw. ges. Setzung  $s'_{ink/ges(25,0)}$  beträgt entgegen der deutlich niedrigeren Einbauporenzahl 0,022 [-] mit  $E_{Oed(12,5)}=1,14$  MN/m<sup>2</sup>. Mit den Spannungserhöhungen wurden bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,007, 0,012, 0,021$  und 0,043 [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,104$  [-] nach 1d und innere  $E_{Oed}=3,85, 4,29, 4,84$  und 4,65 gemessen. Die  $E_{Oed(212,5)}$ - bzw.  $E_{Oed(200)}$ -Werte betragen hier somit 4,58 bzw. 3,85 MN/m<sup>2</sup>.

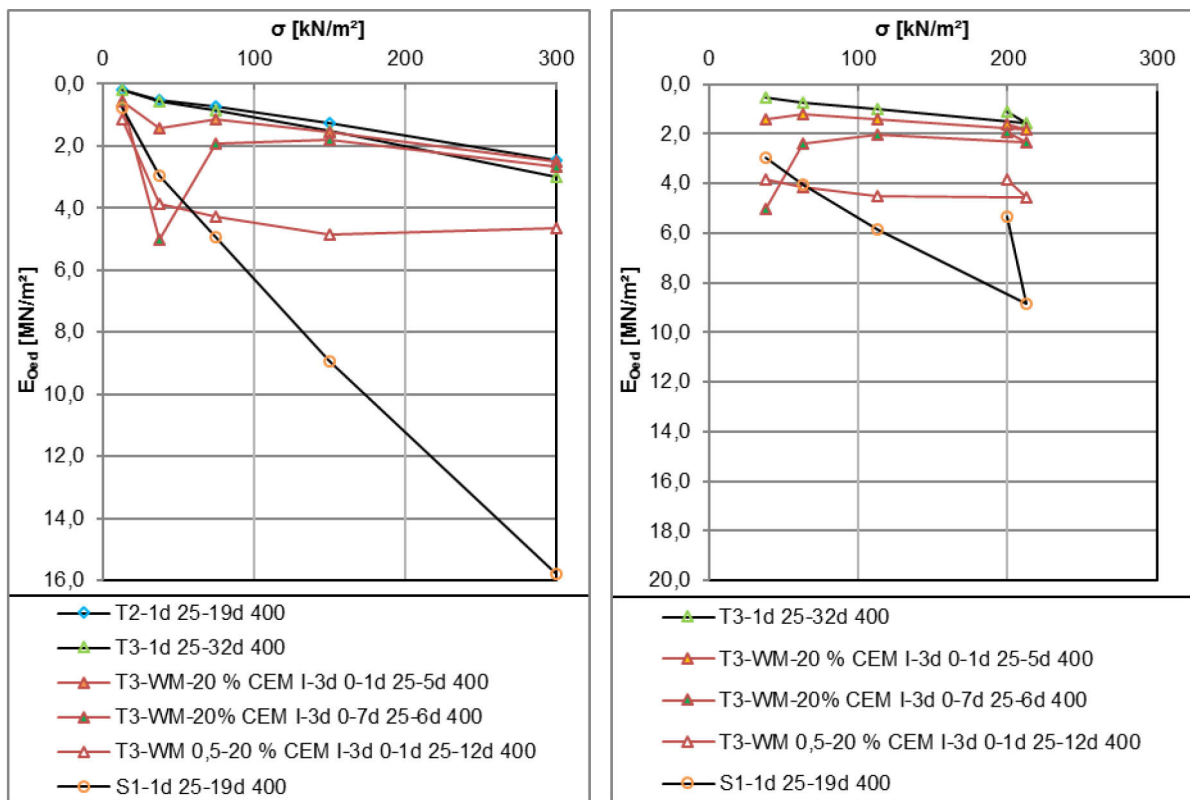


Abb. 9.33: T3-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Betrachtet man die  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien der Initialspannungsstufe zeigen diese nach der Sofortsetzung, die auch hier den Großteil der inkrementellen Setzungen dieser Laststufe ausmacht und einer anschließenden Setzung etwa zum Zeitpunkt 0,003 d, einen annähernd linearen und flach abfallenden Verlauf bis zum Ende der Beobachtung. In der nachfolgenden Laststufe  $\sigma=50,0$  kN/m<sup>2</sup> sind die inkrementellen Zeitsetzungslinien ( $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien) als konkav im Verlauf zu beschreiben. In der Laststufe  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup> zeigen sich bei den  $w/z=1,5$ -Reihen dann aber konvexe Verläufe der Linien, die sich bei der T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400- Reihe deutlich ausgeprägter darstellen und in auch den nachfolgenden Laststufen zu beobachten sind. Vergleichbar der im Nassmischverfahren hergestellten Versuchsreihen des T1 und T2 mit einem  $w/z$ -Wert von 1,5 [-] zeigen auch die  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien der WM-Reihen des T3 (T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 und T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) steiler fallende Verläufe in der Endlaststufe als die unbehandelte Versuchsreihe. Hier ist dieses Verhalten aber bereits in der Zwischenlaststufe  $\sigma =100$  kN/m<sup>2</sup> erkennbar und nimmt mit den Spannungssteigerungen deutlich zu. Die  $\log t-s'_{\text{ink}}$ -Linien der T3-WM 0,5-Reihe hingegen verlaufen folgend mit Ausnahme der Endlaststufe  $\sigma =400$  kN/m<sup>2</sup> linear fallend. In der Endlaststufe ist auch hier ein konvexer Verlauf der Linie zu beobachten (s. Abschn. A. 9.9.1.2).

### 9.9.5 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Am Versuchsboden S1, der in diesen Untersuchungsreihen als rein mineralischer Vergleichsboden diente, wurden zusätzlich auch 2 im DM-Verfahren hergestellte Versuchsreihen beprobt:

- S1-DM-5% CEM I-1d 25-19d 400 und
- S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400.

Die Versuchsreihen wurden entsprechend dem Ursprungsboden mit den niedrigsten Wasseranteilen  $w_{AE}$  im Versuchsspektrum von 16,29 bzw. 14,17 M.-% ( $w_E=19,46$  bzw. 16,51 M.-%) eingebaut. Die rel. Abweichungen zum berechneten Wasseranteil  $w_{Acal}$  betragen hier 1,94 bzw. 1,36 %. Die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$  lagen bei 0,58 bzw. 0,68 [-] ( $n_{ges(0,0)}=0,37$  bzw. 0,40), da ein „dichterer“ Einbau bei der S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400-Reihe aufgrund der hohen Zugabe von 20 M.-% CEM I nicht möglich war.

Die beiden Versuchsreihen zeigten mit der initialen Spannungsstufe bez. ink. bzw. ges. Setzungen  $s'_{ink/ges(25,0)}=0,014$  und  $0,008$  [-]. Die mit 5 M% CEM I behandelte Reihe des S1 zeigte daran folgend bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,001, 0,002, 0,002$  und  $0,003$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,0021$  [-] nach jeweils 1d und innere Oedometermodule  $E_{Oed}=1,83, 21,43, 33,33, 46,15$  und  $75,00$  MN/m<sup>2</sup>. Die S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400-Reihe zeigte auf die Anfangslaststufe folgend bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}=0,001, 0,001, 0,002$  und  $0,001$  [-] mit  $s'_{ges(400)}=0,014$  [-] nach jeweils 1d und innere Oedometermodule  $E_{Oed}=3,13, 25,00, 37,50, 42,86$  und  $171,43$  MN/m<sup>2</sup> über den Verlauf der Laststufen (s. Abb. 9.34 und Abb. 9.35).

Die Module über das Spannungsintervall  $\sigma =25,0$  bis  $400$  kN/m<sup>2</sup>  $E_{Oed(212,5)}$  betragen  $50,00$  bzw.  $64,29$  MN/m<sup>2</sup>. Über das gesamte Spannungsintervall ergeben sich  $E_{Oed(200)}$  von  $18,9$  bzw.  $28,92$  MN/m<sup>2</sup>.

Gegenüber der unbehandelten Versuchsreihe des S1 mit inneren Oedometermodulen  $E_{Oed}=2,94, 4,92, 8,96$  und  $15,79$  MN/m<sup>2</sup> bzw. äußeren/gesamten Modulen  $E_{Oed(212,5/200)}=8,8/5,36$  MN/m<sup>2</sup> zeigen sich damit klare Unterschiede, wohingegen sich die mit 20 M.-% CEM I behandelte Reihe erst deutlich mit der letzten Laststufe absetzt.

Betrachtet man die  $\log t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Versuchsreihen des mit CEM I behandelten Schluffes zeigen sich vergleichsweise sehr gering, aber über die Spannungsstufen zunehmende, fallende Verläufe der Linien (s. Abschn. A. 9.10.2).

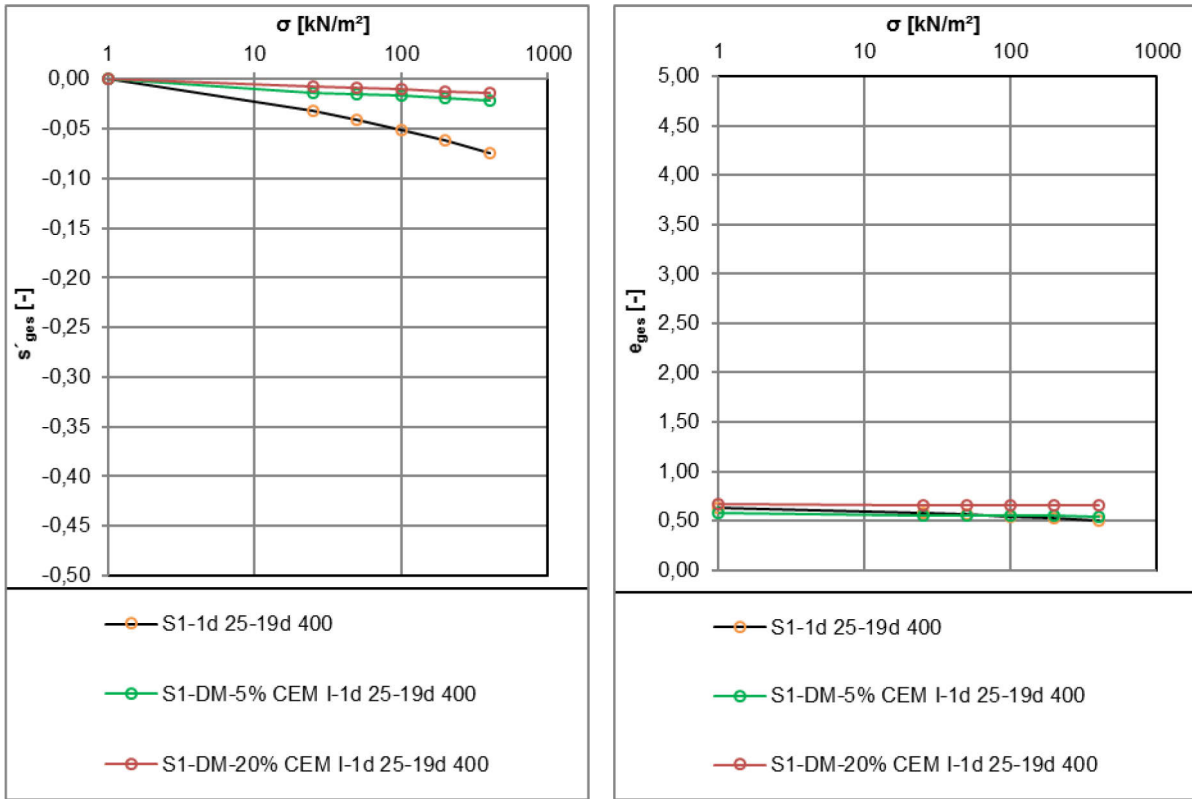


Abb. 9.34: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log \sigma$ - $s'_{\text{ges}}$ , r.:  $\log \sigma$ - $e_{\text{ges}}$ .

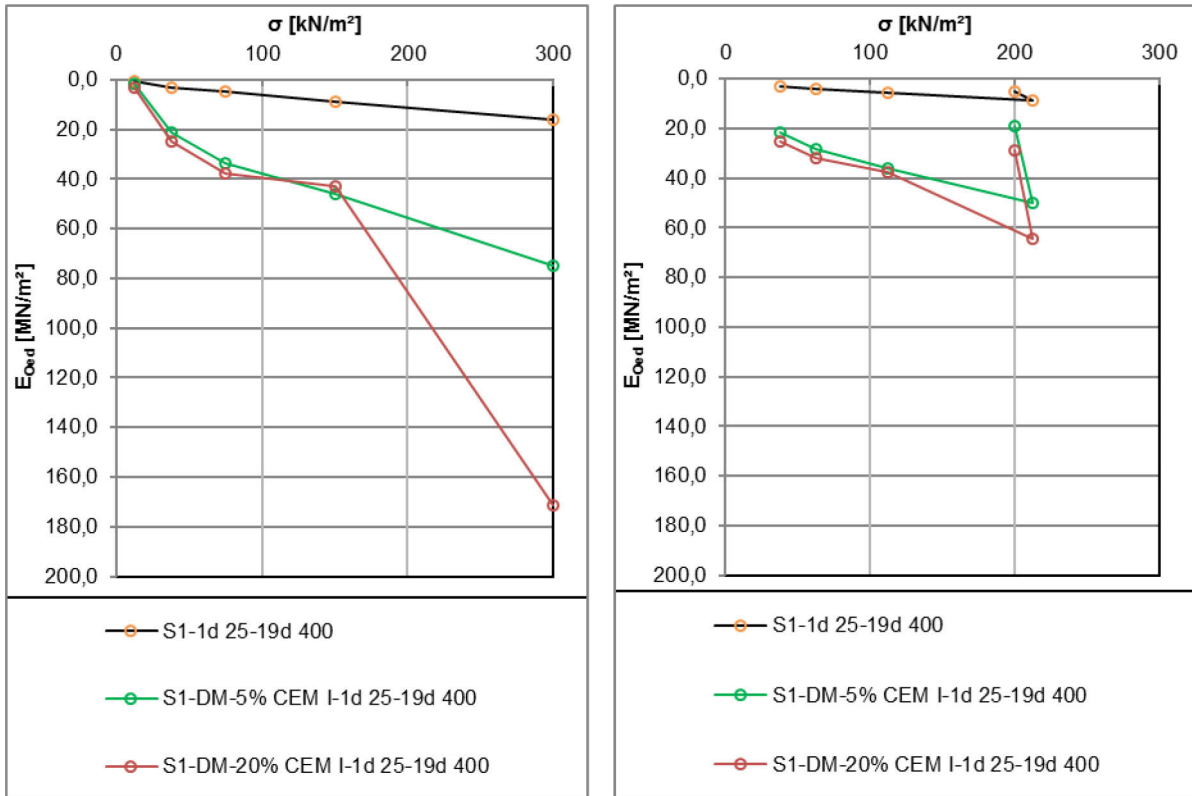


Abb. 9.35: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}$ (außen).



## 9.10 Näherung der Verformungen der Oedometerversuche

Im Anschluss an die Laborversuche wurde versucht die Verformungen der verschiedenen Versuchsreihen der Oedometerversuche mit Materialmodellen darzustellen. Die Curve Fittings der Spannungs-Setzungslinien mit dem elasto-plastische Stoffgesetz Soft-Soil <sup>11</sup> zeigten hier sehr gute Näherungen (s. Abb. 9.36 bis Abb. 9.38) des Verformungsverhaltens ( $s'_{ges}$  [-]) der Oedometerversuche der unbehandelten Versuchsböden, die in der linearen Darstellung der Spannungs-Setzungslinien ( $\sigma$ - $s'_{ges}$ ) einen konvexen rundlichen Verlauf zeigen und in der halblog. Darstellungen dieser ( $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ ) annähernd linear, zunehmend steiler fallend, mit steigendem Organikanteil, verlaufen.

Eine numerische Annäherung an das Materialverhalten der konditionierten Böden über die erfassten Spannungsstufen stellt sich jedoch als sehr schwierig dar, da diese ein sehr individuelles und komplexes Verformungsverhalten aufzeigen, welches mit derzeitigen bodenmechanischen Stoffmodellen noch nicht abbildbar ist.

Das Verhalten der mit CEM I behandelten Versuchsreihen wird besonders nach andauernder Vorbelastung (zunehmender Haltedauer der Initialspannung, vgl. Abschn. 9.11) bzw. unbelasteter Ruhezeit und steigender Bindemittelzugabe (damit steigendem Feststoffanteil) durch ein „baustoffähnliches“ Verhalten bestimmt, dass sich durch vergleichsweise sehr geringe Dehnungen und hohe Oedometermodule  $E_{Oed}$  bzw. deutliche Spannungsspitzen dieser innerhalb der auf die Ruhezeit folgenden Spannungsintervalle auszeichnet.

Daran sind in den anschließenden höheren Laststufen wiederum Übergänge in typische Kompressionsverläufe zu erkennen, die mit erheblich größeren Setzungen der stabilisierten Bodenmatrix einhergehen.

Damit lässt sich das Verhalten der mit CEM I konditionierten Versuchsreihen in Abhängigkeit von der Haltezeit der Anfangsspannung in einen pre-failure- (Phase I) und einen post-failure-Bereich (Phase II) unterteilen, wobei die Oedometerversuchsreihen keine „Brüche“ der stabilisierten Böden in Form von plötzlichen Setzungen aufzeigen (vgl. Abschn. 9.11).

---

<sup>11</sup> Plaxis 2D, Plaxis bv, Delft, Niederlande.

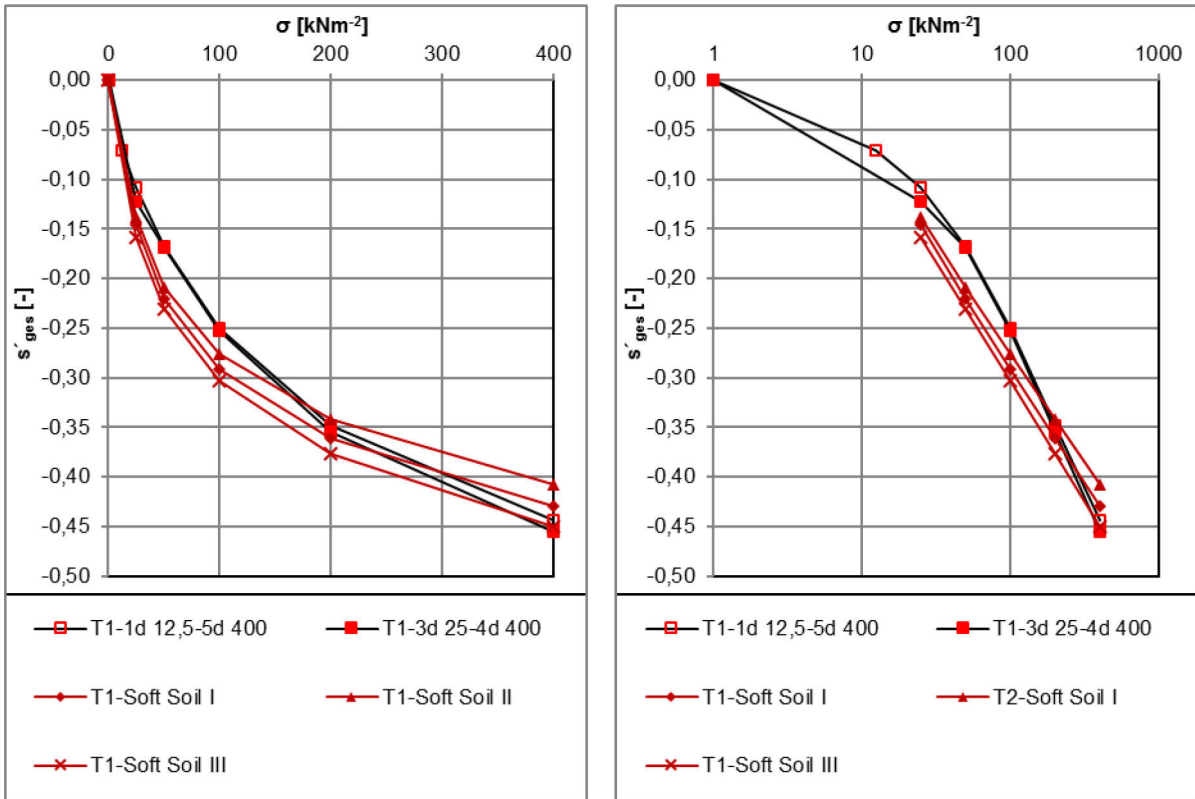


Abb. 9.36: Soft Soil Fittings T1 – l.:  $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .

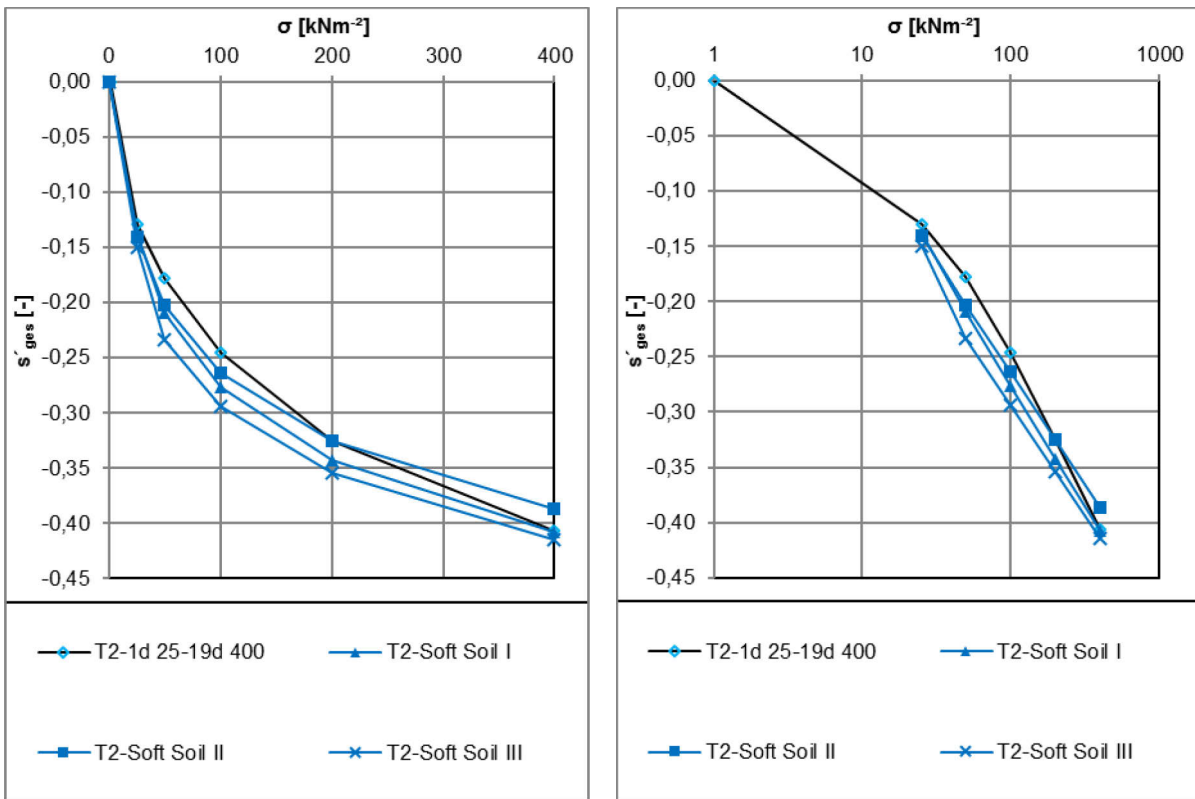


Abb. 9.37: Soft Soil Fittings T2 – l.:  $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .

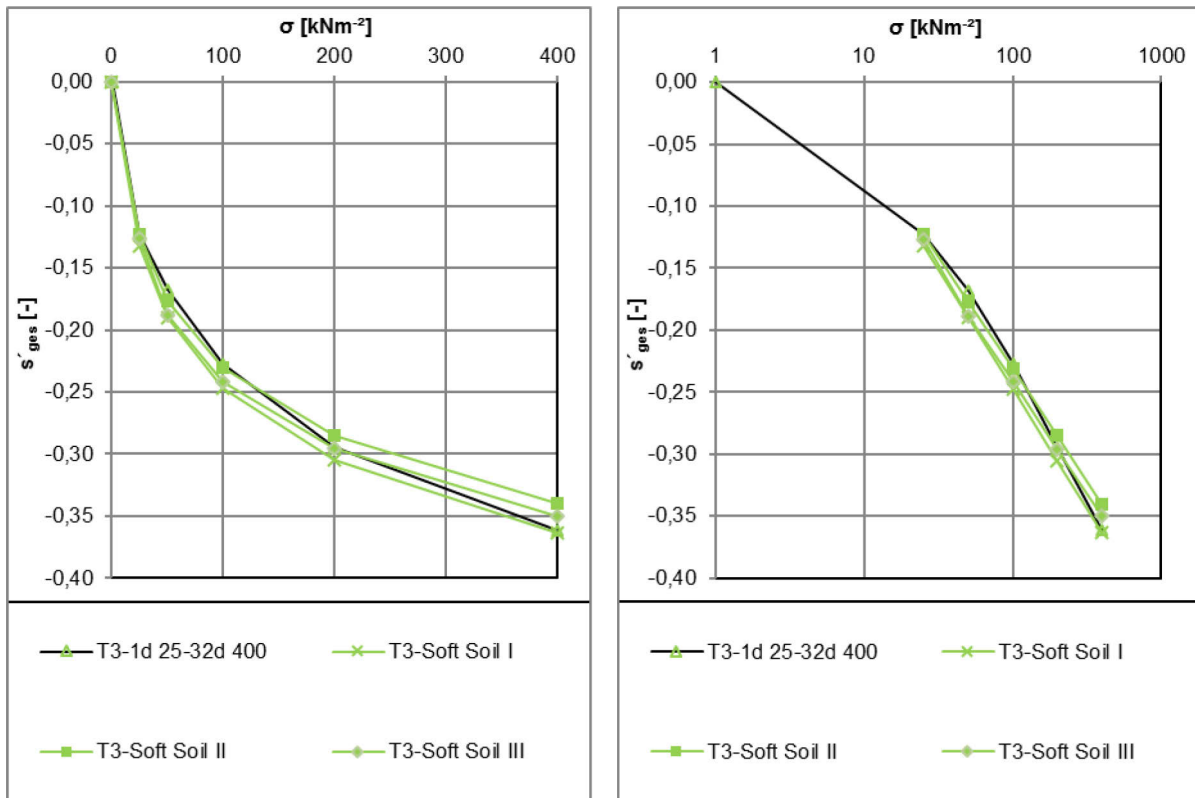


Abb. 9.38: Soft Soil Fittings T3 – I.:  $\sigma$ - $s'_{ges}$ , r.:  $\log \sigma$ - $s'_{ges}$ .

## 9.11 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Oedometerversuche

Insgesamt wurde in 67 Versuchsreihen (s. Abschn. A. 4) das Kompressionsverhalten verschiedener behandelter und unbehandelter Versuchsböden in Oedometerversuchen nach DIN EN ISO 17892-5:2017 [267] untersucht. Die Versuchsböden setzen sich aus 3 Böden mit organischen Bestandteilen in Form von 3 Torfen (Torf T1, 2 und 3) mit einer Zersetzungsstufe z 5 (sehr stark – Zersetzungsgrad nach „von Post“ (vgl. [136], [137]) im Bereich von H9 bis 10), Glühverlusten  $V_{gl}$  von etwa 17 bis 34 M.-%, natürlichen Wassergehalten  $w_n$  von etwa 100 bis 220 M.-% und einem Vergleichsboden, einem rheinischen Schluff (S1) mit einem natürlichen Wassergehalt  $w_n$  von ca. 20 M.-%, zusammen. Die Versuchsböden stammen allesamt aus Gebieten des rheinischen Braunkohlreviers und wurden dort oberflächennah aus Erkundungsschürfen entnommen. Neben den umfangreichen Oedometerversuchsreihen wurden die verschiedenen Versuchsböden in einem aufwendigen Versuchsprogramm zur Klassifizierung dieser untersucht.

Die Versuchstorfe zeigten in unbehandelter Form sehr große und für Torfe typische Kompressionen mit Gesamtverformungen  $s_{ges}$  von >35 bis 45 % in der untersuchten Endspannungsstufe  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  (s. Abb. 9.2).

Vergleicht man die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Versuchsböden (s. Tab. A. 5) ergibt sich, dass der Feststoffanteil<sup>12</sup> (mineralische und organische Anteile) bezogen auf die Feuchtmasse des unbehandelten T3 mit 50,58 M.-% knapp 60 % (rel. D.) höher ausfällt als der des T1 mit 31,42 M.-%. Der Feststoffanteil des T2 (44,41 M.-%) liegt ca. 41 % (rel. D.) über dem des T1. Betrachtet man die über den bestimmten Glühverlust  $V_{gl}$  auf die Feuchtmasse bezogenen ermittelten rein mineralischen Anteile ergibt sich, dass der T3 mit 41,75 M.-% einen um ca. 100 % (rel. D.) höheren mineralischen Anteil ausweist als der T1 mit lediglich 20,85 M.-%. Der T2 zeigt gegenüber dem T1 mit 32,98 M.-% mineralischem Anteil einen um etwa 58 % (rel. D.) höheren Anteil als der T1. Entsprechend ergeben sich bezogen auf die Feuchtmasse sehr ähnliche organische Anteile an den Versuchstorfen T1, T2 und T3 von 10,57, 11,43 und 8,83 M.-% (s. Tab. 6.7). Trotzdem ergibt sich für den T3 ein mit 49,40 M.-% um ca. 28 % (rel. D.) geringerer natürlicher Wasseranteil  $w_{An}$  als beim T1 mit 68,58 M.-%. Der natürliche Wasseranteil  $w_{An}$  des T2 liegt mit 55,56 M.-% ca. 19 % (rel. D.) unter dem des T1.

Betrachtet man die nach Trocknung bei 105 °C ermittelten Korndichten  $\rho_s$  zeigt der T3 ( $\rho_s=2,324 \text{ gcm}^{-3}$ ) einen um etwa 13,0 % (rel. D.) höheren Wert als der T1 ( $\rho_s=2,057 \text{ gcm}^{-3}$ ) und der T2 einen um etwa 4,0 % (rel. D.,  $\rho_s=2,139 \text{ gcm}^{-3}$ ) höheren Wert als der T1 (s. Tab. 6.5).

<sup>12</sup> die Werte basieren auf den mittleren gemessenen natürlichen Wasseranteilen  $w_{An}$  bzw. -gehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$

Vergleicht man die Einbauporenzahlen  $e_{ges(0,0)}$ , die sich bei den unbehandelten Versuchsreihen T1-3d 25,0-4d 400, T2-1d 25-19d 400 und T3-1d 25-32d 400 ergaben ( $e_{ges(0,0)}=4,74, 2,65$  und  $2,24$  [-]), ergeben sich bezogen auf die unbehandelte T1-Reihe rel. Differenzen von ca.  $-53,0$  (T3) und  $-44,0$  % (T2). Betrachtet man den Einbauporenraum  $n_{ges(0,0)}$  ( $n_{ges(0,0)}=0,83, 0,73$  und  $0,69$  [-]) liegen die rel. Differenzen zum T1 bei ca.  $-17$  % (T3) und  $-12$  % (T2) (s. Tab. A. 58).

Demgegenüber ergaben sich nach 1 d in der Endlaststufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup> bei den aufgeführten Versuchsreihen bez. ges. Setzungen  $s'_{ges}$  von  $0,455, 0,407$  und  $0,306$  [-]. Bezogen auf die Reihe T1-3d 25-4d 400 ergeben sich rel. Differenzen von ca.  $-11,0$  (T2) und  $-33,0$  % (T3). Betrachtet man die bez. ink. Setzungen der unbehandelten Versuchstorfe werden erst mit einem höheren Spannungsniveau ( $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup>) größere Abweichungen der gemessenen bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  untereinander sichtbar. Bezogen auf die T1-3d 25-4d 400-Reihe ergeben sich bei der T2- und T3-Reihe in den Spannungsstufen  $\sigma=25, 50, 100, 200$  und  $400$  kN/m<sup>2</sup> rel. Abweichungen der bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  von ca.  $13,0/7,0, -2,1/-4,3, -18,1/-27,7, -22,3/-35,0$  und  $-19,0/33,0$  % (s. Tab. A. 58).

Auf Grundlage der beschriebenen Werte bzw. der deutlich niedrigeren Einbauporenzahlen bzw. Einbauporenräume kann diese Entwicklung über die Versuchsverläufe nur mit den enthaltenen organischen Bestandteilen erklärt werden, die das Verformungsverhalten bei der einaxialen Kompression erheblich beeinflussen. Weiter zeigen die halblogarithmischen Zeitsetzungslinien der bez. ink. Setzungen ( $\log t-s'_{ink}$ -Linien, s. Abschn. A. 9.1.2) in Anlehnung an die Auswertemethode nach Casagrande [278], dass die unbehandelten Versuchstorfe T2 und T3 in den durchgeführten unbehandelten Reihen im beobachteten Zeitraum in allen Spannungsstufen in die Sekundärsetzung übergegangen sind, wie es die s-förmig verlaufenden Linien, die aber mit den höheren Spannungsstufen deutlich steiler und linear auslaufen, und in den Versuchsergebnissen ausgewiesen sind. Die unbehandelten T1-Reihen zeigen konträr dazu in den höheren Laststufen linear fallende  $\log t-s'_{ink}$ -Linien (s. Abschn. A. 9.1.2), was gegen einen Übergang in die Sekundärsetzung spricht. Der T1, der den höchsten organischen Anteil von ca.  $34$  M.-% ( $V_{gl}$ ) aufweist wurde am umfangreichsten untersucht. Dieser wurde als einziger Versuchsboden mit den Mischbindemitteln B500 und B300 und einem Branntkalk (BK) im Dry-Mixed-Verfahren mit Zugabemengen zu Feuchtmasse des Bodens von  $5,10$  und  $20$  M.-% behandelt und in Kompressionsversuchen mit inkrementeller Belastung und verschiedenen Initialspannungen bzw. Haltezeiten belastet. Weiter wurde der T1 mit Blähton (LP) als Zuschlag ( $10$  und  $20$  M.-%) behandelt und stufenweise komprimiert und auch nach einer Trocknung bei  $60$  bzw.  $105$  °C wieder bewässert und daran stufenweise einaxial belastet.

Daneben wurden alle Versuchstorfe mit einem Portlandzement CEM I 52,5 R im Dry-Mixed-Verfahren mit Zugabemengen zu Feuchtmasse des Bodens von  $5,10$  und  $20$  M.-% ( $\triangleq$  ca.  $10$  bis  $64$  M.-% der Trockenmasse, s. Tab. A. 5) behandelt und in Kompressionsversuchen mit verschiede-

nen Haltezeiten der Anfangsspannung untersucht. Die längste Haltezeit der Initialspannung betrug bei den behandelten Versuchsreihen des T2 und T3 insgesamt 7 d. Beim T1 wurde zusätzlich mit Zugabemengen zur Feuchtmasse des Bodens von 5 und 20 M.-% die Auswirkung der Haltezeit der Initialspannungslaststufe von 14 d untersucht.

Zudem wurden die Torfe auch im Wet-Mixed-Verfahren mit einer Zement-Zugabemenge von 20 M.-% der Feuchtmasse der Versuchsböden und einem w/z-Wert der Zementsuspension von 0,5 und 1,5 [-] behandelt und stufenweise komprimiert. Der T1 wurde zusätzlich noch mit 5 und 10 M.-% der Feuchtmasse der Versuchsböden und einem w/z-Wert der Zementsuspension von 1,5 [-] behandelt und daran ebenfalls inkrementell komprimiert.

Vergleicht man nun die unterschiedlichen Zusammensetzungen der behandelten Versuchsböden in Hinblick auf die Feststoff- und Wasseranteile ergeben sich deutliche Unterschiede. Durch eine Bindemittelzugabe bzw. durch die Untermischung eines Zuschlags ist von dadurch hervorgerufenen setzungshemmenden bzw. festigkeitsfördern Eigenschaften durch eine Verminderung des Wasseranteils(gehaltes), welcher mit einer Erhöhung des Feststoffanteils unter gleichzeitiger Minderung des Organikanteils einhergeht, auszugehen. Anzunehmen ist weiter, dass der mit dem steigenden Anteil an zugegebenen Bindemittel ebenfalls steigende rein mineralische Anteil des Bodens neben den verfestigenden Eigenschaften der Bindemittel zusätzlich setzungshemmenden Einflüsse hat.

Vergleicht man beispielsweise die Zusammensetzungen der im Dry-Mixed-Verfahren hergestellten Versuchsreihen (s. Tab. A. 5) ergibt sich für den T1 bei Zugabe von 20 M.-% Bindemittel CEM I ein auf die Feuchtmasse bezogener Feststoffanteil<sup>13</sup> – zusammengesetzt aus dem mineralischen (17,38 M.-%) und organischen Feststoffanteil (8,80 M.-%) des Bodens und dem Bindemittelanteil (16,67 M.-%) – von 42,85 M.-%. Bei den mit 20 M.-% Bindemittel CEM I behandelten T2- und T3-Versuchsreihen ergeben sich mineralische Feststoffanteile von 27,49 und 34,79 M.-%, organische Feststoffanteil von 9,53 und 7,36 M.-% des Bodens und Bindemittelanteile von je 16,67 M.-%. Damit betragen die Feststoffanteile bez. auf die Feuchtmasse 53,68 und 58,82 M.-%. Untereinander verglichen zeigen der T2 und der T3 nach einer Zugabe von 20 M.-% Bindemittel CEM I einen um ca. 58 bzw. 100 % höheren mineralischen Feststoffanteil als der T1 nach gleicher Behandlung bzw. unter Hinzurechnung des organischen Feststoffanteils (9,53 bzw. 7,36 M.-%) und des Bindemittelanteils (je 16,67 M.-%) einen um ca. 25 bzw. 37 % größeren gesamten Feststoffanteil (bez. auf die Feuchtmasse). Auf Grundlage der aufgeführten und sehr abweichenden Verteilung der Feststoffanteile, die sich auch bei den mit geringeren Zugabemengen (5 bzw. 10 M.-%) behandelten Versuchsreihen einstellten, war von deutlichen Unterschieden im Kompressionsverhalten auszugehen<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> die Werte basieren auf den mittleren gemessenen natürlichen Wasseranteilen  $w_{An}$  bzw. -gehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$

<sup>14</sup> s. auch Tab. A. 6 und Tab. A. 7 für die Bodenkennwerte der WM- bzw. WM-0,5-Versuchsreihen

Daneben war im Rahmen der Versuchsauswertung eine Ermittlung der Kompressionsbeiwert  $C_c$  der Versuchsreihen der behandelten Böden auf Grundlage der ermittelten Kurvenverläufe ( $\log t - e_{ges}$ , s. Abschn. 9.9) bis zur letzten untersuchten Spannungsstufe ( $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$ ) nicht möglich, da eine Linearisierung der sprunghaften Kurvenverläufe nicht überzeugend erschien.

Weiter wurde für die Versuchsreihen die Endspannungsstufe  $\sigma = 400 \text{ kN/m}^2$  gewählt, weil dieser Wert ein praxisbezogenes Maximum für eine auf die konditionierten Böden wirkende Überlagerungsspannung, beispielweise bei der tiefreichenden Bodenstabilisierung (MIP) und im Dammbau mit Überschüttungshöhen von ca. 20 m, darstellt, und auch den Sohlspannungsbereich von Hoch- und Ingenieurbauwerken abbildet. Es ist davon auszugehen, dass weitere Verdopplungen der Spannungsstufen ( $\sigma = 800$  bzw.  $1.600 \text{ kN/m}^2$ ) zu einem annähernd linearen Verlauf des Astes im jeweiligen  $\log \sigma - e_{ges}$  Diagramm im Bereich der Normalspannungen 200 bis  $1.600$  bzw. 400 bis  $1600 \text{ kN/m}^2$  geführt hätten. Wiederum ist hier aber die Probenhöhe der Kompressionsversuche zu berücksichtigen, die für alle Versuchsreihen 20 mm betrug und für ein höheres Spannungsniveau, besonders bei den unbehandelten Versuchsreihen mit  $s'_{ges}$  von annähernd 50 %, als nicht mehr geeignet erscheint.

Im Ergebnis zeigten alle konditionierten Versuchsreihen ein Abflachen der Verformungen in der Endspannungsstufe über den Verlauf der Zeit, welches sich mit steigendem Bindemittelanteil verstärkte. Das ermittelte Setzungsverhalten der unkonditionierten Torfe zeigt die starke Abhängigkeiten vom Wassergehalt, der wiederum durch den Anteil der enthaltenen organischen Bestandteile beeinflusst wird, und das Kompressionsverhalten maßgeblich beeinflusst.

Auffällig zeigt sich bei den Versuchsreihen der unbehandelten Torfe jedoch, dass trotz der auffallend unterschiedlichen organischen Anteile und Wassergehalte, die Setzungen (hier bez. Setzungen) erst ab einer Spannung  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$  eindeutige Abstufungen zeigen. Vermutlich sind auch für dieses bodenmechanische Verhalten die organischen Bestandteile ursächlich. Mit dem Aufbringen einer Last wird frei verfügbares nicht gebundenes Porenwasser bzw. nicht in diesen verkapseltes oder auch Lufteinschlüsse aus den Hohlräumen, augenblicklich aus den größeren Poren (Makroporen) herausgepresst, wodurch sich die Sofortsetzung ergibt.

In Abhängigkeit von der Struktur, welche die organischen Bestandteile aufweisen (Zersetzungsgrad, Verkapselungen, Größe der Poren usw.), die wiederum Abhängigkeiten untereinander aufweisen, wird weiteres Porenwasser aus dem Inneren dieser ausgepresst. Die Menge des Porenwassers, welches austreten kann, steht in Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannung bzw. von der Größe der Dränwege und der Veränderung/Beeinflussung dieser durch den Konsolidationsprozess.

Mit der Verkleinerung der Dränwege folgt anschließend die Konsolidation (Primärsetzung), die in die Sekundärsetzung mit dem Herauspressen von Wasser aus den kleineren bzw. verkapselten Porenräumen (Mikroporen) mit gleichzeitiger Umlagerung der Feststoffteile (Körner, Plättchen, Fasern) in einen als zeitlich lang andauernden bzw. unbegrenzten Prozess übergeht bzw. bei

Böden mit organischen Anteilen auch in eine erneute Konsolidation (Tertiärsetzung) übergehen kann (vgl. Abschn. 1.1).

Eine Sekundärsetzung bzw. der Beginn einer Sekundärsetzung, war bei den behandelten Versuchsreihen nicht festzustellen. Die Zeitdauer (Haltezeit) der Zwischenlaststufen ( $\sigma=25$  bzw. 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup>) von 1 d ist für das Dränverhalten der behandelten Torfböden zu kurz, um den Übergang zur Kriechsetzung, der sich in einer deutlichen Abflachung der Zeitsetzungslinie in der halblog. Darstellung dieser erkennen lässt, abzugrenzen.

Eine Erhöhung der Haltezeiten hätte die Versuchsreihen jedoch zu sehr in die Länge gezogen und war daher nicht realisierbar respektive das Hauptaugenmerk lag bei diesen Untersuchungen primär auf der Beeinflussung des Kompressionsverhaltens durch die Zugabe von Bindemitteln. Daher wurde hier bewusst in kurzer Zeit ein – für diese Böden – hohes Spannungsniveau erzeugt, um möglichst große Differenzen im Setzungsverhalten zu identifizieren.

Die Variationskoeffizienten hinsichtlich der Einbau- und Ausbauparameter und der gemessenen Setzungen (vgl. A. 5 bis A. 7) zeigen sehr einheitliche Werte und sind als repräsentativ zu beurteilen.

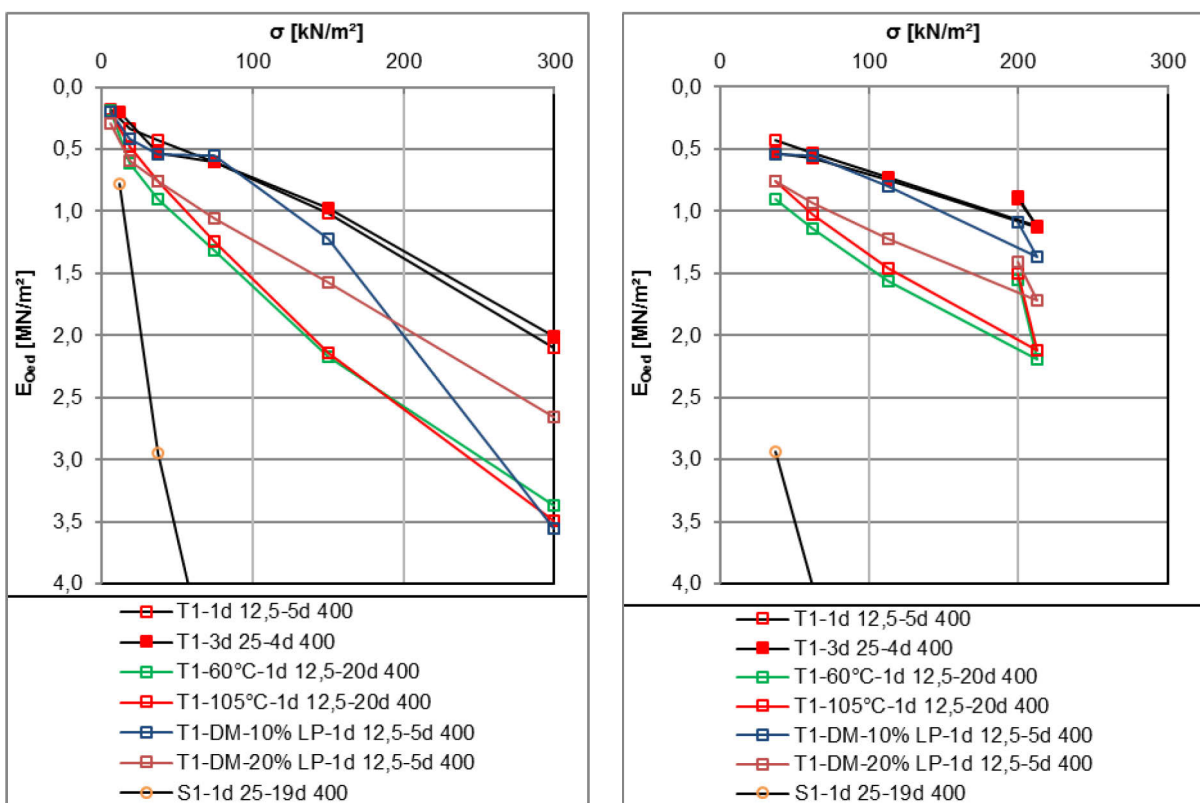


Abb. 9.39: T1-60°C- und 105°C-1d 12,5-20d 400 und T1-DM-10%-und -20% LP-1d 12,5-5d 400-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

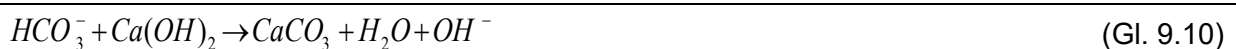


Betrachtet man die Verläufe der inneren und äußeren  $\sigma$ - $E_{\text{Oed}}$ -Linien der durch Trocknung und mit dem Zuschlag Blähton (LP) behandelten Versuchsreihen des T1 ergeben sich annähernd Parallelverschiebungen<sup>15</sup> gegenüber den Linien der unbehandelten Reihen (s. Abb. 9.39).

Diese Entwicklung ist hier wahrscheinlich auf die Verminderung des Wassergehaltes durch die Behandlungsmethoden zurückzuführen. Durch die Trocknungsbehandlung und die damit einhergehende Beeinflussung der organischen Bestandteile (vgl. Abschn. 6.3.7) – u. a. hinsichtlich des Wasseraufnahmevermögens (vgl. Abschn. 6.3.3) – haben die Versuchsreihen T1-60°C- bzw. T1-105°C -1d 12,5-5d 400 deutlich weniger Wasser bei der an die Trocknung anschließenden Wässerung des Bodens aufgenommen.

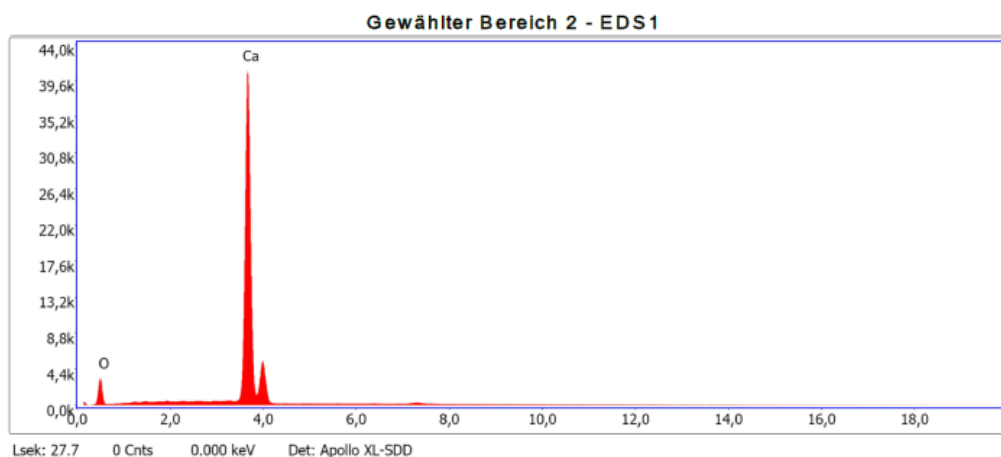
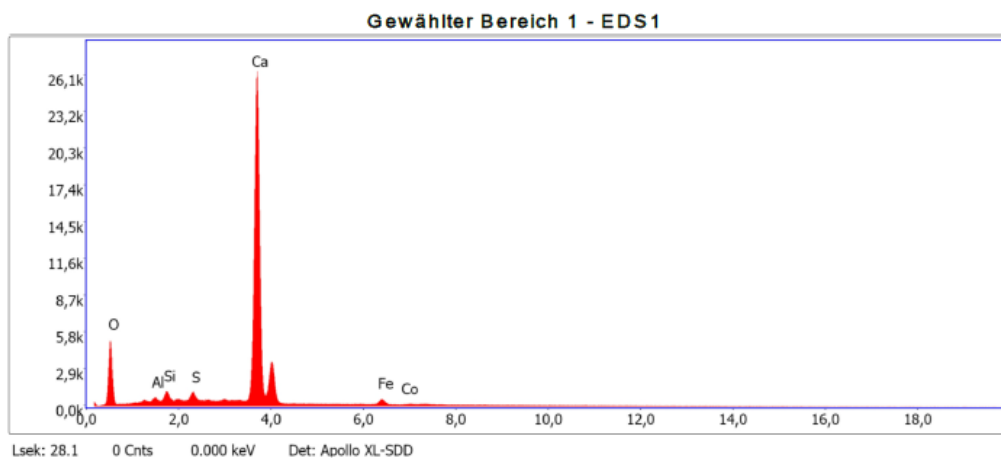
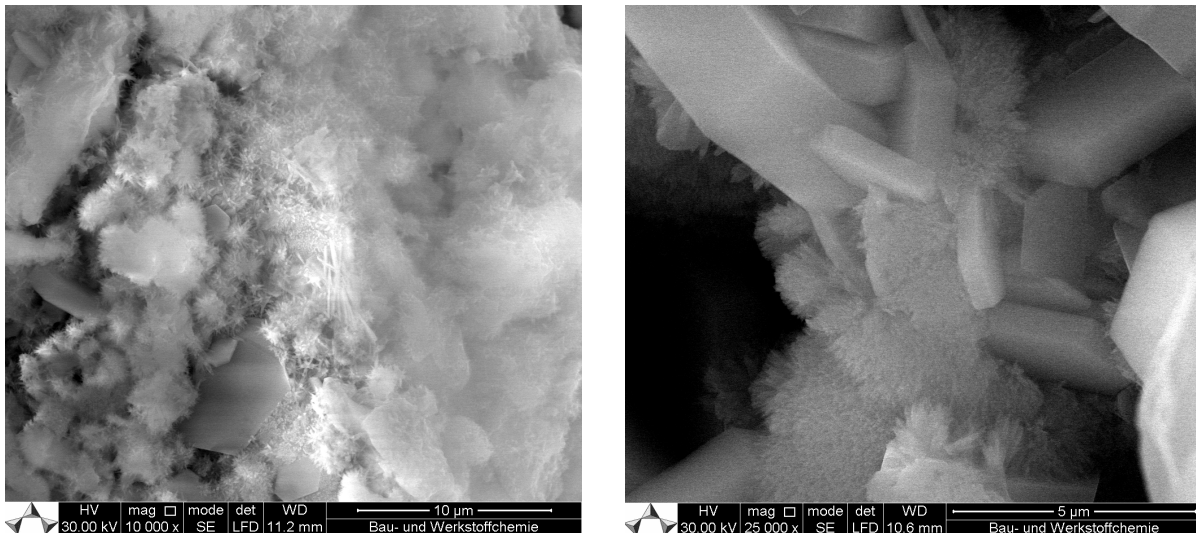
Die Einbauwasseranteile  $w_{\text{AE}}$  belaufen sich bei den bei 60 bzw. 105 °C getrockneten und dann wieder gewässerten Versuchsreihen auf 60,71 bzw. 55,71 M.-% (Einbauwassergehalt  $w_{\text{E}} = 154,51$  bzw. 125,78 M.-%) was einer Veränderung (rel. D.) gegenüber dem originären Wasseranteil von -11,77 bzw. -19,4 % entspricht (vgl. Abschn. A. 5). Bei den mit Blähton behandelten Versuchsreihen, welche im Vergleich geringere Steifigkeiten zeigten, ist von einer Verminderung des Wasseranteils durch den mineralischen Feststoffeintrag auszugehen. Weiter ist hier die spezifische Oberfläche zur zusätzlichen Bindung von Porenwasser innerhalb der „Blähtonkörner“ von Vorteil, womit sich die wissenschaftliche Motivation zu diesen Versuchsreihen ergab. Mit dem Aufbau eines tragenden Korngerüsts innerhalb der Bodenmatrix war hier aufgrund der geringen Zugabemenge nicht zu rechnen. Die Versuchsreihen des mit B 500, B300 und BK behandelten T1 zeigten nach etwa 2 h Belastung eine Abflachung bzw. Stagnation der Setzungen (10 und 20 M.-% Zugabemenge) und anschließend Hebungen, die bei den mit 20 M.-% behandelten und mit 12,5 kN/m<sup>2</sup> initial belasteten Versuchsreihen fast die gesamten eingetretenen Verformungen eliminierten (s. Abb. 9.43 und Abb. 9.44).

Zu begründen sind die Hebungen vermutlich mit einer Reaktion des zugegebenen Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mit dem im Porenwasser vorliegenden Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) zu Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) (s. (Gl. 9.10)). Dargestellt sind diese verästelten Calciumcarbonataufwüchse (vgl. [397]), die auch an mit 20 M.-% B300 bzw. B500 behandeltem T1 identifiziert wurden, in REM-Aufnahmen an mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 (s. Abb. 9.40). Am unbehandelten Torf waren diese Mineralstrukturen nicht auffindbar. Weiter zeigte die energiedispersive Röntgenspektroskopien (EDRS) quantitativ (s. Abb. 9.40) auch keine Hinweise auf Sulfate und Aluminate, die auf Ettringitaufwüchse hindeuten könnten, welche aber schon rein visuell, aufgrund ihrer markanten Mineralstruktur, und in Anbetracht der raschen Entstehung, auszuschließen waren.



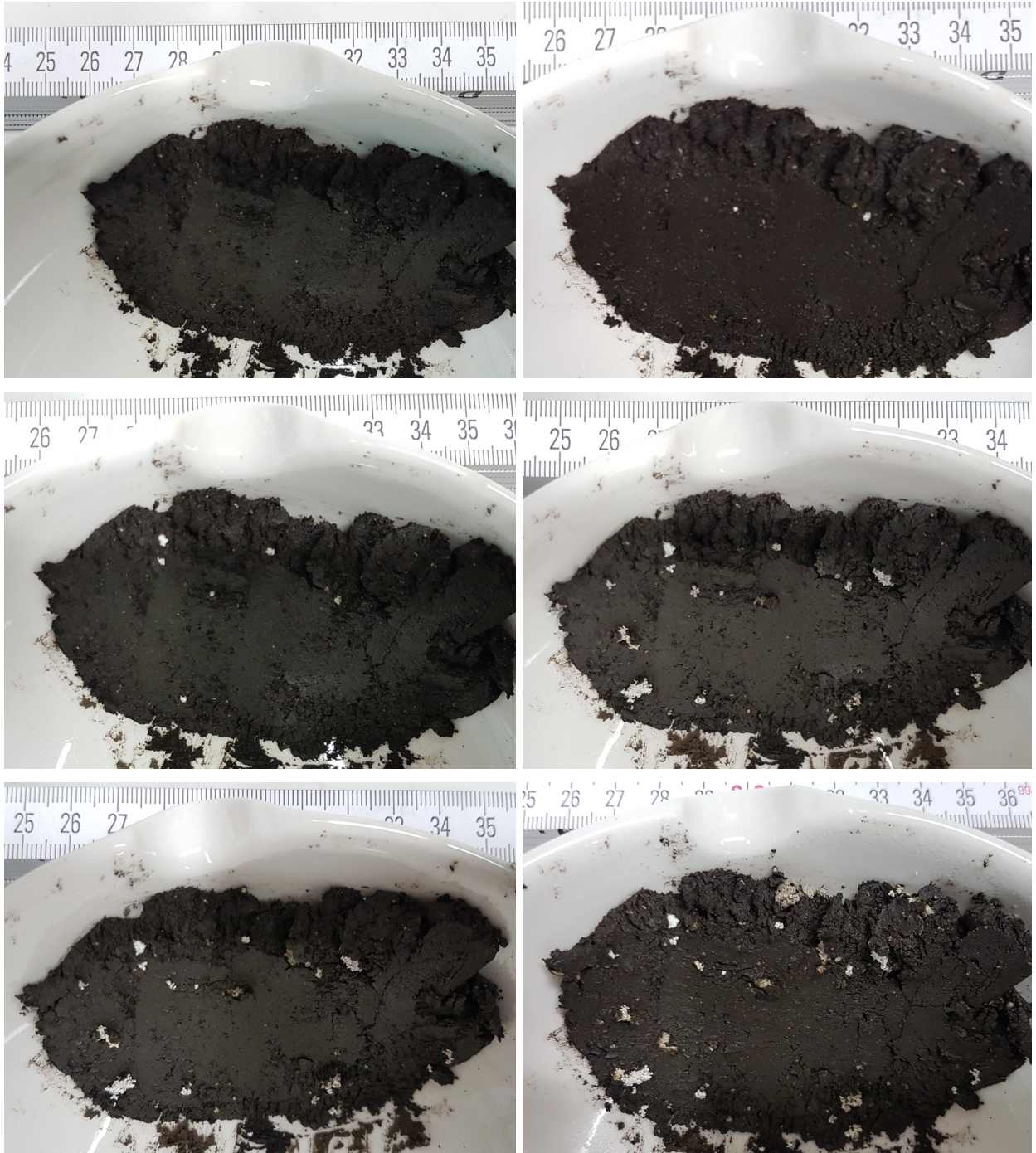
<sup>15</sup> bei den inneren Oedometermodulen ist die mit 10 M.-% LP behandelte Versuchsreihe als Ausreißer zu werten

Weiter zeigen Bilder (s. Abb. 9.41), welche ebenfalls an mit 20 M.-% behandeltem T1 aufgenommen wurden, bereits nach 2 h Ruhezeit Calciumcarbonataufwüchse („weiße Sprenkler“) an der Oberfläche, die nach 4 h Ruhezeit deutlich vermehrt auftraten. Nach 14 h Ruhezeit waren sichtbare Verästelungen bei ebenfalls zunehmendem Auftreten der Aufwüchse erkennbar bzw. zeigten diese ein Ausbrechen an der Oberfläche (s. Abb. 9.41).



**Abb. 9.40:** REM-Aufnahmen der Calciumcarbonataufwüchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 4 h Ruhezeit, EDRS-Spektren von 2 Bereichen der Calciumcarbonataufwüchse des mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 4 h Ruhezeit.

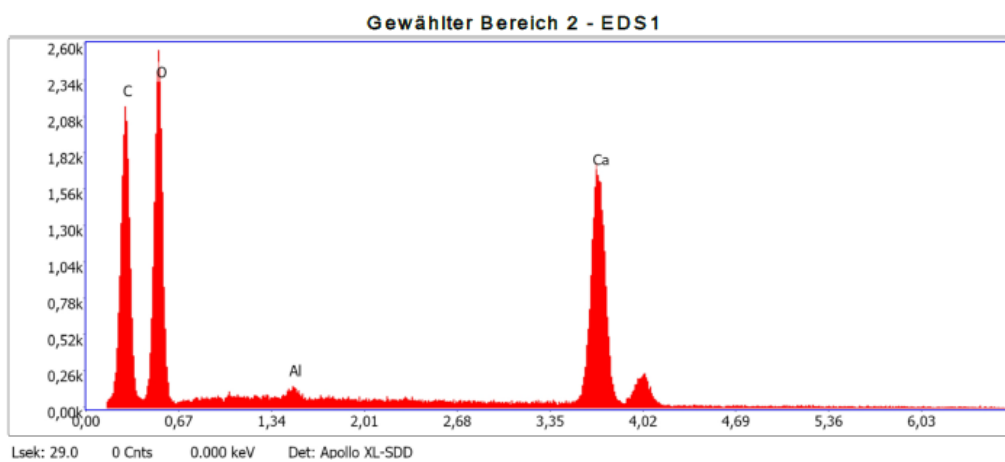
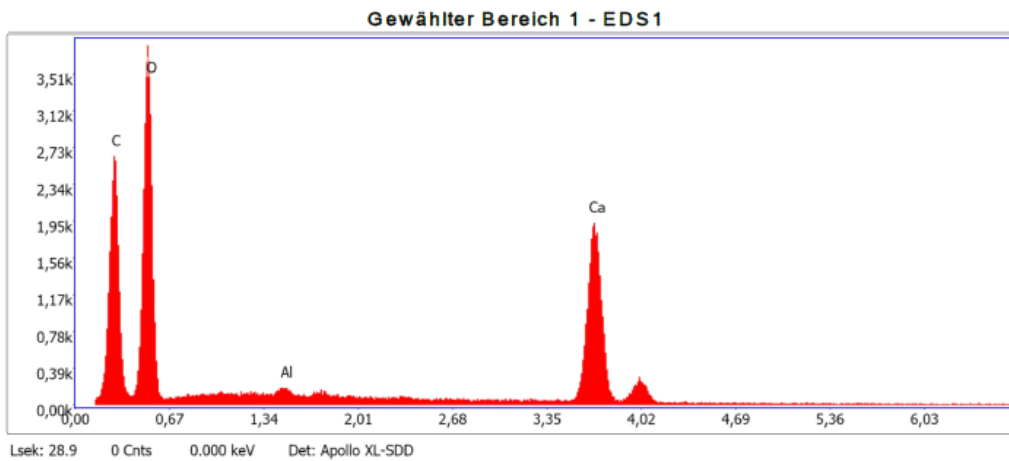
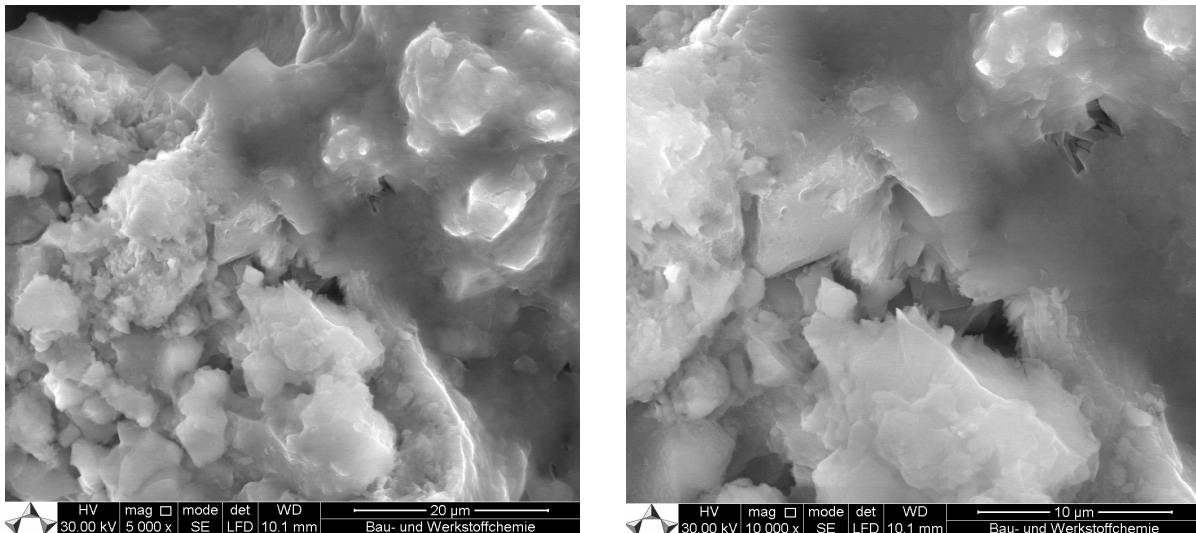
Weitere Röntgenspektroskopien (s. Abb. 9.42), die direkt an einem der Aufwüchsen nach 72 h Ruhezeit angefertigt wurden, weisen vorwiegend die Elemente Calcium (Ca), Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) aus, womit die Aufwüchse zweifelsfrei als Calciumcarbonataufwüchse zu identifizieren sind.



**Abb. 9.41:** Calciumcarbonataufwüchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 – o. l.: direkt nach Anmischung, o. r.: nach 2 h Ruhezeit, m. l.: nach 4 h Ruhezeit, m. r.: nach 14 h Ruhezeit, u. l.: nach 24 h Ruhezeit, u. r.: nach 72 h Ruhezeit.

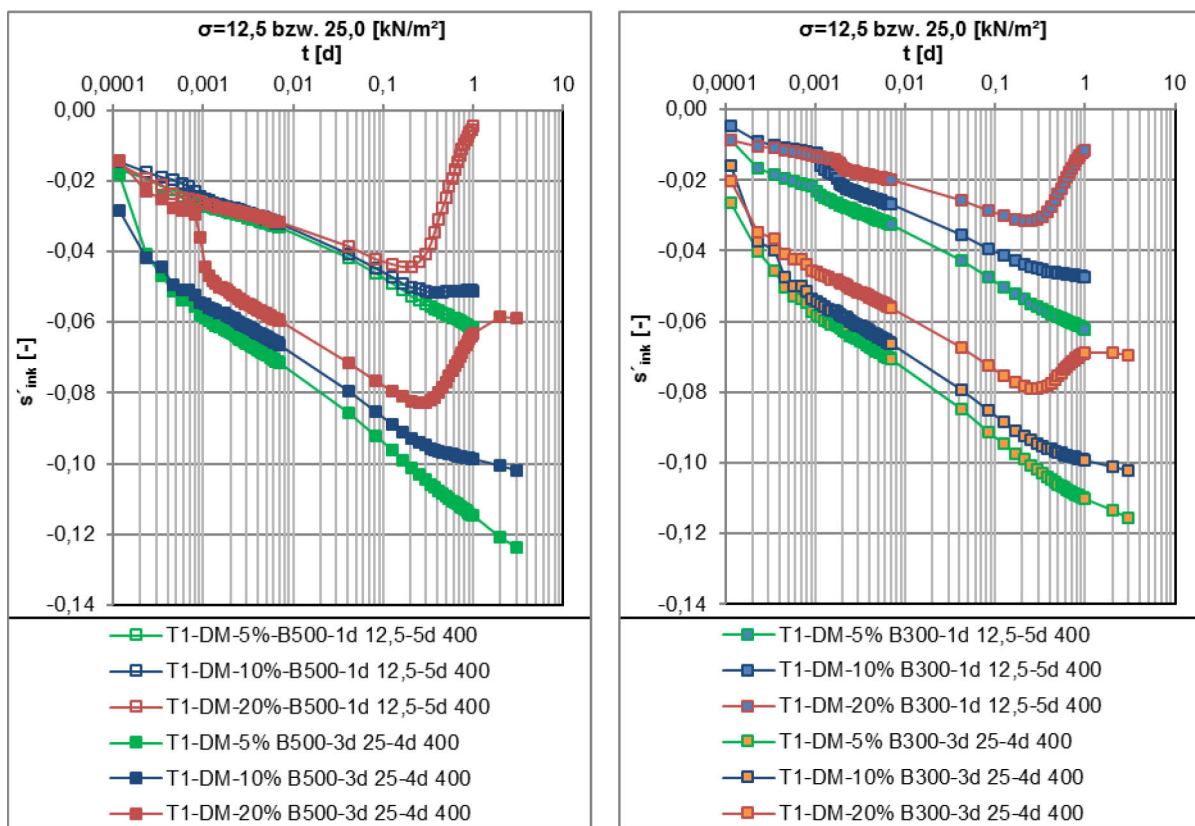


Da auch die Versuchsreihen mit der Initialspannung  $\sigma = 25,0 \text{ kN/m}^2$  deutliche Hebungen zeigten, ist daraus zu schließen, dass sich die vergleichsweise geringen bez. ges. Setzungen in der Endlaststufe der mit der Initialspannung  $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$  belasteten Versuchsreihen aus dem Ausgleich der Setzungen durch Hebungen in der Anfangslaststufe ergaben.



**Abb. 9.42:** REM-Aufnahmen der Calciumcarbonataufwüchse im mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach ca. 72 h Ruhezeit, EDRS-Spektren von 2 Bereichen der Calciumcarbonataufwüchse des mit 20 M.-% Branntkalk behandelten T1 nach 72 h Ruhezeit.

Die  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien der mit B500, B300 und BK behandelten Böden (s. Abb. 9.43 und Abb. 9.44) verdeutlichen, dass die Quelldruckspannungen infolge der Calciumcarbonataufwüchse der mit B500 bzw. B300 behandelten Versuchsreihen sich bei den mit 5 M.-% behandelten Böden (bestimmt an der Stagnation der Kompression der 1d 12,5-Versuchsreihen) mit etwa  $\sigma_{Quell}=12,5$  kN/m<sup>2</sup> beziffern lassen (s. Abb. 9.43). Die mit 10 M.-% Branntkalk behandelten Reihen hingegen zeigen im Vergleich – auch bei einer Initialspannung von  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> – noch geringfügige Hebungen (s. Abb. 9.44). Die Quelldrücke der mit 20 M.-% Mischbinder bzw. Branntkalk behandelten Böden sind, zurückzuführen auf den wahrscheinlich deutlich umfangreicheren Aufwuchs an Calciumcarbonat infolge höherer Zugabemengen des Mischbindemittels, deutlich höher mit etwa  $\sigma_{Quell} > 25,0$  kN/m<sup>2</sup> anzusetzen.



**Abb. 9.43:** l.: B500-Versuchsreihen – log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungsstufen  $\sigma=12,5$  und  $25,0$  kN/m<sup>2</sup>, r.: B 300-Versuchsreihen – log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungsstufe  $\sigma=12,5$  und  $25,0$  kN/m<sup>2</sup>.

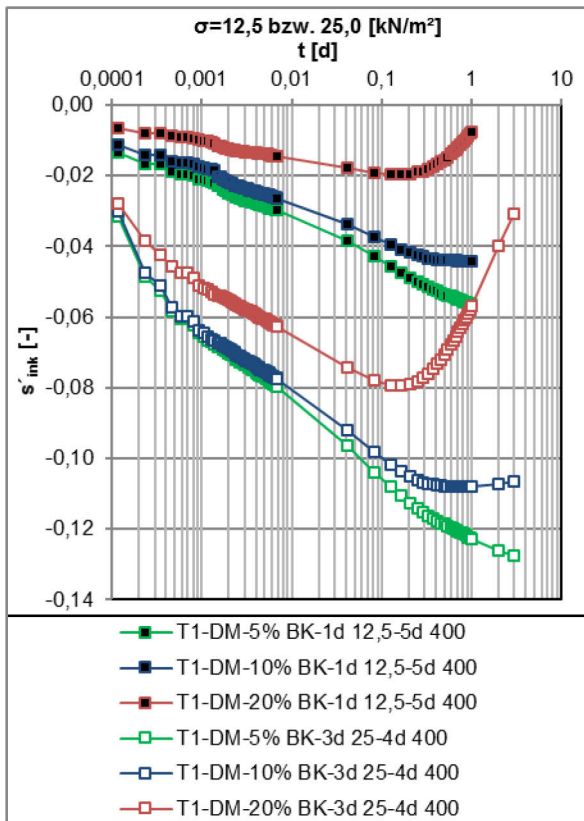


Abb. 9.44: BK-Versuchsreihen – log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien der Initialspannungstufen  $\sigma=12,5$  und  $25,0$  kN/m.<sup>2</sup>

Vergleicht man die verschiedenen Versuchsreihen des mit 5 M.-% Bindemittel (B500, B300, BK und CEM I) behandelten T1, die jeweils 1 d mit der Anfangsspannung  $\sigma=12,5$  kN/m<sup>2</sup> bzw. 3 d der Anfangsspannung  $\sigma=25,0$  kN/m<sup>2</sup> belastet wurden, anhand der inneren und äußeren Oedometermodule über die Spannungsintervalle (s. Abb. 9.45), sind bei den mit CEM I behandelten Reihen die höchsten Anfangssteifigkeiten mit deutlichen Spannungsspitzen zu erkennen. Diese zeigen sich im auf die Initialspannung folgenden Intervall ( $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5$ - $25,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(18,75)}$  bzw.  $\sigma_2$ - $\sigma_3=25,0$ - $50,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(37,5)}$ ) und treten bei den 3 d mit der Initialspannung belasteten Reihen am ausgeprägtesten auf. Die mit Mischbinder behandelten Reihen zeigen eine ähnliche Entwicklung mit geringeren Steifigkeiten. Hier ist jedoch der Einfluss der Calciumcarbonataufwüchse, der zu einer Stagnation der Verformung führten (s. Abb. 9.43, Abb. 9.44 und Abschn. A. 9.4 bis 9.6), zu beachten. Die länger initial belasteten und mit CEM I behandelten Versuchsreihen (T1-DM-5% CEM I-5d 25-9d 400 und T1-DM-CEM I-14d 25-54d 400) zeigen entsprechend der Haltedauer der Anfangsspannung wesentlich höhere  $E_{Oed}$ -Werte.

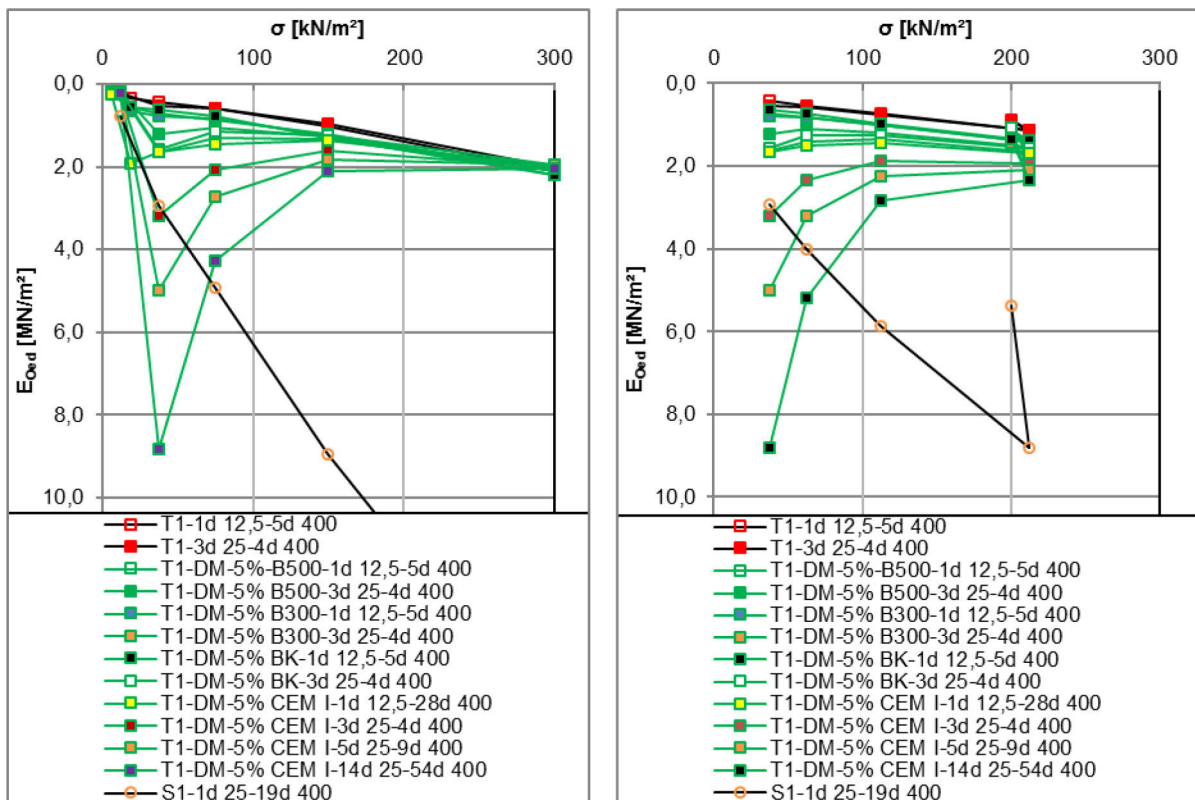


Abb. 9.45: T1-DM-5% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Vergleichbare Entwicklungen der Steifigkeiten über den Verlauf der Spannungsintervalle sind an den  $\sigma$ - $E_{Oed}$ -Linien der mit 10 und 20 M.-% B500, B300, BK und CEM I behandelten Reihen erkennbar: nach Ausbildung einer Spannungsspitze im Intervall von der Anfangslaststufe zur ersten Zwischenlaststufe fallen die mit zunehmendem Bindemittelanteil höheren Oedometermodule  $E_{Oed}$  deutlich über den Verlauf ab (s. Abb. 9.46 und Abb. 9.47). Weiter weisen die mit CEM I behandelten und 1 bzw. 3 d initial belasteten Reihen im Vergleich wesentlich höhere Steifigkeiten (3,5- bis > 5-fach höher) im Spannungsintervall  $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5$ - $25,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(18,75)}$ , als die mit Mischbinder und BK behandelten Reihen, die aber aufgrund der Calciumcarbonataufwüchse eine positive Beeinflussung der Steifigkeiten durch Hebungen zeigten (vgl. Abb. 9.48 und Abb. 9.49 – rel. D.  $E_{Oed}$  gegenüber der unbehandelten Reihe T1-1d 12,5-5d 400). Darüber hinaus zeigen die aufgeführten – mit 20 M.-% CEM I behandelten Reihen – dem Vergleichsboden S1 (Versuchsreihe S1-1d 25-19d 400) analoge bzw. höhere Steifigkeiten über die Spannungsintervalle (s. Abb. 9.47).

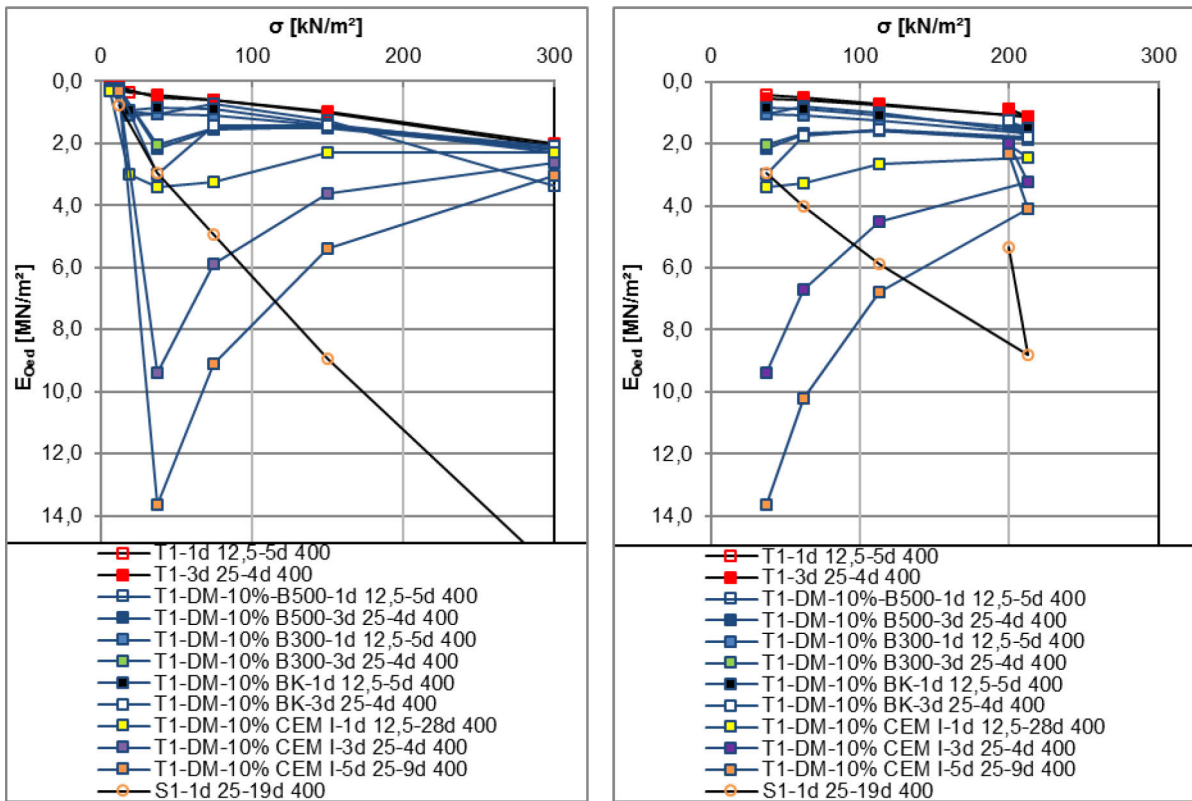


Abb. 9.46: T1-DM-10% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

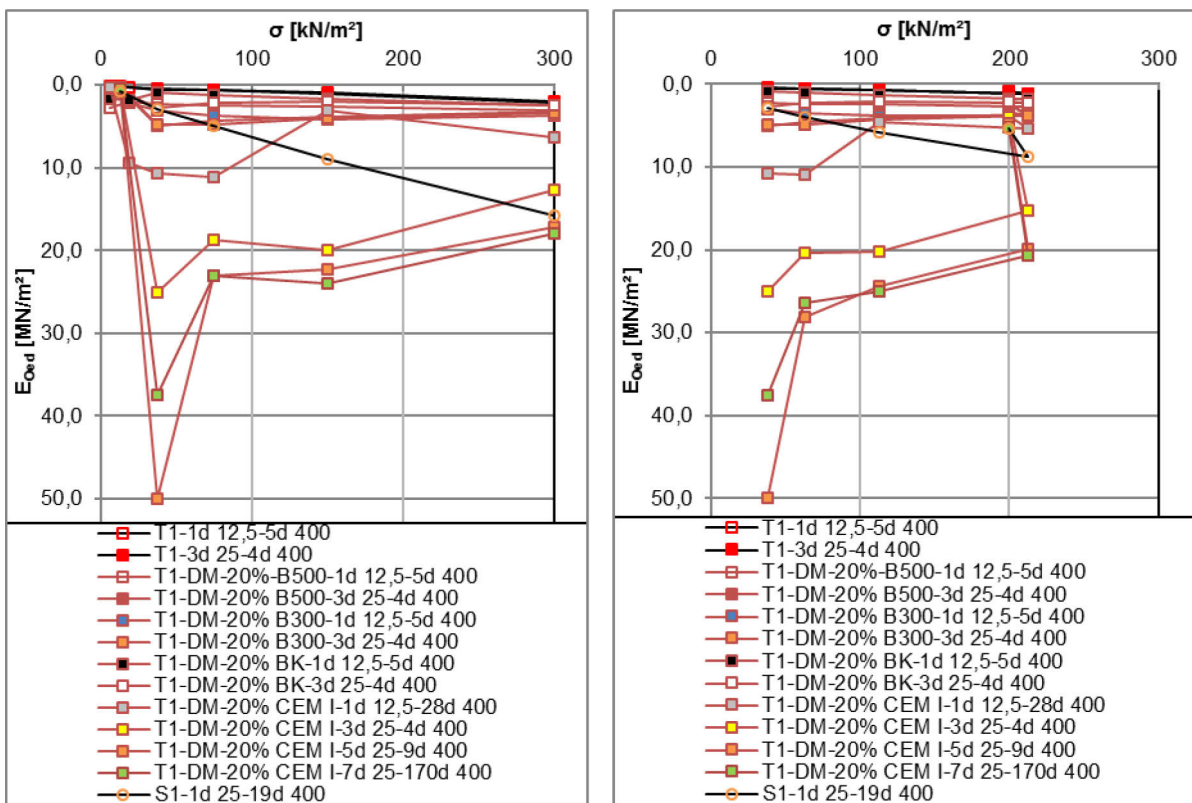


Abb. 9.47: T1-DM-20% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen)



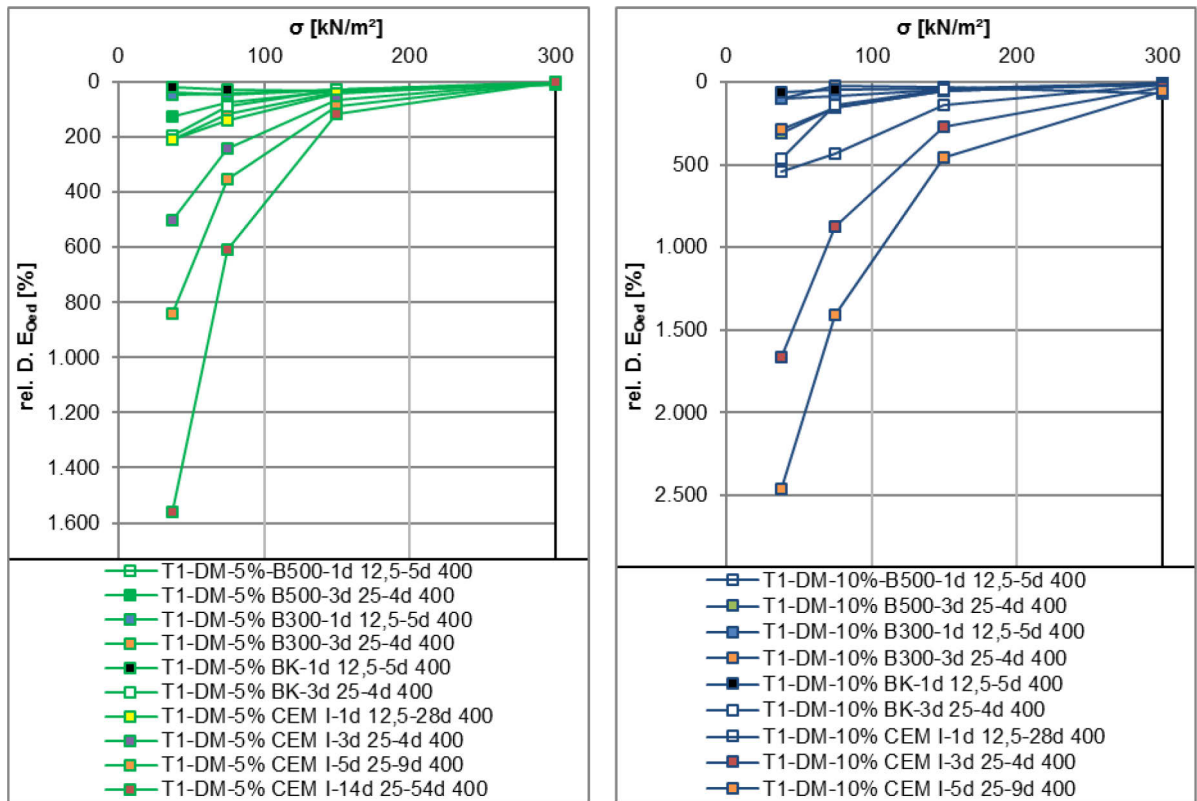


Abb. 9.48: l.: T1-DM-5% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen –  $\sigma$ -rel. D.  $E_{Oed}$ (innen), r.: T1-DM-10% B500, B300, BK u. CEM I –  $\sigma$ -rel. D.  $E_{Oed}$ (innen).

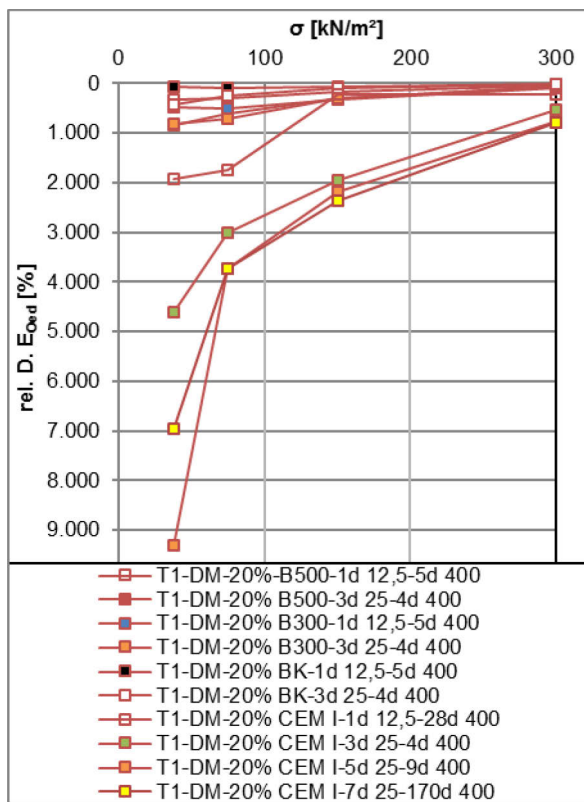


Abb. 9.49: T1-DM-20% B500, B300, BK u. CEM I-Versuchsreihen –  $\sigma$ -rel. D.  $E_{Oed}$ (innen).

Die im Nassmischverfahren mit CEM I hergestellten Probekörper zeigten infolge der höheren Wassergehalte höhere Setzungen bzw. geringere Steifigkeiten als die im Trockenmischverfahren hergestellten Probekörper der Versuchsreihen – aber bezogen auf die sehr hohen Wassergehalte (vgl. Tab. A. 6 und Tab. A. 7) vergleichsweise große Steifigkeiten. Zurückzuführen ist dies einerseits auf die vermutlich bessere Verteilung des verwendeten Bindemittels und andererseits auf die dem Zement zur Verfügung stehende Wassermenge zur hydraulischen Abbindung, die den optimalen w/z-Wert von 0,4 [-] wiederum deutlich überschreitet. Vergleicht man die im Nassmischverfahren hergestellten mit den im Trockenmischverfahren hergestellten Versuchsreihen zeigen sich deutliche Unterschiede der Steifigkeiten, die wie bereits beschrieben auf den erhöhten Wasseranteil zurückzuführen sind. Die Ausbildung von Spannungsspitzen war aber auch hier mit zunehmender Dauer der Initialspannungsstufe nach der Ruhephase (vgl. Abb. 9.52 – T1-WM-20 % CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) zu beobachten. Ein Vergleich der mit 5 M.-% CEM I im Nassmisch- und Trockenmisch-Verfahren behandelten Reihen des T1 zeigt entgegengesetzt zum hohen Wassergehalt der T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400-Reihe sehr ähnliche Steifigkeiten, mit einer deutlichen Spannungsspitze im Spannungsintervall  $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5$ -25,0 kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(18,75)}$  und teils etwas niedrigere Steifigkeiten im Vergleich zur trocken angemischten Versuchsreihe T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400 und höhere als die nur 1 d mit 12,5 kN/m<sup>2</sup> initial belastete DM-Reihe. Die nur 1 d, nach einer Ruhezeit von 2 d, initial belastete WM-Reihe T1-WM-5 % CEM I-2d 0-1d 25-4d 400, erreichte der Versuchsreihe T1-DM-5 % CEM I-1d 12,5-4d 28 d 400 ähnliche Anfangssteifigkeiten.

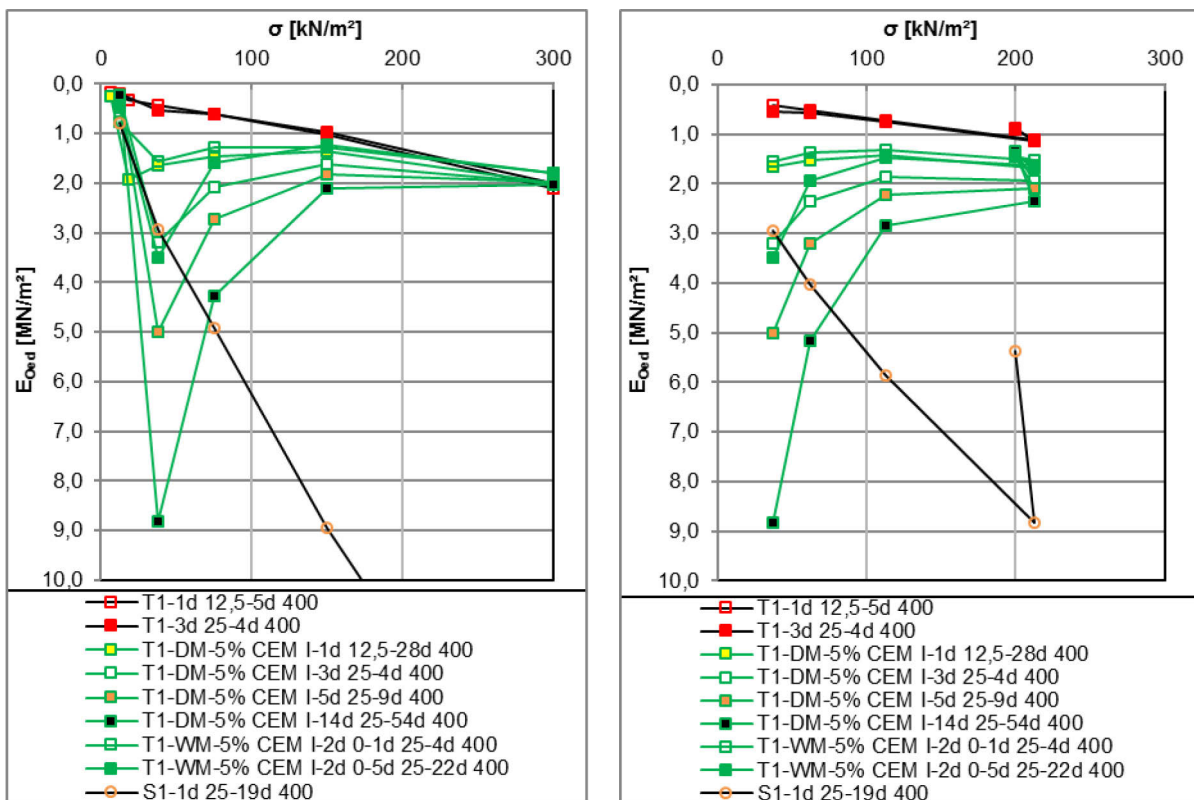


Abb. 9.50: T1-DM/WM-5% CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{innen})$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{außen})$ .

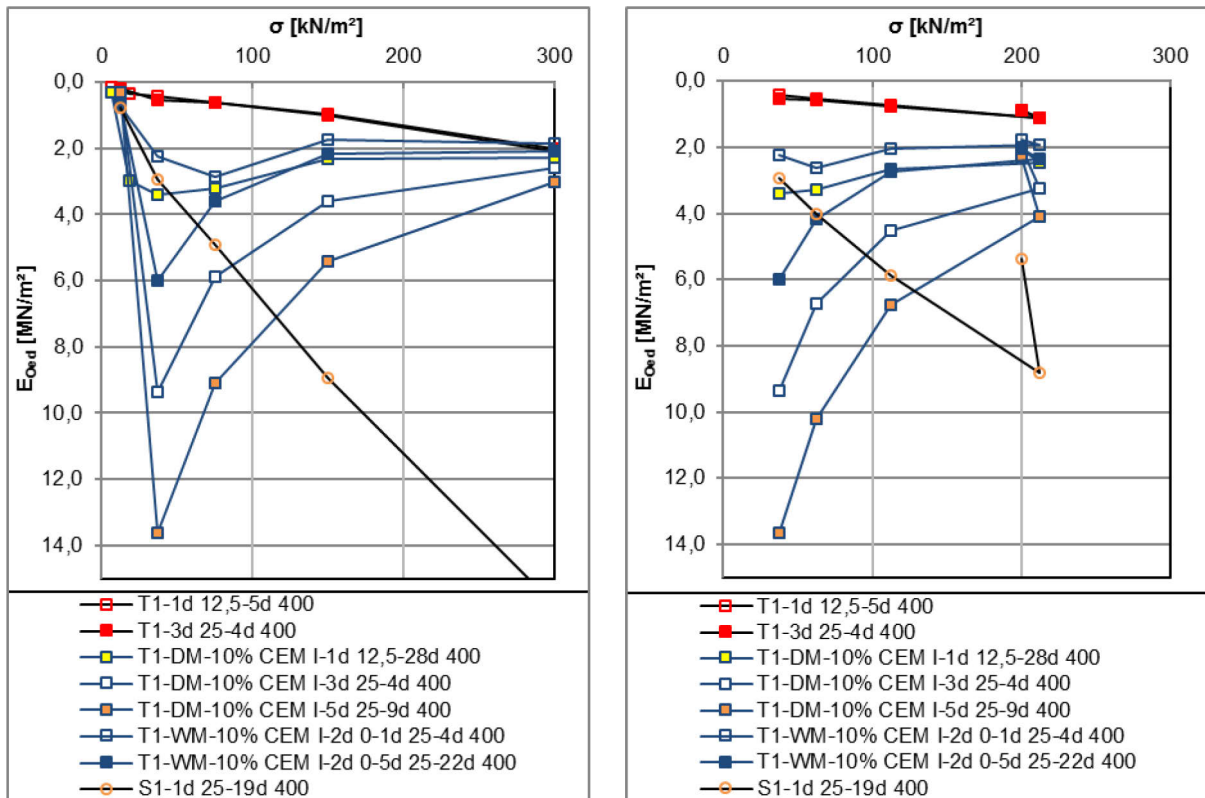


Abb. 9.51: T1-DM/WM-10 % CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

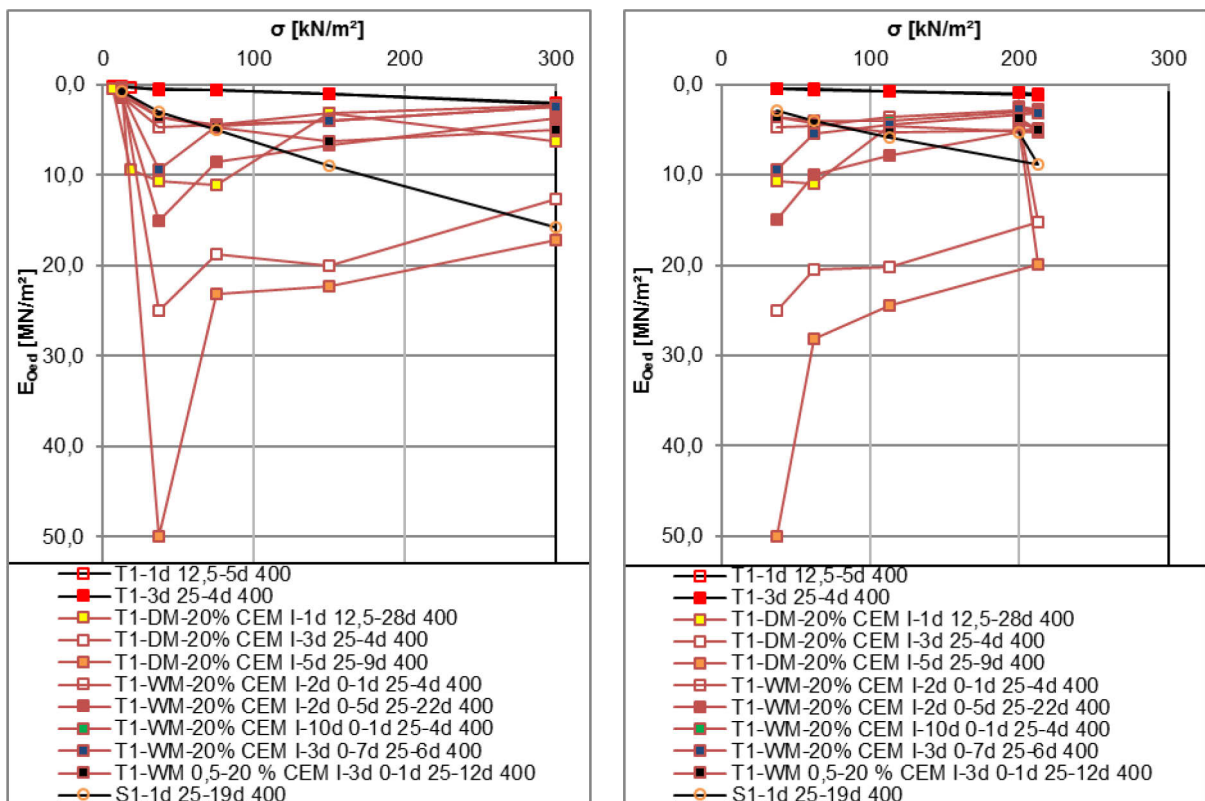


Abb. 9.52: T1-DM/WM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Nahezu korrespondierend dazu stellen sich die Oedometermodule der mit 10 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen dar. Auch hier zeigt die T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d-Reihe

höhere Steifigkeiten als die nur 1d initial belasteten WM- und DM-Reihen. Ausgeprägtere Unterschiede sind bei den DM- und WM-Reihen, die mit 20 M.-% CEM behandelt wurden erkennbar. Hier zeigen die WM-Reihen vergleichsweise sehr geringe Steifigkeiten.

Stellt man nur die im Trocken-Mischverfahren mit 20 M.-% CEM I behandelten Reihen des T1 gegenüber lässt hier der charakteristische Einfluss der Haltedauer der Initialspannung für den Versuchstorf T1 mit der Abstufung der Spannungsspitzen mit Anfangssteifigkeiten im Spannungsintervall im  $\sigma_2$ - $\sigma_3$ =25,0-50,0 kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(37,5)}$ , die bis zu > 25.000 % (T1-DM-20% CEM I-14d 25-54d 400 –  $E_{Oed(37,5)}$ =150,00 MN/m<sup>2</sup>) über den Oedometermodulen der nicht behandelten Versuchsreihe liegen (s. Abb. 9.54), erkennen. Weiter ist hier auch die Versuchsreihe T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400 aufgeführt, die 10 d vor Aufbringung der Anfangsspannung unbelastet geruht hat und vergleichbare Steifigkeiten der Reihe T1-DM-20% CEM-1d 25-28d 400 zeigt. Betrachtet man die Zeit-Setzungslinien (log t-s<sub>ink</sub>-Linien, vgl. A. 9.7.2.2) der WM-behandelten Versuchsreihen des T1 ist festzustellen, dass sich hier zu Beginn der Endlaststufe  $\sigma$ =400 kN/m<sup>2</sup> im Vergleich zu den unbehandelten Reihen des T1 deutlich größere Primärsetzungen bei fast allen Reihen zeigen (vgl. Abschn. 9.9.2.6.2). Daran gehen die Linien wieder in einen konvexen Verlauf über. Hier signalisieren lediglich die Versuchsreihen T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400 und T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400 ein wesentlich steiferes Stoffverhalten.

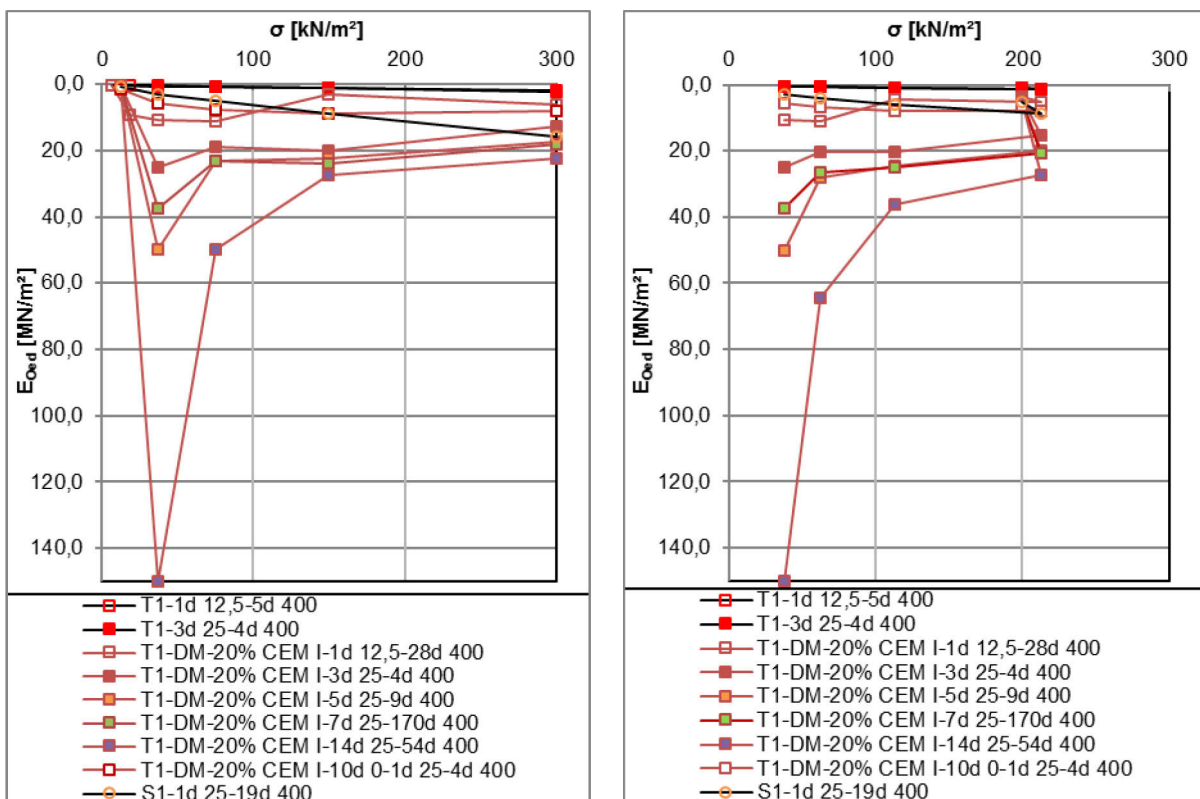


Abb. 9.53: T1-DM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

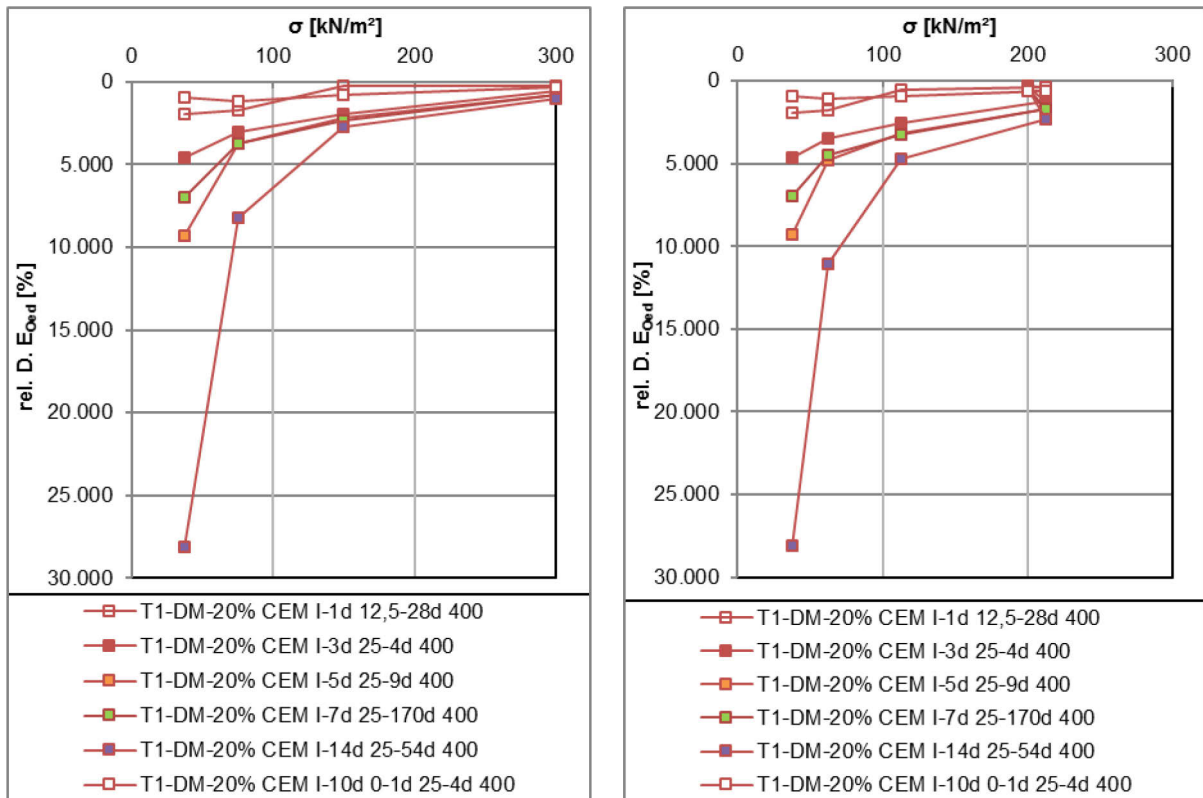


Abb. 9.54: T1-DM-20 % CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ -rel. D. E<sub>Oed</sub>(innen), r.:  $\sigma$ -rel. D. E<sub>Oed</sub>(ausßen).

Eine Gegenüberstellung der  $\sigma$ -E<sub>Oed</sub>-Linien der Versuchsreihen des T2 (s. Abb. 9.55), zeigt bei den mit CEM I behandelten Reihen, ein zu den mit CEM I behandelten Versuchsreihen des T1, abweichendes Stoffverhalten mit gleichbleibenden bzw. ansteigenden Oedometermodulen über die untersuchten Spannungsintervalle in Abhängigkeit von der Zugabemenge an Bindemittel. Zurückzuführen ist dies einerseits auf den geringeren Anteil von Bindemittel bezogen auf die Trockenmasse (s. Tab. A. 5), andererseits auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der organischen Anteile der Versuchsböden.



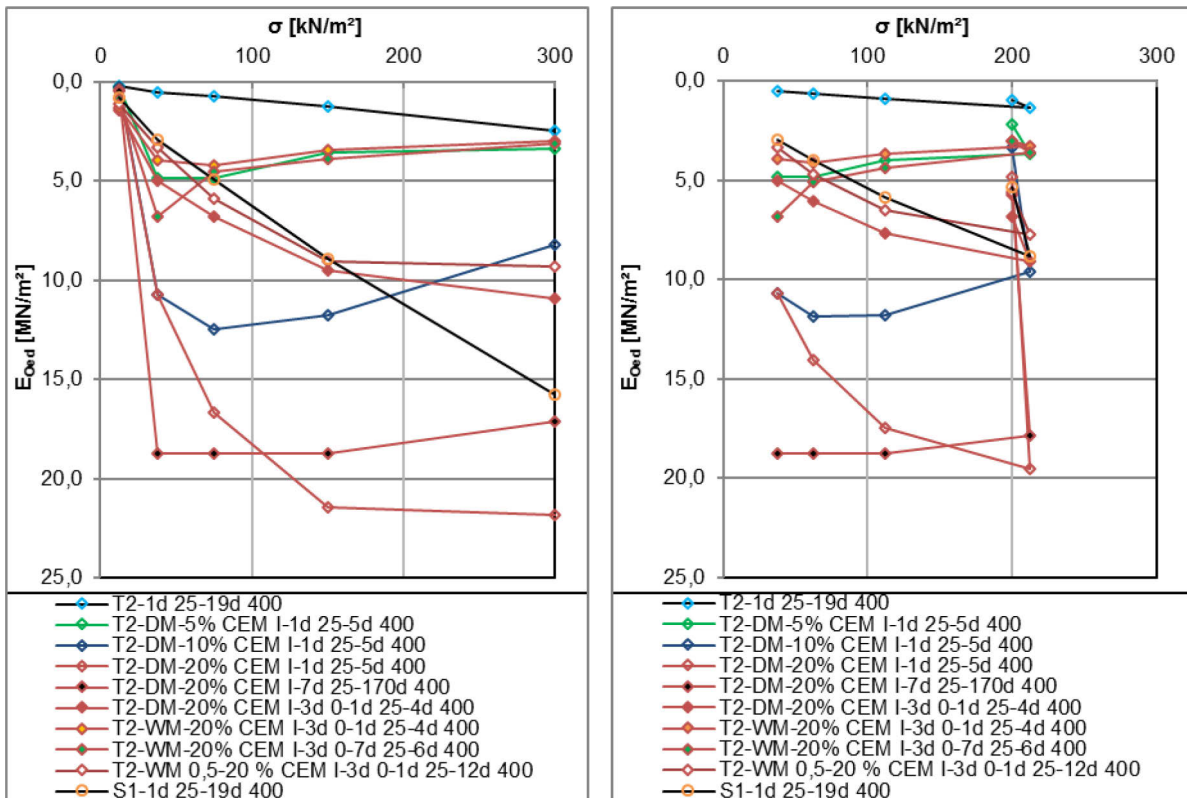


Abb. 9.55: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma-E_{Oed}(\text{innen})$ , r.:  $\sigma-E_{Oed}(\text{au\ss}en)$ .

Entsprechende Verläufe zeigen auch die  $\sigma-E_{Oed}$ -Linien der behandelten Reihen des T3 (s. Abb. 9.56), wobei hier die im Trockenmischverfahren hergestellte und am längsten initial belastete Versuchsreihe des T3 (T3-DM-20% CEM I-7d 25-170 d 400) ähnlich der vergleichbaren Versuchsreihe des T1 abnehmende Steifigkeiten nach einer sehr hohen Steifigkeit im zweiten inneren bzw. ersten äußeren Spannungsintervall  $\sigma_1-\sigma_2=12,5-25,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(18,75)}$  ausweist. Herauszustellen ist, dass sich mit einem Anteil von 20 M.-% CEM I der Feuchtmasse und einer kurzen Haltedauer der Initialspannung von nur 1 d korrespondierende oder höhere Steifigkeiten im Vergleich zur Versuchsreihe des weichen Schluffs erzielen ließen. Beim T2 sind diese Oedometermodule zudem bei der im Nassmischverfahren hergestellten Versuchsreihe mit einem w/z-Wert von 0,5 [-] erkennbar (s. Abb. 9.55). Den behandelten Versuchsreihen des T1 vergleichbare erzielbare Veränderungen der Steifigkeiten  $E_{Oed}$  gegenüber dem unbehandelten Ausgangsboden waren mit den gewählten Zugabemengen bei den behandelten Versuchsreihen des T2 und T3 jedoch nicht feststellbar (vgl. Abb. 9.54 und Abb. 9.57).

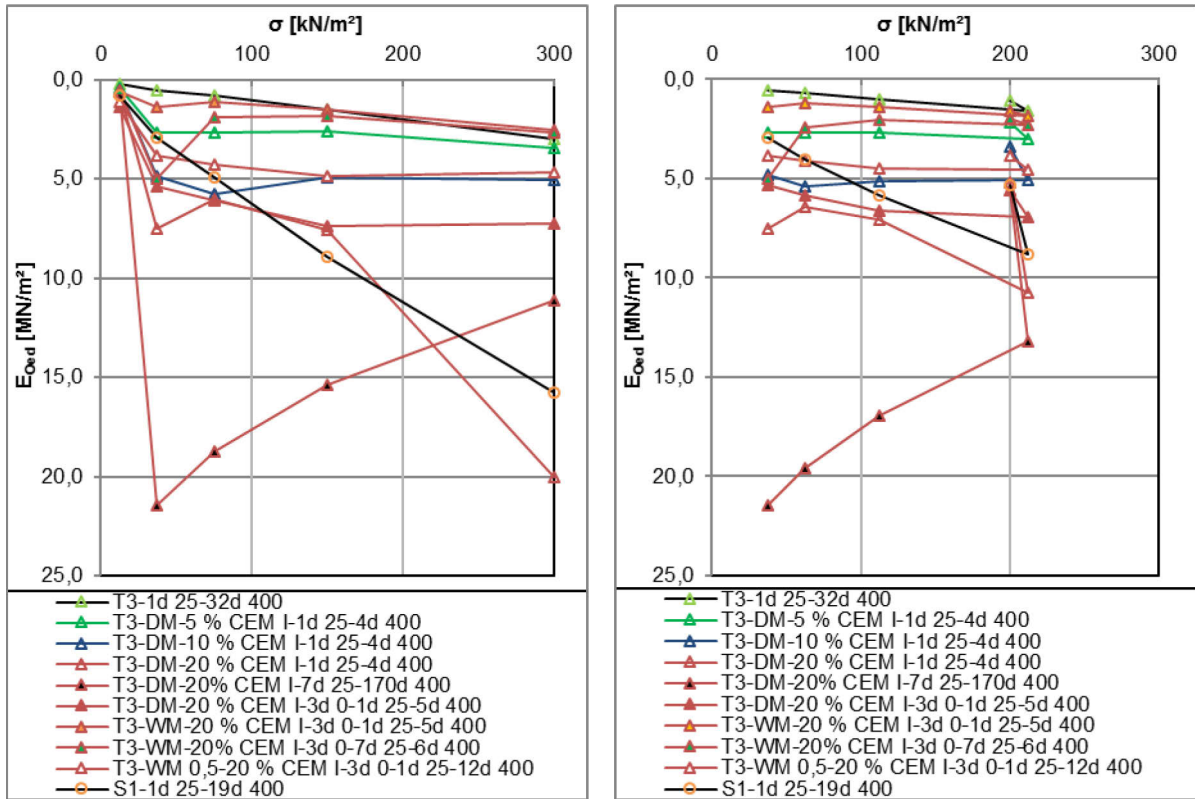


Abb. 9.56: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{oed}(\text{innen})$ , r.:  $\sigma$ - $E_{oed}(\text{au\ss}en)$ .

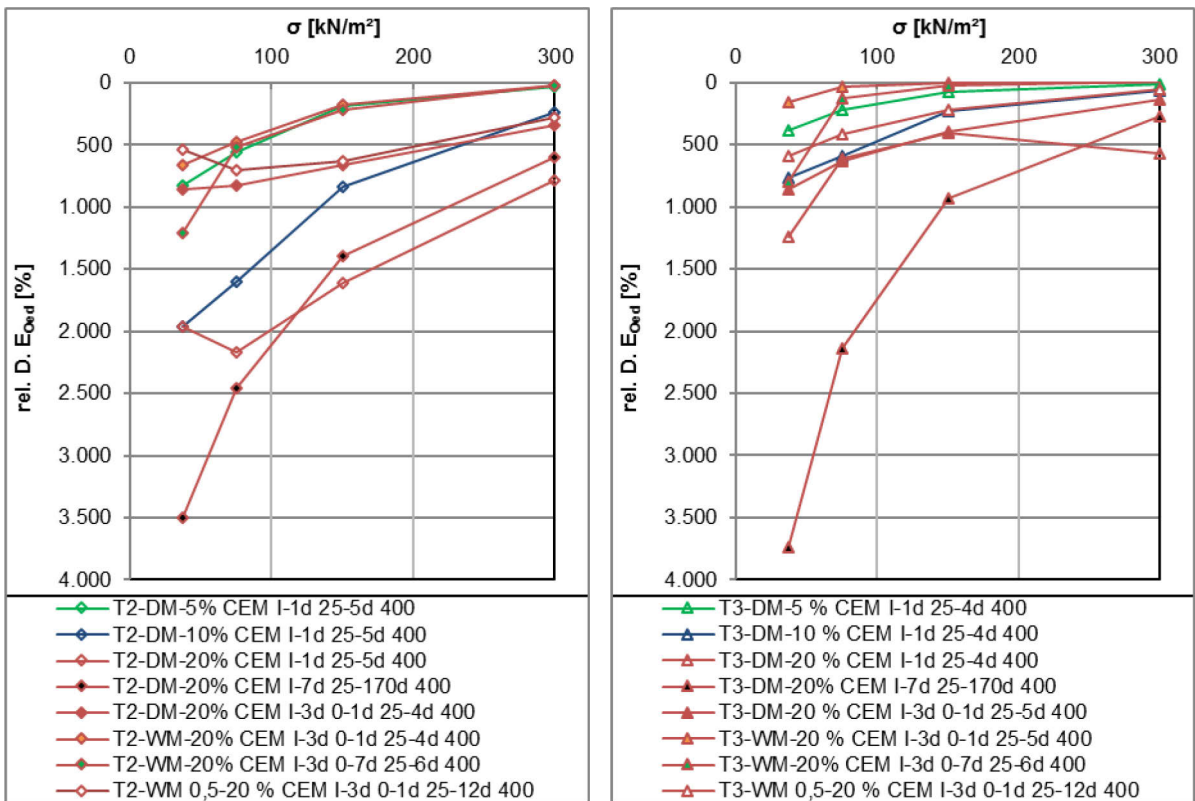


Abb. 9.57: l.: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – rel. D.  $E_{oed}(\text{innen})$ , r.: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – rel. D.  $E_{oed}(\text{innen})$ .

Die Zeit-Setzungslinien-Darstellungen der WM-behandelten Versuchsreihen des T2 und T3 (log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien, vgl. A. 9.8.1.2 und 9.9.1.2) zeigen, dass die  $w/z=1,5$ -Reihen des T2 (T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 und T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) bereits zu Beginn der letzten Zwischenlaststufe  $\sigma=200$  kN/m<sup>2</sup> deutlich steiler fallende log  $t$ - $s'_{ink}$ -Linien ausweisen als die unbehandelte Versuchsreihe des T2 (vgl. Abschn. 9.9.3.2). Bei den  $w/z=1,5$ -Reihen des T3 (T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 und T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400) ist dieses Verhalten bereits in der Zwischenlaststufe  $\sigma =100$  kN/m<sup>2</sup> erkennbar und nimmt mit den Spannungssteigerungen der folgenden Zwischenlaststufe und der Endlaststufe deutlich zu (vgl. Abschn. 9.9.4.2). Die  $w/z=1,5$ -Reihen des T1, auch die mit 5 M.-% CEM I behandelten Reihen, zeigen dieses Verhalten erst in der Endlaststufe  $\sigma=400$  kN/m<sup>2</sup>.

Betrachtet man die mit 5 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen der verschiedenen Torfe, die jeweils über 1 d mit der Initialspannung belastet wurden, ergeben sich mit den bestimmten bodenmechanischen (Einbau)Parametern (vgl. Tab. A. 5, Abschn. A. 5, A. 6, A. 7 und A. 8) nicht korrespondierende Werte der Oedometermodule. Die T2-DM-5% CEM I-1d 25-4d 400-Reihe, die u. a. einen höheren Einbauwassergehalt und Glühverlust, einen geringeren Bindemittelanteil bzw. Feststoffanteil bez. auf die Trockenmasse bzw. Feuchtmasse und eine höhere Einbauporenzahl ausweist, zeigt über den Verlauf der inneren und äußeren Spannungsintervalle die höchsten Werte. Lediglich im letzten Intervall  $\sigma_5$ - $\sigma_6=200,0$ - $400,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(300)}$  weist die T3-DM-5% CEM I-1d 25-4d 400-Reihe analoge Steifigkeiten aus (s. Abb. 9.58). Über das gesamte Spannungsintervall zeigt die behandelte T2-Reihe zwar der T3-Reihe ähnliche Module, hebt sich aber über den Verlauf der äußeren Steifemodule klar von dieser ab.

Die T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400-Reihe zeigt insgesamt die kleinsten inneren Oedometermodule. Die über einen längeren Zeitraum initial belastete Reihe T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400 zeigt zwar eine Spannungsspitze über den Verlauf der inneren Steifmodule im Spannungsbereich zwischen der Initialspannungsstufe und der ersten Zwischenlaststufe ( $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5$ - $25,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed(18,75)}$ ), die höhere Steifigkeit als die mit 5 M.-% behandelte T2-Reihe ausweist, flacht dann aber ab.



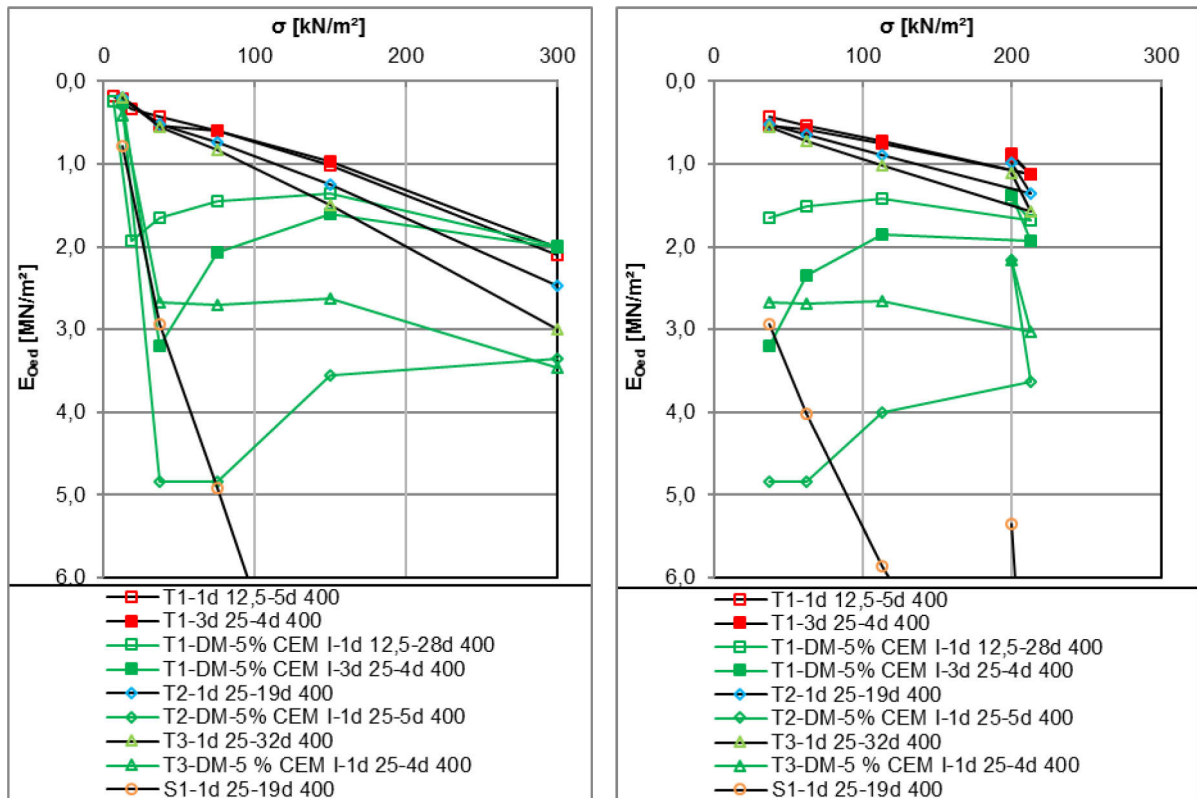


Abb. 9.58: T1, T2 u. T3-DM-5% CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

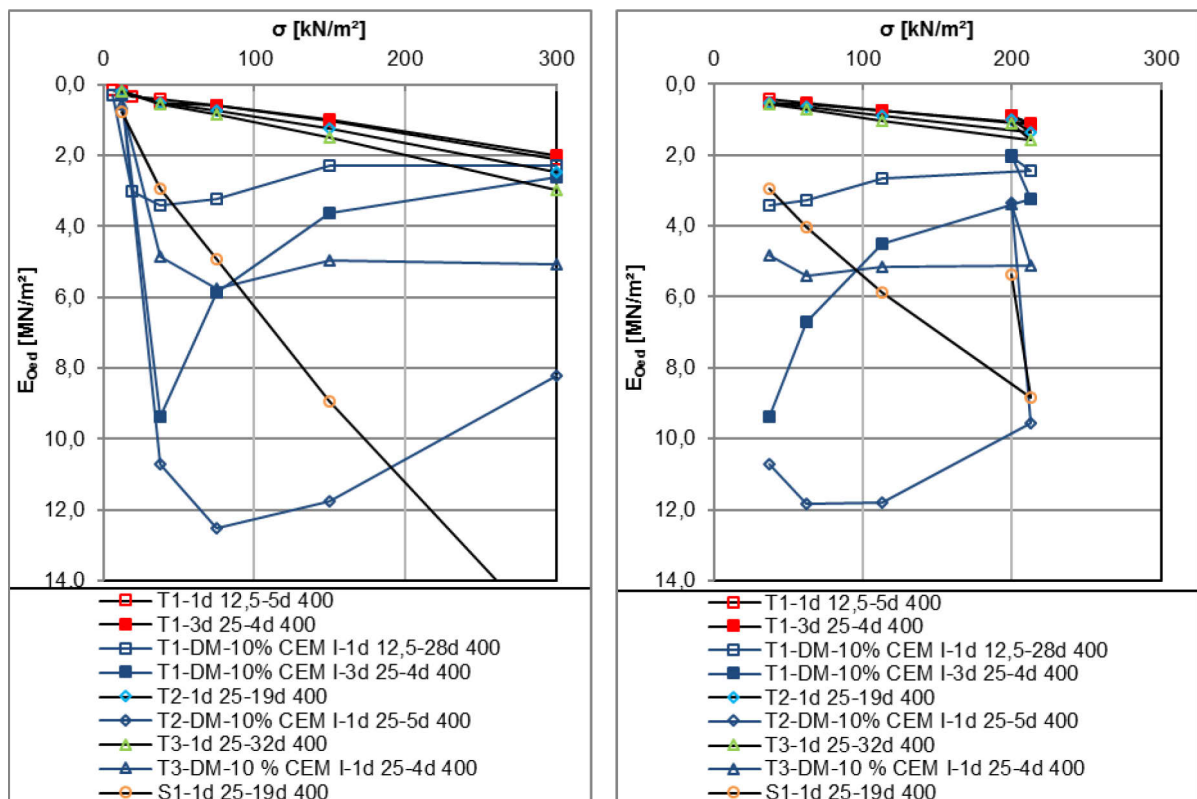


Abb. 9.59: T1, T2 u. T3-DM-10% CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Betrachtet man nun die mit 10 M.-% behandelten Versuchsreihen ergibt sich eine vergleichbare Entwicklung der Steifemodule. Hier zeigt die T2-DM-10% CEM I-1d 25-4d 400-Reihe über den

gesamten Verlauf höher liegende Oedometermodule als die behandelten Torfe T3 und T1 (s. Abb. 9.59).

Eine Gegenüberstellung der Oedometermodule der mit 20 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen ist in Abb. 9.60 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400-Reihe bis zum Spannungsintervall 100 bis 200 kN/m<sup>2</sup> höhere E<sub>Oed</sub>-Werte aufzeigt als die T3-DM-20% CEM I-1d 25-4d 400-Reihe und dann deutlich an Steifigkeit verliert, wohingegen die T3-Reihe anschließend größere E<sub>Oed</sub>-Werte aufzeigt. Divergent dazu verhält sich die T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400-Reihe, die über die inneren und äußeren Spannungsintervalle konstant ansteigt und damit der T3-DM-20% CEM I-1d 25-4d 400-Reihe vergleichbare bzw. deutlich höhere Steifigkeiten aufzeigt. Vergleichbare Entwicklungen zeigen auch die 7 d initial belasteten Versuchsreihen des mit 20 M.-% CEM I behandelten T2 und T3, wohingegen die Versuchsreihe T1-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 im Vergleich eine deutliche Spannungsspitze im Intervall  $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5-25,0$  kN/m<sup>2</sup> – E<sub>Oed(18,75)</sub> ausweist und dann auf den E<sub>Oed</sub>-Werte der T2-Reihe abfällt.

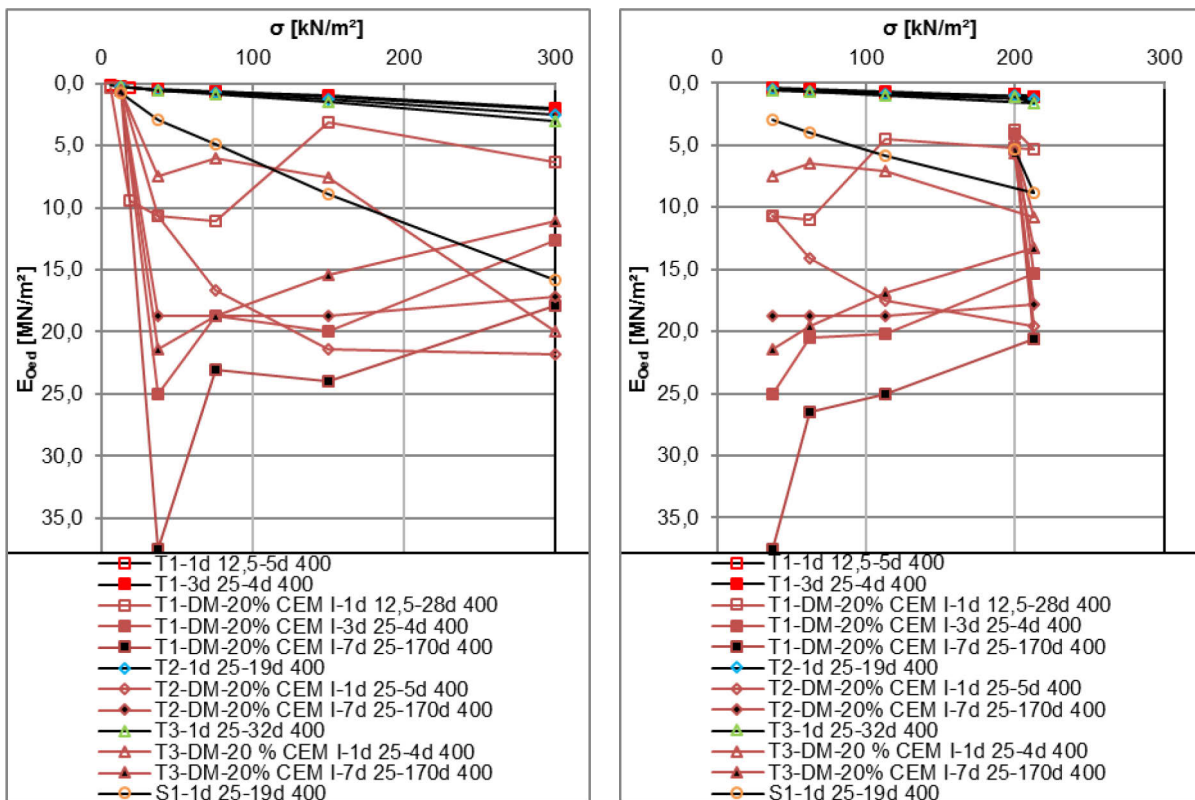


Abb. 9.60: T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-1,3 u. 7d 25-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ -E<sub>Oed(innen)</sub>, r.:  $\sigma$ -E<sub>Oed(außen)</sub>.

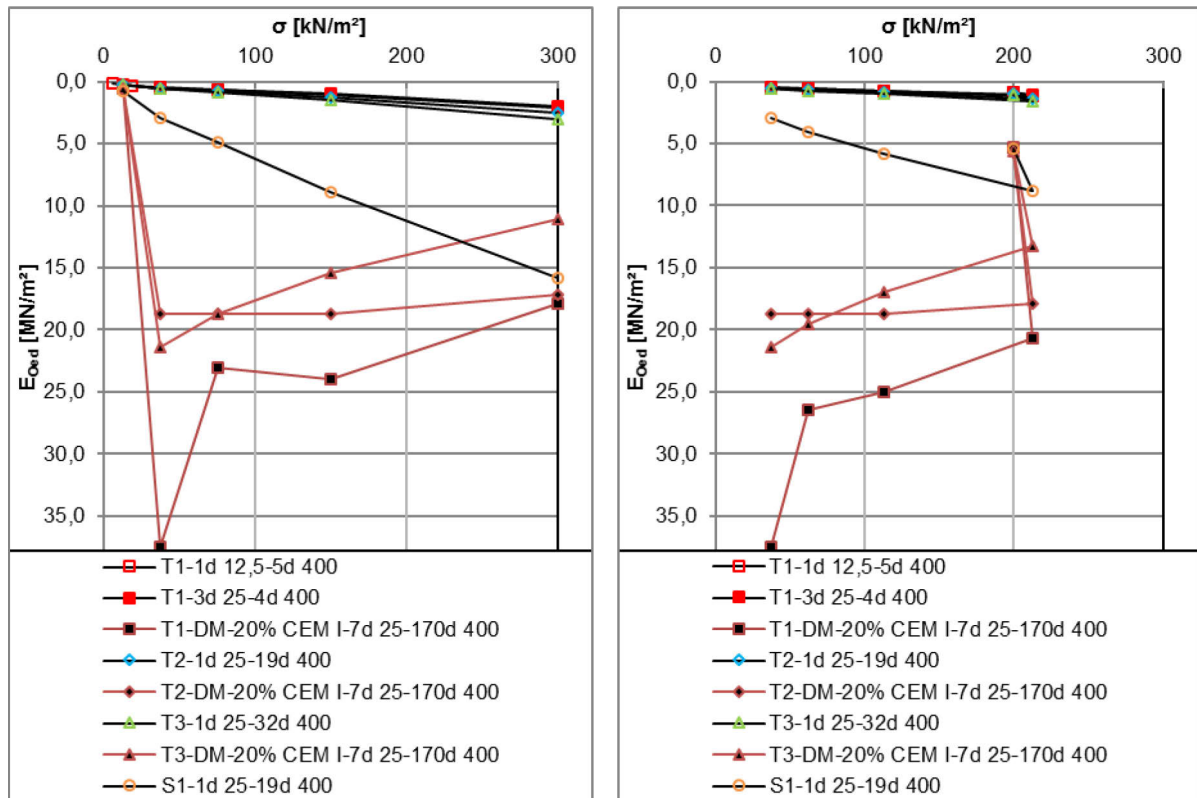


Abb. 9.61: T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-7d 25-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{innen})$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{außen})$ .

Insgesamt zeigten die mit 20 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen in Abhängigkeit von der Dauer der Initialspannung zumeist wesentlich höhere Oedometermodule und über die inneren, äußeren und das gesamte Spannungsintervall ( $\sigma_0$ - $\sigma_6=0,00$ - $400,0 \text{ kN/m}^2$  –  $E_{Oed(200)}$ ) ähnliche Steifigkeiten als die zum Vergleich herangezogene Versuchsreihe des weichen Schluffs (S1-1d 25-19d 400). Fügt man die  $\sigma$ - $E_{Oed}$ -Linien des mit 5 und 20 M.-% CEM I behandelten Schluffs dem Vergleich hinzu, zeigen diese über die untersuchten Spannungsintervalle zunehmende Steifigkeiten in Form eines „hardening soils“ mit deutlich größeren Oedometermodule über die inneren Spannungsintervallen  $E_{Oed(150)}$  bzw.  $E_{Oed(300)}$ , sowie über die äußeren Intervalle  $E_{Oed(112,5)}$  bzw.  $E_{Oed(212,5)}$  und über das gesamte Spannungsintervall  $E_{Oed(200)}$  (s. Abb. 9.62).

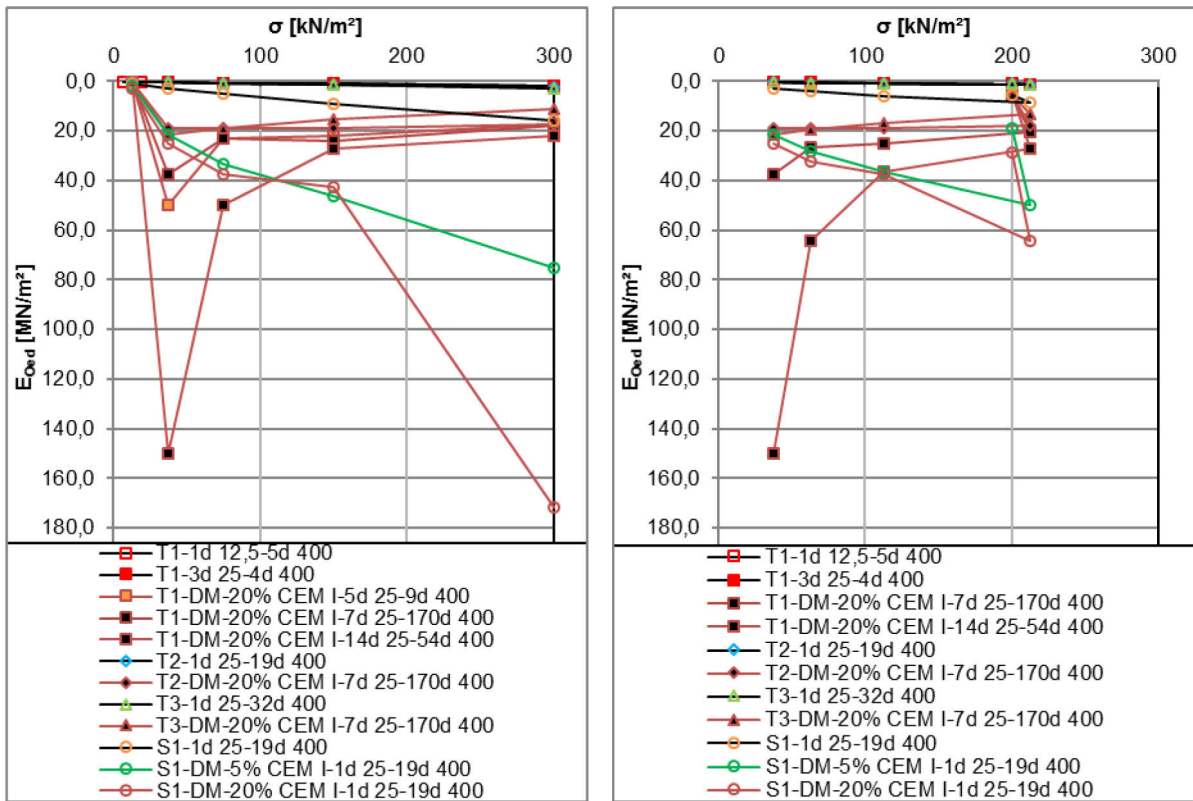


Abb. 9.62: T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-7d 25-Versuchsreihen – i.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (innen), r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}$ (außen).

Insbesondere veranschaulicht auch hier der direkte Vergleich der Versuchsreihen der unterschiedlichen Torfe, das die mit 20 M.-% CEM I behandelten Versuchsreihen das beschriebene Stoffverhalten widerspiegeln: mit zunehmender Haltedauer der Initialspannungsstufe (Vorlast) gehen deutlich größere innere bzw. äußere Oedometermodule  $E_{Oed}$  im Spannungsintervall  $\sigma_1$ - $\sigma_2=12,5-25,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed}(18,75)$  (Phase 1) einher und daran abfallende (T1, T3) bzw. gleichbleibende (T2) innere bzw. äußere  $E_{Oed}$ -Werten in den nachfolgenden Spannungsschritten (Phase 2) .

Betrachtet man die Versuchsreihen, welche mit 20 M.-% CEM I behandelt wurden und dann ohne Belastung geruht haben zeigen sich über die Spannungsschritte flach steigende innere Oedometermodule.

Ein Vergleich dieser Versuchsreihen: T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400, T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-5d 400 und T3-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400 (s. Abb. 9.63), zeigt insgesamt wesentlich geringere  $E_{Oed}$ -Werte als bei den initial über einen längeren Zeitraum und mit gleichen Anteilen CEM I behandelten Versuchsreihen. Da aber die Setzungen mit der Aufbringung der initialen Spannungsstufe hier vermutlich durch eine Verhärtung des Traggerüsts infolge Ruhezeit geringer ausfielen weisen diese Versuchsreihen die größten Oedometermodule über das gesamte Spannungsintervall  $\sigma_0$ - $\sigma_6=0,00-400,0$  kN/m<sup>2</sup> –  $E_{Oed}(200)$  aus (s. Abschn. A. 8) und zeigen

damit ohne initiale Belastung der unbehandelten Vergleichsversuchsreihe des S1 annähernd gleiche bzw. geringfügig bessere Steifigkeiten mit flach steigenden inneren und äußeren Oedometermodule über die verschiedenen Spannungsintervalle.

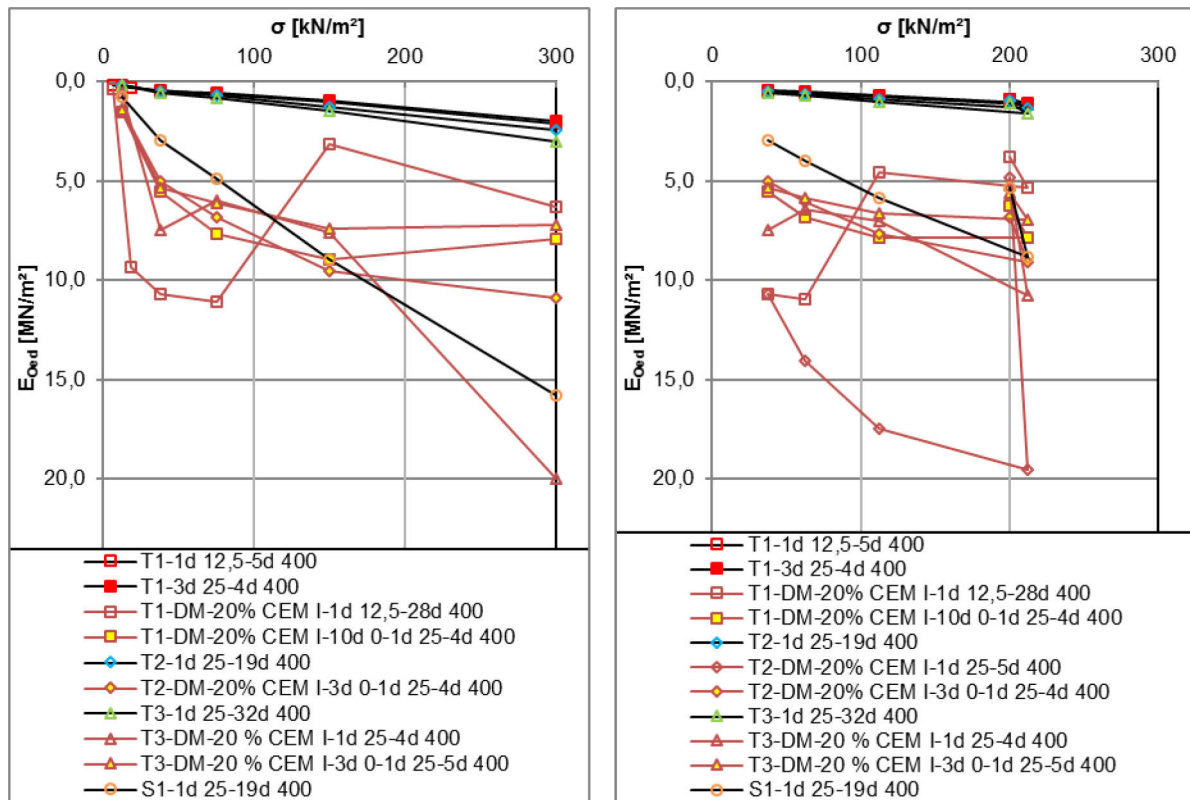


Abb. 9.63: T1, T2 u. T3-DM-20% CEM I-10 u. 3d 0 bzw. 1d 12,5 u. 1d 25-Versuchsreihen – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{innen})$ , r.:  $\sigma$ - $E_{Oed}(\text{außen})$ .

Im Vergleich zu den bekannten Bodenverbesserungen (Bodenstabilisierung oder Bodenverfestigung) im erdbautechnischen Sinn, die durch die Zugabe von Bindemitteln die Verarbeitbarkeit von grobkörnigen, gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden verbessern, diese stabilisieren, d.h. das Korngerüst verfestigen, ist hier von einer „Stabilisierung“ auszugehen. Eine Verfestigung des Korngerüsts selbst ist hier aufgrund des vergleichsweise geringen mineralischen Anteils nicht möglich, da ein solches Korngerüst in den Versuchstorfen nicht vorhanden ist.

Das Verhalten der mit Dry-Mixed konditionierten Böden ist auf Grundlage der Versuche näherungsweise wie folgt zu beschreiben: Der Effekt der Konditionierung besteht in den untersuchten Böden aus 2 Phasen. In der Phase I besteht dieser darin, dass mit dem Mischvorgang ein „räumliches Fachwerk“ (Tragsystem), bestehend aus der Spur des Bindemittelseintrags, in den Porenraum eingebaut bzw. aufgebaut wird. In dieser Phase liegt der konditionierte Boden als „neuer Baustoff“ mit einem eigenem Stoffverhalten vor. In der Phase I ist dieses Fachwerk in einem niedrigem/unteren Spannungsniveau funktional – der Boden ist hier mit der aufgetragenen Spannung als härter werdender bzw. sich auf seinem Fachwerk versteifender Boden („timbering soil“) zu beschreiben. Mit zunehmendem Spannungsniveau wird dieses Fachwerk „überlastet“, versagt



als Tragsystem und geht damit in die Phase II über, so dass der konditionierte Boden von einem Verhalten als Baustoff in ein bodenmechanisches Verhalten mit der Wirkung der eingebauten Feststoffe (Bindemittel), die immer noch funktional als eingebrachter Feststoff aber nicht mehr als Fachwerk wirken, übergeht. Hier wird die Bodenmatrix durch eine Blockierung bzw. Verkleinerung (mit zunehmender Auflast bzw. fortschreitender Dränung/Auspressung des überschüssigen Porenwassers (Konsolidierung)) der Dränwege innerhalb dieser stabilisiert, d.h. verdichtet und komprimiert. Dies geht aber mit gleichbleibenden oder geringeren und nachlassenden Steifigkeit einher. Der behandelte Boden geht von seinem verfestigten Zustand mit hohen Steifigkeiten – gegenteilig zur Phase I – in einen Boden mit nachlassenden („weakening soil“) bzw. annähernd gleichbleibenden Steifigkeiten („consistent soil“) über, womit eine Annäherung bzw. Abbildung des Stoffverhaltens über bodenmechanische Modelle (vgl. Abschn.9.10) der konditionierten Versuchsreihen derzeit nicht möglich ist, weil die unterschiedliche Stoffe / unterschiedlichen Stoffverhaltensmechanismen mit bisher wissenschaftlich noch nicht abgrenzbaren Übergangsbedingungen (Phase I auf Phase II) verbunden sind.

Die Abb. 9.64 zeigt schematisch – anhand der  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ - und  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ -Linien der Versuchsreihe T1-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400 – die Entwicklung der Oedometermodule  $E_{Oed}$  bzw. bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  in Abhängigkeit von der Haltedauer der Initialspannung über den Verlauf der Spannungsintervalle/Spannungen.

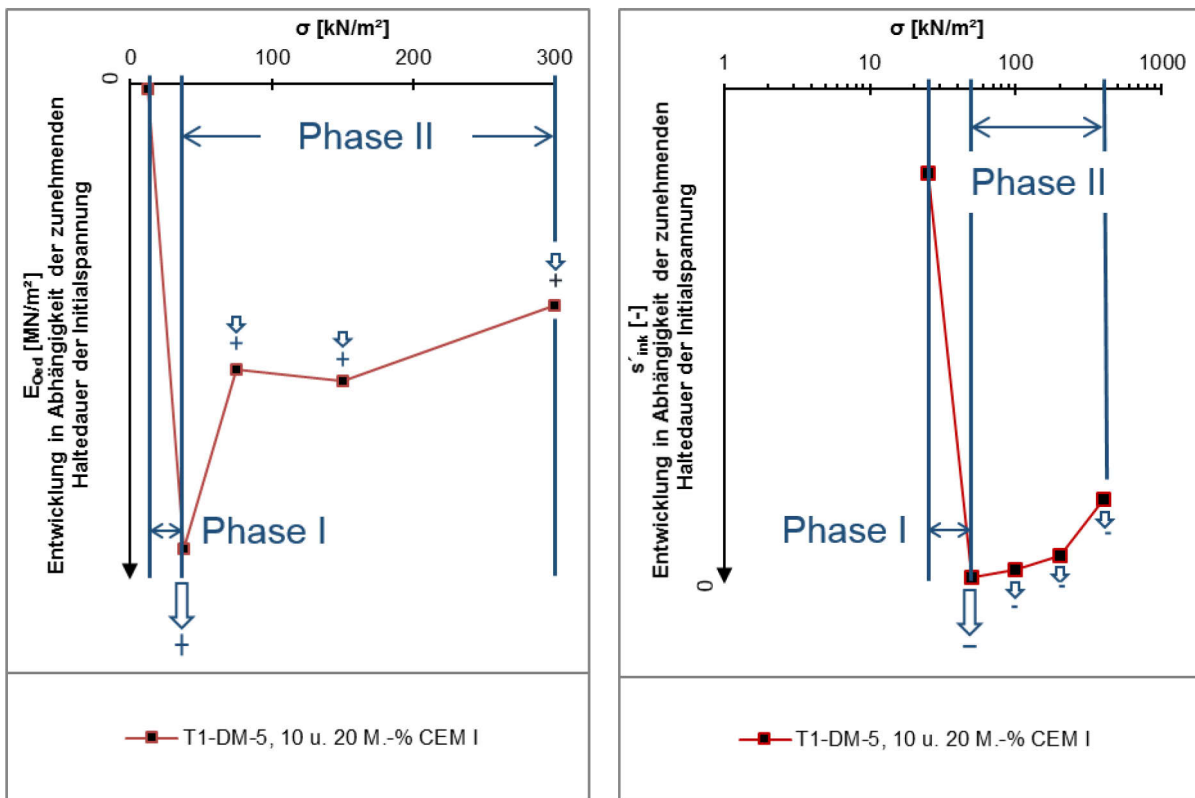


Abb. 9.64: Schematische Entwicklung der Oedometermodule  $E_{Oed}$  bzw. bez. ink. Setzungen  $s'_{ink}$  des mit CEM I konditionierten T1 in Abhängigkeit von der Haltedauer der Initialspannung – l.:  $\sigma$ - $E_{Oed(innen)}$ , r.:  $\log \sigma$ - $s'_{ink}$ .

Die dargestellte Entwicklung wurden an den DM-konditionierten Versuchsreihen mit den untersuchten verschiedenen Zugabemengen an CEM I nachgewiesen bzw. sind diese vermutlich auf eine zeitlich vergrößerte Haltedauer der Initialspannung übertragbar. Der Zuwachs der Steifigkeiten der konditionierten Versuchsreihen des T1 erfolgte mit einer zunehmenden Haltedauer der Anfangsspannung überproportional hoch im an die initiale Laststufe folgenden Spannungsintervall  $\sigma_2 - \sigma_3 = 25,0 - 50,0 \text{ kN/m}^2 - E_{\text{Oed}(37,5)}$  gegenüber den folgenden Spannungsintervallen. Hier zeigen sich auch mit der Haltedauer zunehmende Oedometermodule  $E_{\text{Oed}}$ , diese nähern sich aber vergleichsweise stark den Versuchsreihen mit einer kürzeren Haltedauer der Initialspannung (vgl. Abb. 9.50 bis Abb. 9.53).

[385] zeigen bis zu einer Haltedauer der Vorbelastungsspannung ( $\sigma = 18 \text{ kN/m}^2$ ) von 300 d eine Zunahme der Druckfestigkeit  $q_{\text{uc}}$  an mit Zement behandelten Torfen. Die Druckfestigkeit  $q_{\text{uc}}$  der 90 d vorbelasteten Probekörper beläuft sich hier auf 70 % der 360 d vorbelasteten Probekörper. Über ähnliche Ergebnisse der Entwicklung der Druckfestigkeit  $q_{\text{uc}}$  an mit Zement behandelten Torfen berichten [398] (vgl. auch [384] und [399]). Damit ist, da sich bei den Versuchsreihen T1-DM-5 und 20% CEM I-14d-54d 400 und T1-DM-20% CEM I-14d 25-54 d 400, nach 14 d Haltedauer der Initialspannungsstufe noch deutliche Zuwächse der Steifigkeit zeigten, davon auszugehen, dass diese bis zur endgültigen Aushärtung des Zementsteins bzw. bis zum Abklingen verschiedenster chemischer Reaktionen, andauern. Weiter ist das Verhalten auf die Wet-Mixed mit CEM I konditionierten Böden übertragbar, wobei hier, in Abhängigkeit von den höheren Wassergehalten, wesentlich geringere Steifigkeiten feststellbar waren. Das Verhalten der trocken mit 20 M.- % CEM I konditionierten Versuchsreihen des T2 und T3 dahingegen ist anhand der durchgeführten Untersuchungen deutlich schwieriger abzuschätzen, da sich die Oedometermodule der Versuchsreihen mit einer Haltedauer der Anfangsspannung von 7 d (T2 und T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400) wie beschrieben nachlassend bzw. annähernd gleichbleibend einstellten (vgl. Abb. 9.60 und Abb. 9.61). Von einer Steigerung der Steifigkeit mit zunehmender Haltedauer der Initialspannung ist hier aber ebenfalls auszugehen.

Hervorzuheben ist weiter, dass sich die Steifigkeiten der inneren/äußeren Oedometermodule ohne eingebrachte Initialspannung der DM-konditionierten Versuchsreihen (vgl. T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400, T2-DM-20% CEM I -3d 0-1d 25-4d 400, T3-DM-20% CEM I -3d 0-1d 25-5d 400) insgesamt deutlich geringer einstellten.

Die Konsolidation wird bei den mit CEM I behandelten Versuchsreihen wahrscheinlich durch eine Verfestigung der Bodenbestandteile in einer Art Fachwerk („Tragsystem“) und eine zusätzliche Fixierung des Porenwassers in den Porenräumen des Bodenkörpers gehemmt bzw. in den unteren Laststufen (bis ca.  $50 \text{ kN/m}^2$ ) gestoppt (Phase I), womit die effektiven Spannungen nur langsam steigen, weil hier weiterhin der Großteil dieser über das Porenwasser (neutrale Spannungen) in den annähernd „geschlossenen“ bzw. „verstopften“ Porenräumen abgetragen wird.

Daraus ergibt sich jedoch, dass sich die scheinbare Festigkeit der stabilisierten Matrix mit Erhöhung der Spannung deutlich verringert. Die durch die Verstopfung der Dränwege (aneinandergereihte Poren bzw. „Porenketten“) eingestellte Stabilisierung verursacht eine stark verminderte Kompression, die eine scheinbare Festigkeit erwirkt. Mit zunehmenden Lasten wird diese Festigkeit durch eine Sprengung/Auflösung dieser Verstopfung verringert bzw. regeneriert sich wieder mit der erneuten Konsolidation (Phase II), mit welcher jedoch weitere Verformungen einhergehen. Dieses Stoffverhalten wird darauf zurückgeführt, dass der Abbindevorgang im konditioniertem Material unter einer „Stabilisierung“ in Form eines Ruhezustandes – einer Verfestigung des Tragsystems – erfolgen kann und danach anschließend höhere Festigkeiten generiert werden können. Diese Effekte verstärken sich mit zunehmendem Zementanteil. Deshalb ist anzunehmen, dass sich diese Effekte infolge der vergleichsweise hohen Zementanteile (bez. auf die Trockenmasse) bei den DM-konditionierten Versuchsreihen des T1 am ausgeprägtesten zeigten.

Daraus ist zu folgern, dass höhere Initialspannungen mit entsprechenden Haltezeiten dieser, auch zu deutlich höheren Steifemodulen, besonders in dem auf die Anfangslaststufe folgenden Spannungsintervall, führen, da sich der Zementstein bzw. das Traggerüst in den sich damit hervorgerufenen deutlich kleineren Poren, ausbilden kann. Dies führt aber dementsprechend zu wahrscheinlich wesentlich höheren Sofort- und Primärsetzungen, die aber wiederum geringere Sekundärsetzungen zur Folge haben.

Bei einer Steigerung der Vorlast ist auch versuchstechnisch mit deutlich höheren Sofort- bzw. Primärsetzungen zu rechnen, die zu einer dementsprechend geringeren Probenhöhe führen würden – ggf. sollten hierfür folglich größer dimensionierte Probenkörper ausgewählt werden.

Für die Praxis ist hier technisch die Grundbruchsicherheit zu beachten.

Weiterhin könnte bei höheren als den untersuchten Anfangsspannungen die wesentlich stärkeren Dränvorgänge, durch Auspressung des Probenkörpers, zu einer Verminderung der Festigkeit führen. Die hier beschriebenen Versuchsreihen wurden wie vorgenannt mit einer geringen Probenhöhe von 20 mm durchgeführt mit dafür typischen geringen Initialspannungen.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass sich die Steifigkeiten der Versuchstorfe gezielt durch den Anteil der Zugabemenge des Bindemittels und die Haltedauer der Initialspannung auf der Grundlage von Kompressionsversuchen einstellen lassen. Eine Prognostizierbarkeit von erreichbaren Steifigkeiten auf der Grundlage von bodenmechanischen Parametern wie z. B. natürlichem Wassergehalt  $w_n$ , Glühverlust  $V_{gl}$  oder Porenzahl  $e$  ist jedoch, wie es der direkte Vergleich der unterschiedlichen Versuchsreihen an den Torfen T1 bis 3 veranschaulicht, nicht möglich.



## 10 Einaxiale Druckversuche

Zusätzlich zu den Oedometerversuchen wurden einaxiale Druckversuche an konditionierten Probenkörpern der Versuchstorfe T1 und T2 in Anlehnung an DIN 17892-7:2018 [400] mit einem Verhältnis der Höhe des quadratischen Prüfkörpers zur Kantenlänge von 1,0 [-] (Würfel) durchgeführt.

### 10.1 Herstellung der Probekörper und Durchführung der Versuche

Die Probekörper wurden analog zu den Oedometerversuchsreihen aus dem homogenisiertem Probenmaterial hergestellt. Dagegen wurden die Versuchsböden hier ausschließlich mit 20 M.-% CEM I (bez. auf die Feuchtmasse des Versuchsbodens) behandelt. Als Probenformen dienten hier Prüfprismen (160/40/40 mm).

Die Probekörper wurden im Trocken- und Nassmischverfahren (Dry-Mixed (DM) bzw. Wet-Mixed (WM)) hergestellt. Die verschiedenen Versuchsreihen des T1 wurden vor den einaxialen Druckversuchen jeweils trocken mit dem Zement CEM I angemischt (DM) und 7 d und 28 d unbelastet in der Feuchtekammer gelagert:

- T1-DM-20% CEM I-7d 0,
- T1-DM-20% CEM I-28d 0,

trocken angemischt und 7 d unbelastet im Wasserbad (Wasserlagerung (WL)) gelagert:

- T1-DM-20% CEM I-7d 0 WL,

trocken angemischt und 1 d unbelastet im Wasserbad (Wasserlagerung (WL)) gelagert und anschließend 27 d unbelastet in der Feuchtekammer gelagert:

- T1-DM-20% CEM I-1d 0 WL-27d 0,

nass angemischt (WM) mit einem w/z-Wert von 1,5 [-] und 7d unbelastet im Wasserbad (Wasserlagerung (WL)) gelagert:

- T1-WM-20% CEM I-7d 0 WL.

Die Versuchsreihe des T2 wurde vor dem einaxialen Druckversuch trocken angemischt (DM) und 7 d unbelastet in der Feuchtekammer gelagert:

- T2-DM-20% CEM I-7d 0.

Insgesamt umfasste jede Versuchsreihe 6 Probekörper – jeweils 2 Prüfkörper (40/40/40 mm), hergestellt aus den 3 pro Versuchsreihe angefertigten Prismen. Die Versuche wurden kraftgesteuert (100 N/s) mit einem Kraftaufnehmer (Fabr.: HBM, Typ: C2) und einem induktiven Wegaufnehmer (Fabr.: RDP, Typ:GT 2500) durchgeführt.

Die Wassergehalte und -anteile der Prüfkörper wurden bei der Herstellung an einer Vergleichsprobe und nach den Druckprüfungen an den Prüfkörpern ermittelt. Die Darstellung der Versuchsreihen erfolgt in  $\varepsilon_v$ - $q_u$ -Linien.

## 10.2 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche zeigen, dass die Versuchsreihe des T1, die nach einer Lagerung von 28 d (T1-DM 20% CEM I-28d 0) geprüft wurden, die höchste Bruchspannung ( $q_u=764,08 \text{ kN/m}^2$ ) bei der geringsten bez. Vertikalverformungen  $\varepsilon_v$  (0,029 [-]) ausweist (s. Abb. 10.1 und Tab. 10.1).

Ähnliche Bruchspannungen zeigen die Versuchsreihen T1-DM 20% CEM I-7d 0 und T2-DM 20% CEM I-7d 0 ( $q_u=725,75$  und  $699,42 \text{ kN/m}^2$ ), die jedoch höhere bez. Vertikalverformungen  $\varepsilon_v$  von 0,038 und 0,043 [-] ausweisen.

Die nach Herstellung 1 d wassergelagerte Versuchsreihe und daran 27 d in der Feuchtekammer gelagerte Reihe T1-DM-20% CEM I-1d 0 WL-27d 0 zeigt eine etwas geringere Bruchspannung  $q_u=673,46$  gegenüber den Reihen T1-DM 20% CEM I-7d 0 und T2-DM 20% CEM I-7d 0, dafür aber mit der Reihe T1-DM 20% CEM I-28d 0 übereinstimmende bez. Vertikalverformungen  $\varepsilon_v=0,030$ .

Die 7d wassergelagerte Reihe T1-DM-20% CEM I-7d 0 WL zeigt ebenfalls geringere bez. Vertikalverformungen mit einer geringeren Bruchspannung ( $q_u=594,50$ ,  $\varepsilon_v=0,034$ ) im Vergleich zu den Versuchsreihen T1-DM 20% CEM I-7d 0 und T2-DM 20% CEM I-7d 0.

Die im Nassmischverfahren mit einem w/z-Wert von 1,5 [-] hergestellte und anschließend 7 d wassergelagerte Reihe T1-WM-20% CEM I-7d 0 WL weist die insgesamt geringste Bruchspannung  $q_u=232,42 \text{ kN/m}^2$  bei der höchsten bez. Verformung  $\epsilon_v=0,052$  [-] aus.

Weiter ist anzumerken, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen T1-DM 20% CEM I-28d 0 und T1-DM-20% CEM I-7d 0 WL 7 d hinsichtlich der bez. Verformungen  $\epsilon_v$  ( $V=48,20$  und  $36,75$  %) sehr stark streuen.

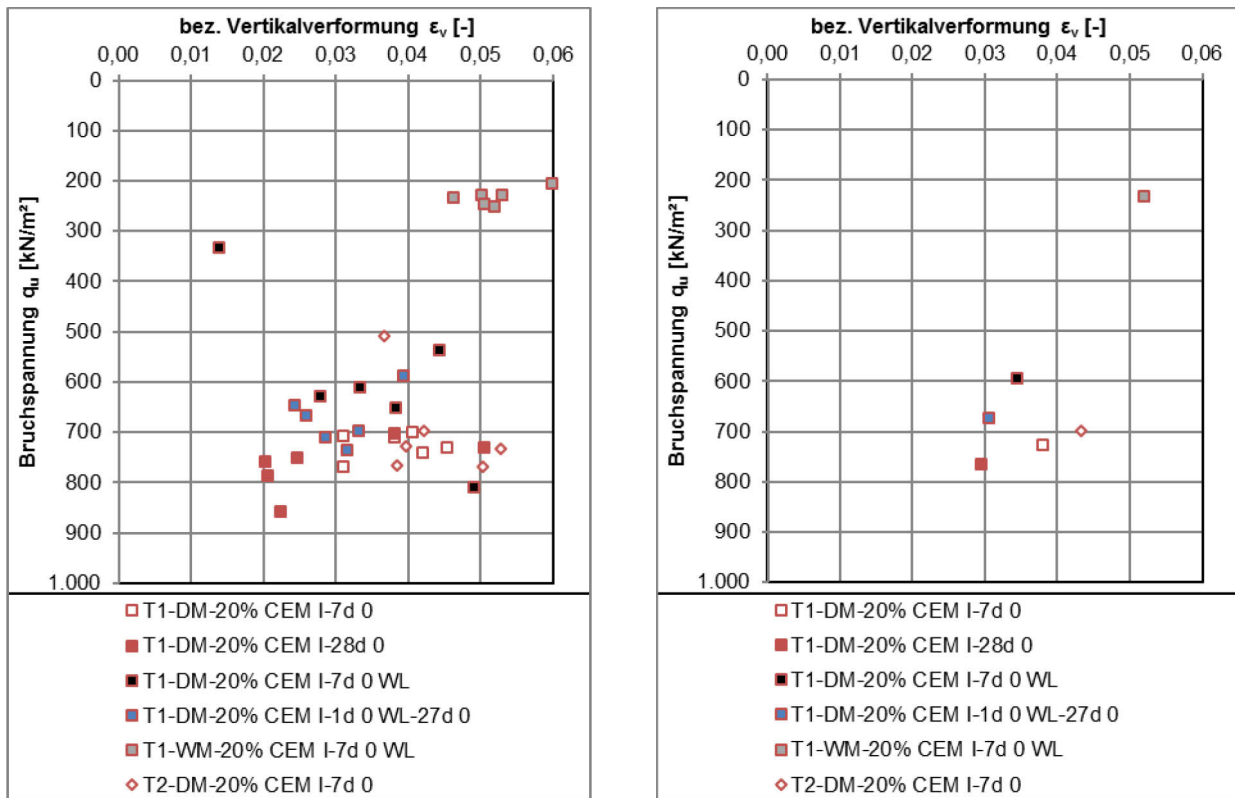


Abb. 10.1: Dehnungs-Bruchspannungsdiagramme ( $\epsilon_v$ - $q_u$ -Linien) der konditionierten Versuchsböden T1 und T2. i.: Einzelwerte der Versuchsreihen, r.: Mittelwerte der Versuchsreihen.

Tab. 10.1: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche.

Versuchsreihe [Bez.]	Anzahl d. Versuche [n]	Einbauwassergehalt/-anteil $w / w_A$ [M.-%]	Ausbauwassergehalt/-anteil $w / w_A$ [M.-%]	Ausbaufeuchtdichte / Ausbautrockendichte $\rho_r / \rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	bez. Vertikalverformung $\varepsilon_v^1$ [-] / $V$ [%]	Bruchspannung $q_u^2$ [kN/m <sup>2</sup> ] / $V$ [%]
T1-DM-20% CEM I-7d 0	6	127,78 / 56,10	118,04 / 54,13	1,31 / 0,60	0,038 / 15,35	725,75 / 3,49
T1-DM-20% CEM I-28d 0	6	128,47 / 56,23	117,51 / 54,02	1,33 / 0,61	0,029 / 48,20	764,08 / 6,95
T1-DM-20% CEM I-7d 0 WL	6	131,56 / 56,81	118,18 / 54,16	1,33 / 0,61	0,034 / 36,75	594,50 / 26,44
T1-DM-20% CEM I-1d 0 WL-27d 0	6	130,12 / 56,54	126,67 / 55,88	1,31 / 0,58	0,030 / 22,92	673,46 / 7,87
T1-WM-20% CEM I-7d 0 WL	6	170,43 / 63,02	172,35 / 63,28	1,27 / 0,46	0,052 / 8,68	232,42 / 7,16
T2-DM-20% CEM I-7d 0	6	82,91 / 45,33	79,93 / 44,42	1,44 / 0,80	0,043 / 18,89	699,42 / 13,85

<sup>1</sup> bez. Vertikalverformung  $\varepsilon_v$  = Vertikalverf. bei Bruch/Anfangsprobenh. des Prüfkörpers =  $\varepsilon_{v Br.}/h_0$   
<sup>2</sup> Bruchspannung  $q_u$  = Spannung bei Bruch/Fläche des Prüfkörpers =  $F/A$  [kN/m<sup>2</sup>]

### 10.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Insgesamt zeigen die Unterschiede im Spannungs-Dehnungsverhalten der Druckversuche eine gute Übereinstimmung mit den aus Kompressionsversuche ermittelten Steifigkeiten.

Die im DM-Verfahren hergestellten Versuchsreihen weisen ein deutlich spröderes Stoffverhalten aus als die mit einem  $w/z$ -Wert von 1,5 [-] hergestellte T1-Versuchsreihe, T1-WM-20% CEM I-7d 0 WL, die nach 7 d Wasserlagerung geprüft wurde und die geringsten Bruchspannungen von lediglich 232,42 kN/m<sup>2</sup> mit den größten bez. Verformungen  $\varepsilon_v$  von 0,052 [-] aufzeigt (s. Abb. 10.1 und Tab. 10.1). Weiter decken sich die Abweichungen, die sich im Spannungs-Dehnungsverhalten zeigen und aus der Lagerzeit der Prüfkörper resultierten, mit den mit der Haltedauer der Initialspannung ansteigenden Steifigkeiten der Oedometerversuchsreihen.

# 11 Scherversuche

Die hier dargestellten durchgeführten Scherversuche, welche ausschließlich am Torf 1 ausgeführt wurden, sind als orientierende Scherversuche, d. h. als Grundlagenversuche zur Beeinflussung der Scherfestigkeit von Torfen durch Behandlung mit Bindemitteln zu bewerten. Weiter wurden diese nicht in der Homogenität wie die Versuchsreihen der Oedometerversuche durchgeführt.

## 11.1 Herstellung der Probekörper und Durchführung der Versuche

Die Rahmenscherversuche nach DIN 18137-3:2002 [401], die wie bereits erwähnt ausschließlich mit dem Versuchstorf T1 durchgeführt wurden, wurden konsolidiert, drainiert (CD-Versuch) und mit gefluteter Scherzelle analog den Oedometerversuchen ausgeführt. Die Probekörper wurden entsprechend den Oedometer- und Druckversuchsreihen aus dem homogenisiertem Probenmaterial hergestellt. Der Torf 1 wurde unbehandelt und im Dry-Mixed-Verfahren mit Zugabemengen von 5 und 20 M.-% behandelt in die Scherzellen eingebaut.

Ferner wurden die Versuche an zwei verschiedenen Rahmenschergeräten durchgeführt. Das Rahmenschergerät I (Fabr.: Wille, Typ: RS-5) besitzt eine kreisförmige (Einbaumaße Probekörper:  $d=9,44$  cm,  $A=70$  cm<sup>2</sup>,  $h=2,0$  cm,  $V=140$  cm<sup>3</sup>), das Rahmenschergerät II (Fabr.: Wykeham Farrance, Typ: WF2160) eine quadratische Scherzelle (Einbaumaße Probekörper:  $a/b=10$  cm,  $A=100$  cm<sup>2</sup>,  $h=3,0$  cm,  $V=300$  cm<sup>3</sup>). Das Schergerät II kam aufgrund einer Überschneidung der verschiedenen Versuche zum Einsatz.

Die Untersuchungen zum Scherverhalten wurden mit drei Normalspannungen  $\sigma$  in Höhe von 100, 150 und 200 kN/m<sup>2</sup> durchgeführt.

Bei den am Rahmenschergerät I durchgeführten Versuchen wurden die Probekörper nach einer Konsolidationszeit von 1 d mit einer Schergeschwindigkeit von 0,008 mm/min über den max. möglichen Scherweg von 20 mm abgeschert.

Die mit Bindemittel behandelten Versuche wurden am Schergerät II erst nach einer Konsolidationsdauer von 2 d abgeschert, die Schergeschwindigkeit betrug hier ebenfalls 0,008 mm/min mit gleichem max. Scherweg von 20 mm.

Die Benennung der Versuchsreihen ist wie folgt gegliedert:

1. Versuchsboden (hier ausschließlich T1),
2. Mischverfahren: unbehandelt („-“) oder Dry-Mixed („DM“),
3. Rahmenschergerät I (kreisförmige Scherzelle „K“) oder Rahmenschergerät II (quadratische Scherzelle („Q“),
4. Versuchsnummer (nur bei den unbehandelten Versuchen des T1 in Schergerät I),
5. Bindemittelanteil in M.-% bez. auf die Feuchtmasse,
6. Bindemittel,
7. Konsolidationsdauer in d.

Am Rahmenschergerät I („K“) wurden folgende Versuche durchgeführt:

- T1-K1-1d,
- T1-K2-1d,
- T1-DM-K-10% LP-1d,
- T1-DM-K-20% LP-1d,
- T1-DM-K-5% B500-1d,
- T1-DM-K-20% B500-1d,
- T1-DM-K-5% B300-1d,
- T1-DM-K-20% B300-1d,
- T1-DM-K-5% BK-1d,
- T1-DM-K-20% BK-1d,
- T1-DM-K-5% CEM I-1d,
- T1-DM-K-20% CEM I-1d.

Die am Rahmenschergerät II („Q“) durchgeführten Versuche unterteilen sich in:

- T1-Q1-1d,
- T1-DM-Q-5% B500-2d,
- T1-DM-Q-5% B300-2d,
- T1-DM-Q-5% BK-2d,
- T1-DM-Q-5% CEM I-2d.

Die Darstellung der Versuchsreihen der Scherversuche erfolgt in linearen Scherweg-Scherspannungs-Linien ( $w$ - $\tau$ -Linien). Weitere tabellarische Zusammenstellungen der Scherversuche finden sich in Abschn. A. 10.

## 11.2 Ergebnisse der Scherversuche

### 11.2.1 Unbehandelte Versuchsreihen

Wie vor dargestellt wurden insgesamt drei Versuchsreihen, 2 am Rahmenschergerät I (T1-K1-1d und T1-K2-1d) und 1 am Rahmenschergerät II T1-Q1-1d, mit den Normalspannungen  $\sigma=100$ , 150 und 200 kN/m<sup>2</sup>, durchgeführt. Betrachtet man die Scherweg-Scherspannungslinien der verschiedenen unbehandelten Reihen lässt sich feststellen, dass diese, die maximal erreichten Scherspannungen betreffend, homogene Ergebnisse zeigen (vgl. Abb. 11.1 und Tab. 11.1). Die 2 d unter der jeweiligen Normalspannung konsolidierten Versuche zeigen konträr den 1 d konsolidierten Versuchen eine deutliche Zunahme der Schubspannung mit zunehmendem Scherweg. Die Versuchsreihe T1-K1-1d hingegen zeigt dies nur in der unteren Spannungsstufe  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup>. In den beiden höheren Spannungsstufen zeigt sich ein eher konstanter Verlauf der Linien nach Erreichen der max. Scherspannung T. Betrachtet man die Linien der Versuchsreihe T1-K2-1d sind auch hier geringfügige Zunahmen der Scherspannungen mit größer werdendem Scherweg festzustellen, die aber wesentlich geringer ausfallen als bei der über 2 d konsolidierten Reihe. Im Mittel ergibt sich hier aus den 3 Versuchsreihen mit den max. Scherspannungen T ein Scherwinkel  $\varphi$  von 34,4° und eine Kohäsion c von 6,2 kN/m<sup>2</sup>. Die Gesamtscherfestigkeit  $\varphi_G$  beträgt 35,8° (s. Abschn. A. 10, Tab. A. 89).

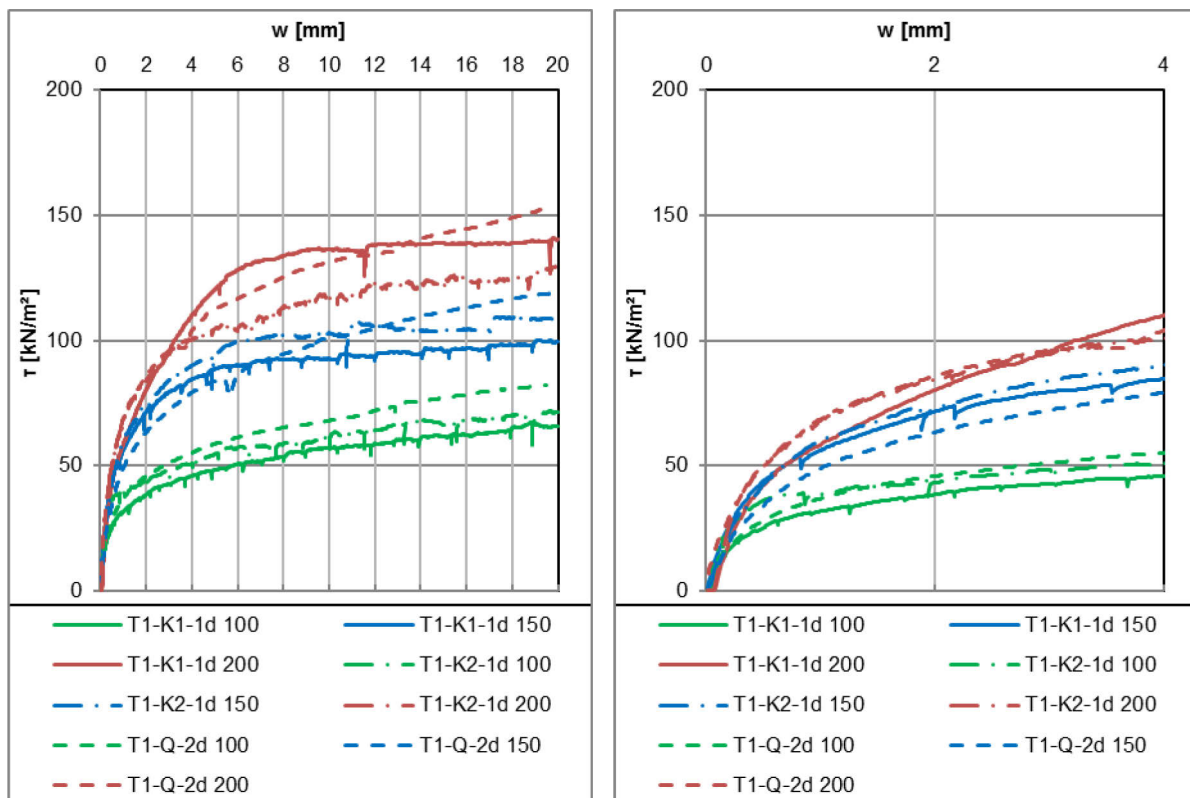


Abb. 11.1: T1-unbehandelt – l.: w- $\tau$ ,  $x_{\max}=20$  mm, r.: w- $\tau$ ,  $x_{\max}=4$  mm.

## 11.2.2 T1-DM-Liapor-Versuchreihen

Die Ergebnisse der Scherversuche der mit Liapor behandelten Reihen zeigen bei der mit 10 M.-% behandelten Reihe in der Spannungsstufe  $\sigma=150 \text{ kN/m}^2$  deutliche Schwankungen der Scherspannung im Scherwegbereich von  $w=4$  bis 9 mm.

Weiter ergeben sich bei den mit 10 M.-% Liapor behandelten Proben in den Spannungsstufen  $\sigma=150$  und  $200 \text{ kN/m}^2$  im Vergleich etwas höhere Scherspannungen (vgl. Abb. 11.2 und Tab. 11.1) als bei den mit 20 M.-% behandelten Proben.

Die Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  belaufen sich auf  $36,7$  bzw.  $36,1^\circ$ . Die Reihen T1-DM-K-10% LP-1d und T1-DM-K-20% LP-1d zeigen Scherwinkel  $\varphi$  von  $38,1$  bzw.  $34,4^\circ$ . Bei der Versuchsreihe T1-DM-K-10% LP-1d ergibt sich rechnerisch eine negative Kohäsion  $c$  von  $-6,6 \text{ kN/m}^2$ . Letztere zeigt eine Kohäsion von  $7,8 \text{ kN/m}^2$ . Insgesamt zeigen sich im Vergleich zu den unbehandelten Versuchsreihen nur geringe Änderungen der max. Scherspannungen  $T$ , die partiell sogar darunter liegen.

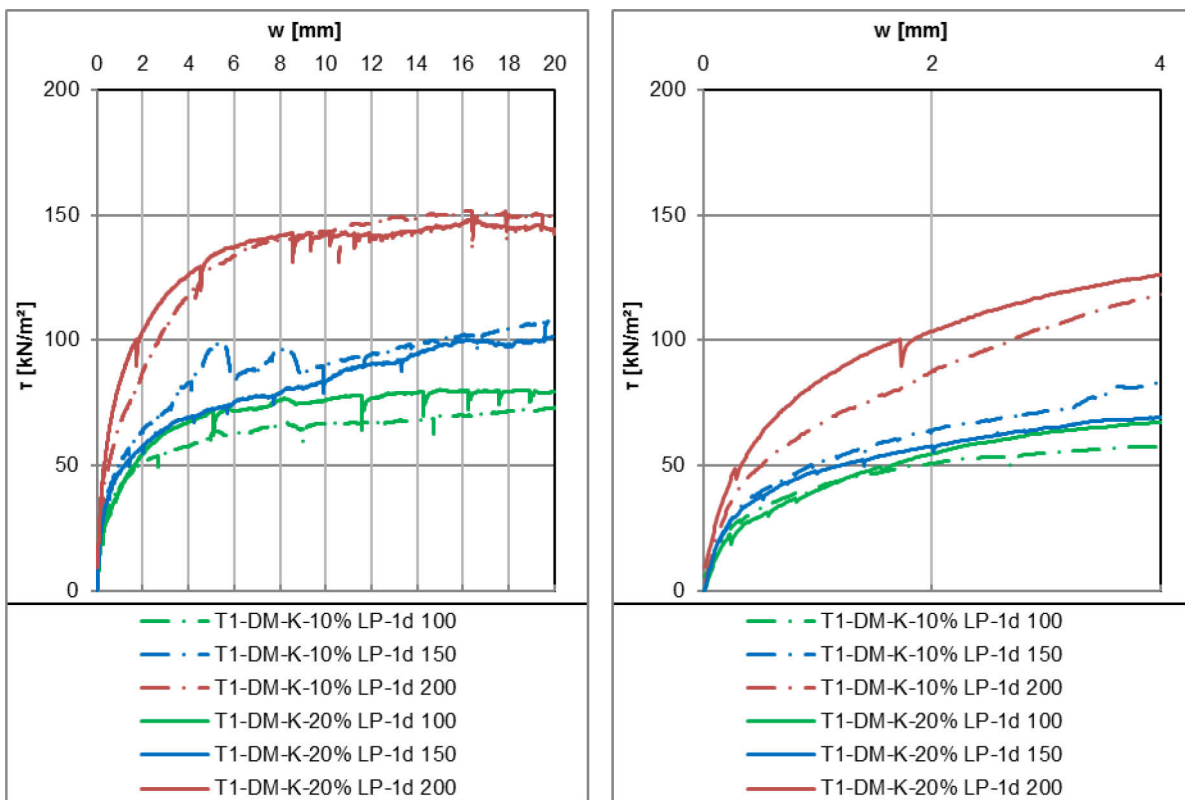


Abb. 11.2: T1-LP – l.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{\max}=20 \text{ mm}$ , r.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{\max}=4 \text{ mm}$ .



### 11.2.3 T1-DM-BK-Versuchreihen

Betrachtet man die Verläufe der Scherweg-Scherspannungslinien der mit BK behandelten Versuchsserien des T1 lässt sich erkennen, dass die 2 d konsolidierten Versuche Steigerungen der Scherspannung  $T$  über den Scherweg  $w$  ausweisen. Abweichend dazu ist dies bei den Kreisring-Rahmenscherversuchen nur bei der mit 5 M.-% behandelten Probe in der Laststufe 100 kN/m<sup>2</sup> festzustellen. Die übrigen Linien zeigen einen Abfall der Scherspannung  $T$  nach dem Erreichen der max. Scherspannung oder einen konstanten Verlauf der Linien. Weiter zeigt die  $w$ - $\tau$ -Linie der Normalspannung  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup> des Versuchs T1-DM-Q-5%-BK-2d-150 einen Bruch mit nachfolgendem Anstieg bei  $w < 2$  mm (vgl. Abb. 11.3 und Tab. 11.1).

Die Reihen T1-DM-K-5% BK-1d und T1-DM-K-20% BK-1d zeigen Scherwinkel  $\varphi$  von 38,8° bzw. 38,7° mit einer Kohäsion  $c$  von 6,2 bzw. 9,3 kN/m<sup>2</sup>. Die Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  belaufen sich auf 39,4 bzw. 40,6°. Hingegen zeigt die mit 5 M.-% behandelte und 2 d konsolidierte Reihe einen Scherwinkel  $\varphi$  von 37,9° mit einer Kohäsion  $c$  von 21,1 kN/m<sup>2</sup>. Die Gesamtscherfestigkeit  $\varphi_G$  beträgt 42,3°.

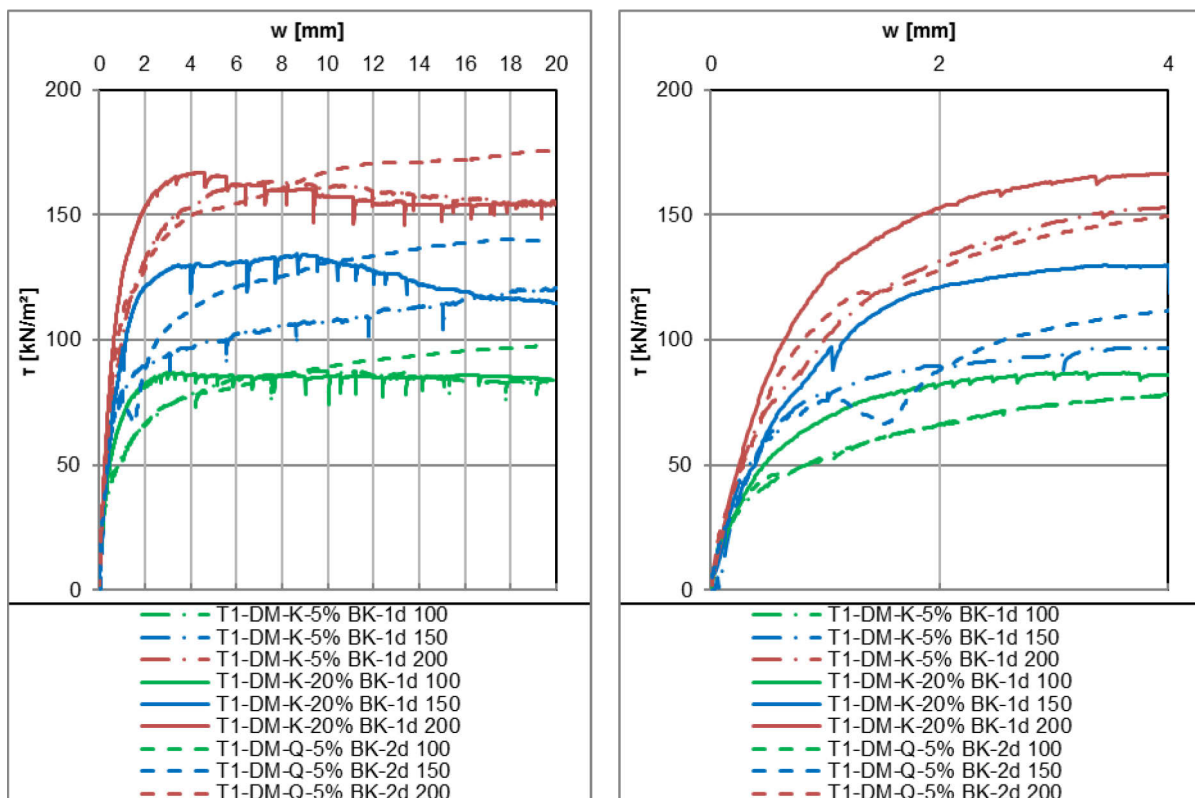


Abb. 11.3: T1-BK – l.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{max}=20$  mm, r.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{max}=4$  mm.

### 11.2.4 T1-DM-B500-Versuchreihen

Die mit 20 M.-% B500 behandelten und 1 d konsolidierten Versuche zeigen gegensätzlich zu den mit 5 M.-% behandelten und 1 d konsolidierten Versuchen einen wesentlich steileren Anstieg der Scherweg-Scherspannungslinien. In der höchsten Normalspannungsstufe ( $\sigma=200 \text{ kN/m}^2$ ) zeigt sich bei beiden Zugabeanteilen an B 500 ein Rückgang der Scherspannung mit zunehmendem Scherweg (ab ca.  $w = 8 \text{ mm}$ ). In der Normalspannungsstufe  $150 \text{ kN/m}^2$  zeigt die mit 5 M.-% B500 behandelte Probe einen geringen Rückgang der Schubspannung ab ca.  $w=14 \text{ mm}$ . (vgl. Abb. 11.4 und Tab. 11.1).

Die 2 d konsolidierten und mit 5 M.-% behandelten Versuche hingegen weisen in den drei untersuchten Normalspannungsstufen einen Bruch der Scherweg-Schubspannungslinien aus (vgl. 2 d konsolidierte BK-Versuchsreihe), der im Bereich  $w < 2 \text{ mm}$  eintritt und in der niedrigsten Normalspannungsstufe  $\sigma=100 \text{ kN/m}^2$  nach dem größten Weg  $w$  auftritt. Nach dem Bruch ist in den Normalspannungsstufen  $\sigma=150$  und  $200 \text{ kN/m}^2$  ein kontinuierlicher Zuwachs der Schubspannungen über den Scherweg  $w$  zu beobachten, die mit dem max. Scherweg ( $w=20 \text{ mm}$ ) ebenfalls ihr Maximum erreichen, welches über dem der anderen Versuche liegt. Die Schubspannungs-Scherweglinie der Normalspannung  $100 \text{ kN/m}^2$  hingegen verläuft ab einem Scherweg  $w$  von etwa  $12 \text{ mm}$  fast deckungsgleich der 1 d konsolidierten Versuche gleicher Normalspannung.

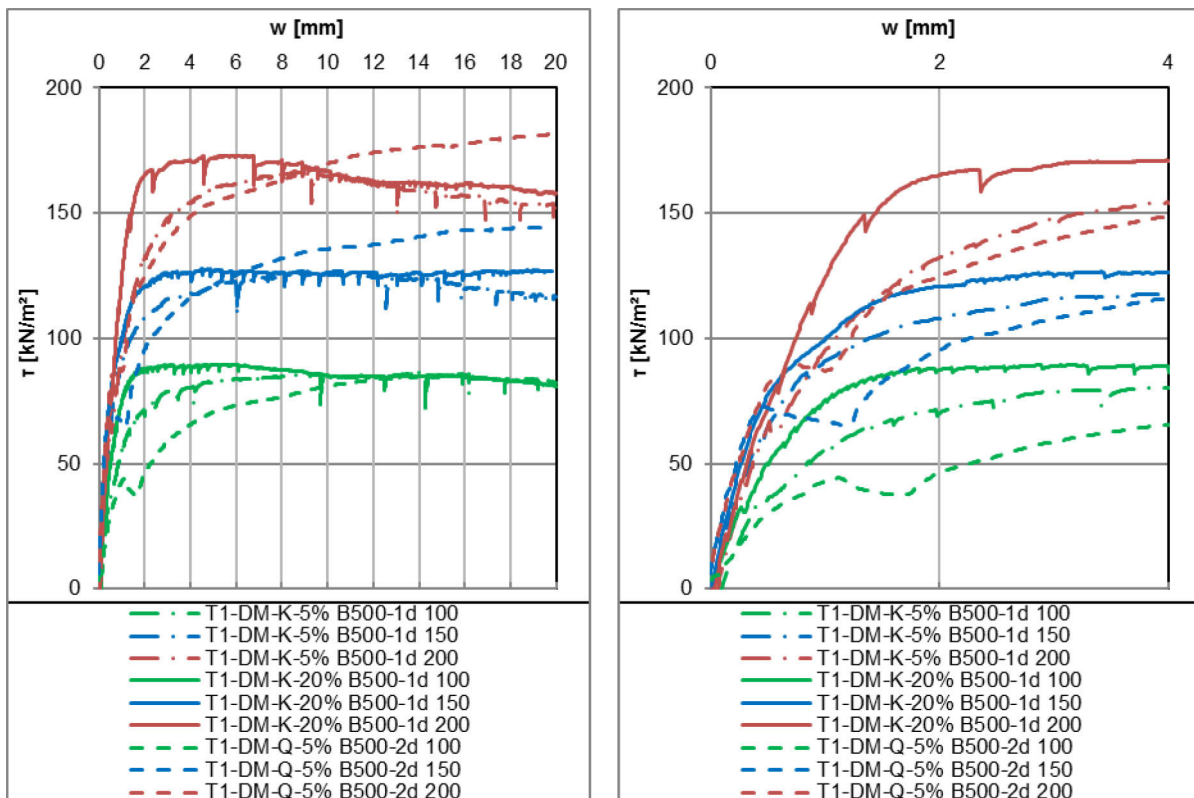


Abb. 11.4: T1-B500 – l.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{\text{max}}=20 \text{ mm}$ , r.:  $w$ - $\tau$ ,  $x_{\text{max}}=4 \text{ mm}$ .

Vergleicht man die Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  ergibt sich bei der 2 d konsolidierten und nur mit 5 M.-% B 500 behandelten Versuchsreihe der höchste Wert von  $42,5^\circ$ . Die 1 d konsolidierten Reihen zeigen Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  von  $40,1$  bzw.  $40,9^\circ$ . Gegensätzlich zu den 1 d konsolidierten Reihen weist die Reihe T1- DM-Q-5% B500 eine rechnerische negative Kohäsion  $c$  von  $-9,2 \text{ kN/m}^2$  bei einem Scherwinkel  $\varphi$  von  $44,2^\circ$  aus. Die mit 20 M.-% behandelte Reihe zeigt mit partiell höheren max. Scherspannungen einen gering höheren Scherwinkel  $\varphi$  von  $39,8^\circ$  mit einer Kohäsion  $c$  von  $5,0 \text{ kN/m}^2$  als die mit 5 M.-% B500 behandelte und 1d konsolidierte Reihe ( $\varphi=38,8^\circ$  bzw.  $c=6,2 \text{ kN/m}^2$ ).

### 11.2.5 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Analog der zuvor beschriebenen Reihen zeigen auch hier die mit 20 M.-% B 300 behandelten Versuchsreihen deutlich kürzere Scherwege bis zum Erreichen der max. Scherspannung  $T$ , wobei hier die Scherweg-Scherspannungslinien der mit 5 M.-% behandelten und 1 d konsolidierten Versuchsreihe in den Spannungsstufen  $\sigma=150$  und  $200 \text{ kN/m}^2$  ähnlich steile Verläufe ausweist. Die 2 d konsolidierten und mit 5 M.-% behandelten Versuche weisen in den untersuchten Normalspannungsstufen einen Bruch der Scherweg-Schubspannungslinien aus (vgl. 2 d konsolidierte BK- bzw. B300-Versuchsreihe), der im Bereich  $w < 2 \text{ mm}$  eintritt. Nach dem Bruch ist wieder ein kontinuierlicher Zuwachs der Schubspannungen über den Scherweg  $w$  zu beobachten.

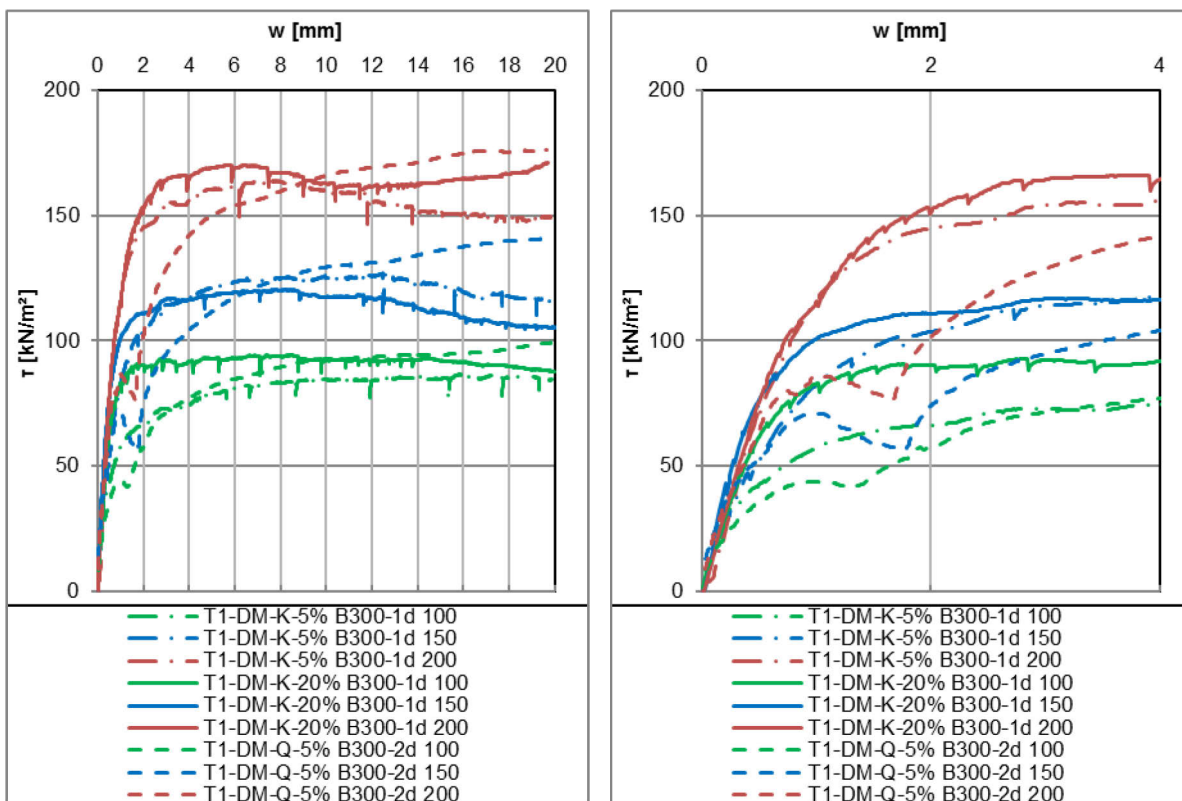


Abb. 11.5: T1-B300 – l.: w-T,  $x_{\max}=20 \text{ mm}$ , r.: w-T,  $x_{\max}=4 \text{ mm}$ .

Die 1 d konsolidierten und mit B300 behandelten Reihen zeigen Gesamtscherfestigkeiten  $\phi_G$  von  $39,8$  bzw.  $40,4^\circ$  bei Scherwinkeln  $\phi$  von  $37,6$  bzw.  $37,4^\circ$  mit einer Kohäsion  $c$  von  $10,2$  bzw.  $13,9 \text{ kN/m}^2$ . Die 2 d konsolidierte und mit 5 M.-% behandelte Reihe zeigt eine Gesamtscherfestigkeit  $\phi_G$  von  $42,5^\circ$ . Der Scherwinkel  $\phi$  von  $37,6^\circ$  mit einer Kohäsion  $c$  von  $23,6 \text{ kN/m}^2$  (vgl. Abb. 11.5 und Tab. 11.1).

### 11.2.6 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Die Scherweg-Schubspannungslinien der mit CEM I behandelten Reihen zeigen bei den mit 5 % CEM I angemischten Versuchen im Gegensatz zu den mit 20 % angemischten Reihen, eine nach Anstieg bis zur max. Scherspannung bei ca. 5 mm Scherweg, konstante, bei den Normalspannung 150 und 200 kN/m<sup>2</sup> daran etwas rückläufige Scherspannungen über den Scherweg. Die mit 20 M.-% behandelten Versuche zeigen die max. Scherspannung bereits bei einem Scherweg von < 2 mm mit sehr ausgeprägten Spannungsspitzen, da sich anschließend stark rückläufige Scherspannungen bis Versuchsende zeigen – besonders ausgeprägt bei den Normalspannungen 150 und 200 kN/m<sup>2</sup> (vgl. Abb. 11.6 und Tab. 11.1).

Bei der 2 d konsolidierten und mit 5 M.-% behandelte Versuchsreihe<sup>16</sup> zeigen sich insbesondere bei den oberen beiden Spannungsstufen ausgeprägte Brüche im Kurvenverlauf, die bei einem Scherweg < 2 mm zu identifizieren sind, woran sich eine steiler Anstieg zur max. Scherspannung anschließt, die nach ca. 6 mm Scherweg erreicht ist bzw. danach noch minimal ansteigt und damit von den zuvor beschriebenen Kurvenverläufen der behandelten und 2 d konsolidierten abweicht.

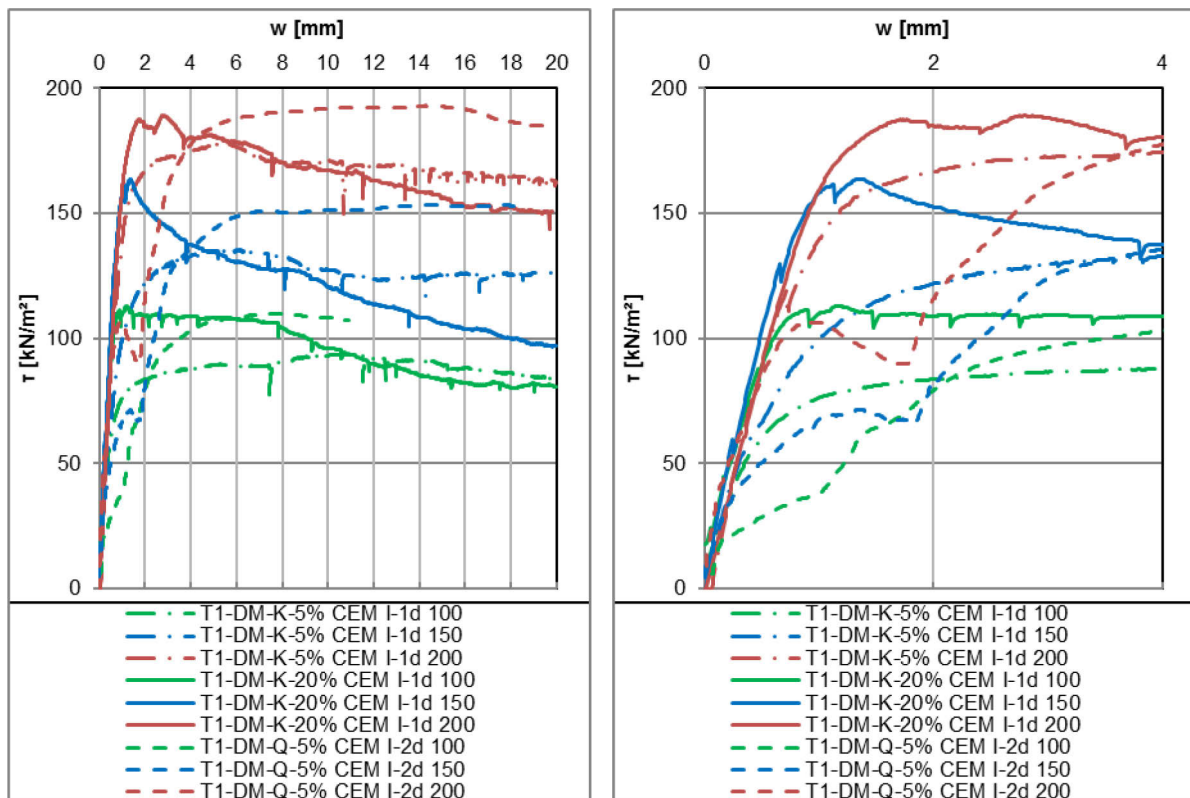


Abb. 11.6: T1-CEM I – l.: w-T,  $x_{max}=20$  mm, r.: w-T,  $x_{max}=4$  mm.

<sup>16</sup> T1-DM-Q-5% CEM I-2d 100 wurde aufgrund eines Einstellungsfehlers lediglich bis ca. 11 mm Scherweg untersucht.

Bei den Normalspannungen 100 und 200 kN/m<sup>2</sup> werden etwa die gleichen max. Schubspannungen erreicht wie bei der mit 20 M.-% CEM I behandelten Reihe (vgl. Abb. 11.6 und Tab. 11.1). Die Reihen T1-DM-K-5% CEM I-1d und T1-DM-K-20% CEM I-1d zeigen Scherwinkel  $\varphi$  von 40,1 bzw. 37,3° mit einer Kohäsion  $c$  von 9,4 bzw. 41,4 kN/m<sup>2</sup>. Die Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  belaufen sich auf 42,0 bzw. 45,5°. Die mit 5 M.-% behandelte und 2 d konsolidierte Reihe weist ebenfalls ähnlich hohe Werte aus mit einem Scherwinkel  $\varphi$  von 39,7° und einer Kohäsion  $c$  von 27,6 kN/m<sup>2</sup>. Die Gesamtscherfestigkeit  $\varphi_G$  beträgt 45,0° (vgl. Tab. 11.1).

### 11.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Scherversuche

Die über die Dauer von 1d konsolidierten Versuchsreihen des T1, welche mit 5 bzw. 20 M.-% Bindemittel behandelt wurden zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihres Scherverhaltens. Betrachtet man die Scherweg-Schubspannungslinien, zeigen sich bei den mit 20 M.-% behandelten Reihen steilere bzw. sprunghafte Anstiege der Scherspannung über den Scherweg bis zum Erreichen der max. Scherspannung. Besonders deutlich zu sehen ist dies bei den Versuchen der mit CEM I behandelten Probenkörper, die einen Rückgang der Scherspannung nach dem Peak (max. Scherspannung) ausweisen. Die mit 5 M.-% behandelten Versuchsreihen zeigen dagegen keine Spannungsspitzen.

Tab. 11.1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherversuche.

Versuchsreihe	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Scherwinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_G$ [°]	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]
	$\sigma=100$	$\sigma=150$	$\sigma=200$					
	max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-K1-1d	67,5	100,2	140,9	36,3	-7,2	0,996	34,6	0,998
T1-K2-1d	72,0	109,3	130,2	30,2	16,5	0,995	34,4	0,991
T1-Q1-1d	82,0	118,9	155,0	36,1	9,2	0,974	34,4	0,991
T1-DM-K-10% LP-1d	73,1	108,8	151,6	38,1	-6,6	0,997	36,7	0,999
T1-DM-K-20% LP-1d	80,2	101,4	148,3	34,3	7,8	0,955	36,1	0,999
T1-DM-K-5% B500-1d	86,5	126,8	166,8	38,8	6,2	1,000	40,1	1,000
T1-DM-K-20% B500-1d	89,6	127,8	173,0	39,8	5,0	0,989	40,9	0,999
T1-DM-Q-5% B500-2d	84,2	144,6	181,4	44,2	-9,2	0,981	42,5	0,994
T1-DM-K-5% B300-1d	86,7	126,9	163,8	37,6	10,2	0,999	39,8	0,999
T1-DM-K-20% B300-1d	94,5	120,5	171,0	37,4	13,9	0,967	40,4	0,991
T1-DM-Q-5% B300-2d	99,5	141,1	176,4	37,6	23,6	0,998	42,5	0,994
T1-DM-K-5% BK-1d	87,7	120,9	163,5	38,8	6,2	1,000	39,4	0,998
T1-DM-K-20% BK-1d	86,9	134,3	167,0	38,7	9,3	0,989	40,6	0,997
T1-DM-Q-5% BK-2d	97,8	140,1	175,6	37,9	21,1	0,997	42,3	0,995
T1-DM-K-5% CEM I-1d	93,9	135,5	178,2	40,1	9,4	1,000	42,0	0,999
T1-DM-K-20% CEM I-1d	113,1	163,5	189,2	37,3	41,1	0,966	45,5	0,981
T1-DM-Q-5% CEM I-2d	110,0	153,4	193,1	39,7	27,6	0,999	45,0	0,994

Zu beobachten ist weiter, dass die mit 5 M.-% Mischbindemittel (B300 bzw. B500) bzw. Bindemittel (BK) behandelten und über 2 d konsolidierten Versuchsreihen höhere Schubspannungen

im Versuchsverlauf ausweisen als die mit 5 und 20 M.-% behandelten und über 1 d konsolidierten Versuchsreihen. Weiter wurden diese Schubspannungen aber nur mit dem maximalen Weg  $w$  des Schergerätes erreicht. Zusätzlich zeigen sich in den Scherweg-Scherspannungslinien der über 2 d konsolidierten Versuchen Brüche dieser bei einem Scherweg von  $< 2,0$  mm.

Die Versuchsreihen T1-K1-1d, T1-DM-K-10% LP-1d und T1-DM-Q-5% B500-2d zeigen infolge der Berechnungen des Scherwinkel  $\varphi$  und der Kohäsion  $c$  auf Grundlage der max. erreichten Scherspannungen eine negative Kohäsion.

Die mit CEM I behandelten Versuchsreihen zeigen mit Abstand die höchsten max. Scherspannungen innerhalb der gewählten Laststufen und weisen damit Scherwinkel  $\varphi$  von  $37,3$  bis  $40,1^\circ$  mit Kohäsionen  $c$  von  $9,4$  bis  $41,1$  kN/m<sup>2</sup> aus. Die Gesamtscherfestigkeiten  $\varphi_G$  belaufen sich auf  $42,0$  bis  $45,0^\circ$ .

Vergleicht man die Scherversuche am Torf 1 mit den Kompressionsversuchen an diesem lassen sich Korrelation zum gewählten Binde- bzw. Mischbindemittel herstellen. Besonders die mit 20 M.-% CEM I behandelte Versuchsreihe zeigt deutliche Spannungsspitzen in den Scherweg-Scherspannungsdiagrammen. Daraus zu schließen ist, dass eine Erhöhung der Dauer der Vorlast vermutlich noch ausgeprägtere Spannungsspitzen ähnlich der Kompressionsversuche verursacht hätte.

Zusammenfassend lässt sich darstellen, dass mit einem steigenden Anteil an Bindemittel – hier 5 und 20 M.-% – der „Aufgleitwinkel“ infolge der Konditionierung erhöht wird. Des Weiteren wird mit dem „Faserverbund“ des organischen Bodens, der bereits einen inneren Zusammenhalt (Kohärer), d.h. als Kohäsion wirksam ist, die mit einem Kontaktverbund mit dem Bindemittel nochmals verstärkt wird. Damit wird der Scherwinkel der Gesamtscherfestigkeit  $\varphi_G$  von ca.  $35^\circ$  auf bis zu  $>45^\circ$  erhöht<sup>17</sup>.

Mit der Konditionierung ist auch mit steigendem Bindemittelanteil ein „spröderes“ Materialverhalten verbunden, das sich mit der Peak-Form in der Scherweg-Scherspannungs-Beziehung und einer starken Abnahme auf die Restscherfestigkeit darstellt. Dies ist mechanisch anschaulich und begründet.

Im Ergebnis wird von den vorliegenden Ergebnissen – auch wenn sie nicht im gleichem Umfang wie zur Kompressibilität in dieser Arbeit berücksichtigt werden konnten – die sehr positive Beeinflussung der Scherfestigkeit infolge Konditionierung bestätigt. Darin liegt auch ein großes Potential für die Beeinflussung von verflüssigungsgefährdeten organischen Böden oder Böden, die infolge ihrer Geologie und Lage als rutsch- oder gleitgefährdet einzustufen sind. Daran können sich weitere Forschungen, die insgesamt breiter und tiefer zur Erforschung der Scherparameter angelegt sind, anschließen.

---

<sup>17</sup> Anmerkung: Eine Beurteilung der Scherfestigkeit aus Reibung und Kohäsion ist nur am Scherwinkel der Gesamtscherfestigkeit  $\varphi_G$  möglich.



## 12 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Stoffverhalten von konditionierten Mehrphasengemischen mit organischen Bestandteilen, in Form von Torfen als Basisboden, mit Oedometerversuchen zur Kompressibilität untersucht. Einen weiteren Schwerpunkt der vorgelegten Arbeit stellt die Entwicklung/Beeinflussbarkeit der Scherfestigkeit dar, die unter Zugabe verschiedener Bindemittel bzw. Zugabemengen dieser untersucht wurde.

Die Grundlagenversuche ergaben, dass allein der Glühverlust  $V_{gl}$  respektive der natürliche Wassergehalt  $w_n$  eines Bodens keine konkreten bzw. direkten Rückschlüsse über die Möglichkeit und das Ergebnis zu einer Stabilisierung mit hydraulischen Bindemitteln zulassen. Zudem zeigen die Untersuchungen bspw. bezüglich des organischen Anteils (Glühverlust  $V_{gl}$  zu Humusanteil ( $C_{org} \cdot 1,72 [-]$ ), vgl. Abschn. 6.3.6) der Versuchstorfe erhebliche Abweichungen untereinander.

Entscheidend für die Anwendbarkeit von Stabilisierungen der untersuchten Böden sollten daher nur Versuche in Form von Kompressions-, Scher- und Triaxialversuchen sein.

Die Ergebnisse – abzuleiten aus den Spannungsspitzen der  $E_{Oed}$ -Graphen bzw. den teilweise sehr geringen Setzungen – zeigen, dass das Abbinden des Bindemittels unter Auflast (Haltedauer der Anfangsspannung („Vorlast“)) einen deutlich höheren Stabilisierungseffekt zu Folge hat als ohne Auflast bzw. in Abhängigkeit von der Dauer der aufgetragenen Vorlast steht. Zurückgeführt wird dieses Ergebnis auf die Zementsteinbildung, in den durch die Belastung hervorgerufenen kleineren Poren sowie eine Verstopfung dieser Porenräume, womit ein Abbindevorgang unter verbesserten Bedingungen generiert wird. Der Aufbau eines bodenunabhängigen Tragskelettes aus Zementstein war mit den zugegebenen Bindemittelmengen nicht möglich.

Weiter zeigen die Versuche, dass Steigerungen des Steifemoduls gegenüber den unbehandelten Versuchstorfen mit den hier untersuchten Zugabemengen an Bindemittel von  $> 1.000$  (T1 bis T3) bis  $> 25.000$  % (T1) mit Modulen  $E_{Oed}$  in den relevanten Spannungsbereichen von  $> 20$  MN/m<sup>2</sup> (T1 bis T3) bis zu 150 MN/m<sup>2</sup> (T1) (vgl. Abschn. 9 und A. 7) erreichbar sind und damit infolge der exponentiellen Steigerung der Festigkeit ein HLBB herstellbar ist, der zum Vergleichsboden (weicher Schluff) vergleichbare bis deutlich höhere Steifigkeiten erzielt. Ferner zeigten die Langzeitversuchsreihen der mit CEM I stabilisierten Torfe 1 bis 3 (T1 bis 3-DM-20% CEM I-7d 25-170d) keinen Zusammenbruch der Bodenmatrix beispielsweise in Form von plötzlichem Versagen oder eine relevante Abnahme der Steifigkeit. Hingegen wurden nur typische Kriechverformungen gemessen, womit ein duktileres Verhalten des konditionierten Bodens ausgewiesen ist.

Die untersuchten Versuchstorfe zeigen zudem mit natürlichen Wassergehalten  $w_n$  von ca. 100 bis 220 M.-% (natürliche Wasseranteile  $w_{An} \sim 50$  bis 70 M.-%) im internationalen Vergleich noch sehr geringe Werte und werden in Anbetracht der gemessenen Glühverluste bzw. Aschegehalte international noch nicht als Torfe klassifiziert (vgl. Abschn. 5.7 und 5.8).

Die Eigenschaften der stabilisierten Torfe sollten zudem in Feldversuchen weitergehend untersucht werden, um die festgestellten Ergebnisse zu bestätigen bzw. Labor-Feld-Korrelationen auszuarbeiten.

Die Untersuchungen zeigen weiter, dass ähnlich strukturierte Böden bspw. für infrastrukturelle Maßnahmen wie Dammschüttungen (über der Wurzelzone) mit Oedometermodulen von  $E_{Oed} \sim 20$  MN/m<sup>2</sup> in der Regel als Gründung geeignet sind, wenn diese vorher entsprechend den Erfordernissen stabilisiert werden. Anzumerken ist, dass diese hohen Steifigkeiten hier nur bei den mit CEM I behandelten und im Dry-Mixed-Verfahren hergestellten Versuchsreihen festgestellt wurden.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass, wenn diese Böden im Mixed-in-Plant Verfahren behandelt werden, anschließend mit erdbaulichen Methoden (z.B. unter Verwendung von Planierraupen) eingebaut werden, womit diese eine Vorverdichtung erfahren und daran mit hohen statischen Linienlasten (z.B. mit Walzenzügen) endverdichtet werden (bzw. diese Verdichtung dann erst möglich ist), noch höhere Steifigkeiten zu erzielen sind bzw. ergeben sich damit höhere Sicherheiten hinsichtlich der Tragfähigkeit (u. a. der Grundbruch- und Geländebruchsicherheit). Die einzubringenden bzw. möglichen statischen Linienlasten sind abhängig von der Zusammensetzung des Bodengemisches und müssen versuchstechnisch ermittelt werden. Ferner sind hier ebenfalls entsprechende Ruhezeiten der zu stabilisierten Bodenmatrix zu beachten und bereits in der Entwurfsphase zu untersuchen und einzuplanen. Dies sind aber die üblichen Nachbehandlungsmethoden und stellen den Standard bei Bodenbehandlungen dar. Überdies können diese Böden auch über in situ-Mischverfahren (MIP) – hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit – nutzbar gemacht werden, wie es die unbelasteten Versuchsreihen zeigen. Hier sind aber auch die mit der Tiefe der Säulen bzw. der stabilisierten Massen wirkenden Überlagerungsspannungen als Einflussfaktor – im Sinne einer Vorbelastung – wirksam und können in der geplanten Anwendung Berücksichtigung finden.

Wie bereits ausgeführt, wurden keine weitergehenden Untersuchungen bezüglich des Scherverhaltens der Wet-Mixed stabilisierten Böden durchgeführt. Die Scherversuche der Dry-Mixed Böden des T1 zeigen jedoch, dass sich durch eine Konditionierung mit einer Bindemittelzugabe (CEM I, B 300/500 und BK) eine deutliche Zunahme der Scherfestigkeit und der Gesamtscherfestigkeit erzielen lässt (vgl. Abschn. 11). Anzumerken ist, dass die Calciumcarbonataufwüchse, welche bei den Kompressionsversuchen der mit Mischbinder bzw. Branntkalk behandelten Versuchsreihen beobachtet wurden (vgl. Abschn. 9.11), im Feld – durch eine Auflockerung/Entfesti-

gung des stabilisierten Bodenkörpers infolge der Aufwüchse (nur bei nicht vorhandener entsprechender Überlagerungsspannung, Überdrückung der Quelldruckspannung  $\sigma_{\text{Quell}}$  notwendig) – einen negativen Einfluss auf das Scherverhalten haben. In den Scherversuchen wurde durch die Calciumcarbonataufwüchse zusätzliche Reibung aktiviert und damit das Scherverhalten positiv beeinflusst. Dies ist bei der Anwendung an unvorbelasteten Böden zu beachten.

Das weitere wissenschaftliche Ziel muss deshalb darin bestehen eine Empfehlung zu entwickeln, die die Verfahrensweise regelt, wie mit Böden mit organischen Bestandteilen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [402] umzugehen ist, auch unter dem Gesichtspunkt der Behandlung mit Bindemitteln, respektive wie die Verwendungsmöglichkeit dieser Böden im Erdbau zu überprüfen ist (vgl. [167] und [403]), um die Grundsätze der Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [402] unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips (Abfallhierarchie nach [402]: a) Vermeidung, b) Vorbereitung zur Wiederverwendung, c) Recycling, d) Beseitigung) umzusetzen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, die Auswirkungen höherer Initialspannungen an ausgewählten Versuchsböden zu erforschen. Dafür sind u. a. großmaßstäbliche Versuche (1:1 [-]) zu empfehlen. Zudem sollte hier das Dränverhalten – aus Konsolidationsvorgängen – der konditionierten Böden genauer erforscht werden. Einen wesentlichen Beitrag zum Tragverhalten liefern deshalb Versuche, die auch eine Konsolidierung in verschiedenen Belastungszuständen und die Effekte der Makro- und Mikrokonsolidierung der in-/anorganischen Feststoffanteile berücksichtigen.

Des Weiteren zeigte, die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte, eingehende Recherche, dass international insbesondere die einaxialen Druckfestigkeiten  $q_u$  von mit Bindemitteln behandelten Böden erforscht werden, die aber bei bindigen Böden mit organischen Bestandteilen und infolgedessen vergleichsweise hohen natürlichen Wasseranteilen, die in der Regel > 50 % der Bodenmatrix füllen, aus Gründen der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse als nicht zielführend/zutreffend betrachtet werden müssen. Natürlich können die  $q_u$ -Werte als Kenngröße verwendet werden, diese spiegeln aber nicht die Komplexität des zeitabhängigen Konsolidationsvorgangs und der spannungsabhängigen Steifigkeiten wider, da diese hier nicht erfasst werden. Die durchgeführten Druckversuche zeigen dies im Vergleich zu den Kompressionsversuchen sehr deutlich (vgl. Abschn. 9 und 10).

Außerdem sollten spezielle Untersuchungsreihen mit höheren Zugabemengen an Bindemittel, auch mit Zugabe von Zuschlag in Form granularer Kornfraktionen (auch RC-Baustoffe im Sinne des KrWG [402]), zum Aufbau eines Korngerüsts in der Bodenmatrix und der zusätzliche Einsatz von Geokunststoffen – als Bewehrungselemente – erfolgen, um die Entwicklung weiterer Hochleistungsbaustoffe von Böden (HLBB) zu fördern.

In den umfangreichen Laboruntersuchungen wurde das Stoffverhalten in den Oedometerversuchen bis zu einer maximal aufgebrauchten Normalspannung von  $\sigma=400 \text{ kN/m}^2$  untersucht. Die

Scherversuche erfolgten mit maximalen Normalspannungen von  $\sigma=200 \text{ kN/m}^2$ . Um Aussagen über das Materialverhalten in höheren Spannungsbereichen treffen zu können, sollten diese Spannungsbereiche ebenfalls untersucht werden, d. h. zum Stoffverhalten konditionierter Böden besteht für darüber hinausgehende Spannungsbereiche ein erheblicher Forschungsbedarf.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden organische Böden untersucht, die in ihrer natürlichen Form generell einen nicht tragfähigen, d. h. keinen ausreichend tragfähigen Baugrund darstellen, damit als Baugrund vollständig ungeeignet sind und auszutauschen oder mit Verfahren des Spezialtiefbaues zu überbrücken sind.

Auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnisse dieser Arbeit wird dies nochmals eindringlich bestätigt und es ist davon abzuraten Böden mit organischen Bestandteilen (organische Böden) einer weiteren Verwendung (als Baustoff) zuzuführen, ohne diese vorher umfangreich untersucht zu haben.

Ferner ist auf Grundlage der Untersuchungen eine Behandlung mit kalkhaltigen Bindemitteln aufgrund der festgestellten Carbonataufwüchse – welche in den Kompressionsversuchsreihen ausgeprägte Hebungen verursachten – nicht ohne eingehende Überprüfung zu empfehlen.

Die Zielsetzung der vorgelegten Arbeit, auch die untersuchten Böden als Baustoff und Baugrund zu verwenden bzw. diese zu einem HLBB zu entwickeln, wurde damit für alle wissenschaftlichen Fragestellungen erreicht. Dadurch können die untersuchten und zu einem HLBB entwickelten Böden auch in höherwertigen Baumaßnahmen, die über eine Verwendung als beispielsweise Lasteinleitungsschicht für technische Bauwerke (vgl. [404]) hinausgehen, d.h. als Gründungselemente des Spezialtiefbaues, Verwendung finden.

# Literaturverzeichnis

## Literatur, Normen, Regelwerke und Gesetze

- [1] H. Höper, „Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren,“ in *TELMA 37*, Hannover, 2007, pp. 85-116.
- [2] J. A. Taylor, „The peatlands of Great Britain and Ireland,“ in *Mires: swamps, bog, fen and moor - regional studies.*, A. J. P. Gore, Hrsg., Amsterdam, Elsevier, 1983, pp. 1-43.
- [3] N. Boylan, P. Jennings und M. Long, „Peat slope failure in Ireland,“ in *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 41, 2008, pp. 93-108.
- [4] R. A. Herrmann, K. Hilmer und H. Kaltenecker, „Die Entwicklung des Bauverfahrens Mixed-in-Place (MIP) auf der Basis der Rotary-Auger-Soil-Mixing-Methode (RASM),“ in *Vorträge der Baugrundtagung 1992 in Dresden*, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., Essen, Glückauf Verlag, 1992, pp. 123-140.
- [5] D. Adam und R. A. Herrmann, Hrsg., 1. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik an der Universität Siegen, Siegen: Eigenverlag, 2011.
- [6] D. Adam und R. A. Herrmann, Hrsg., 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik an der TU Wien, Wien: Eigenverlag, 2012.
- [7] M. Löwen, R. A. Herrmann und H. Görg, „Problemstellungen und Bauverfahren zur Nutzung einer Deponie am Pilotprojekt Inertstoffdeponie Leimbach/Siegen,“ in *2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik an der TU Wien*, Wien, Eigenverlag, 2012, pp. 521-535.
- [8] A. W. Dhowian und T. B. Edil, „Consolidation Behavior of Peats,“ in *Geotechnical Testing Journal Vol. 3, No. 3*, 1980, pp. 105-114.
- [9] T. E. Edil und A. Dhowian, „Analysis of long-term compression of peats,“ in *Geotechnical Engineering, Vol. 10*, 1979.

- [10] P. J. Fox, T. B. Edil und L.-T. Lan, „Ca/Cc Concept Applied to Compression of Peat,“ in *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, Issue 8, 1992, pp. 1256-1263.
- [11] F. Colleselli, G. Cortellazzo und S. Cola, „Laboratory Testing of Italian Peaty Soils,“ in *Geotechnics of High Water Content Materials*, ASTM STP 1374, T. B. Edil und P. J. Fox, Hrsg., West Conshohocken, ASTM, 2000.
- [12] M. C. McVay und D. Nguyen, Evaluation of Embankment Distress at Sanders’s Creek – CR 20, Final Report, Florida, USA, 2004.
- [13] C. J. Candler und F. R. D. Chartres, „Settlement and analysis of three trial embankments on soft peaty ground.,“ in *Proceeding 2nd Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 1, Tallin, 1988, pp. 268-272.
- [14] M. Kitazume und M. Terashi, The Deep Mixing Method, London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [15] G. Maybaum, P. Mieth, W. Oltmanns und R. Vahland, Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau, Baugrund – Baugruben – Baugrundverbesserung – Pfahlgründung – Grundwasserhaltung, 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [16] U. Smolczyk und K. Hilmer, „Baugrundverbesserung,“ in *Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, 5. Auflage*, U. Smolczyk, Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn Verlag für Architektur und techn. Wiss., 1996, pp. 1-107.
- [17] W. Sas und E. Malinowska, „Surcharging as a method of road embankment construction on organic soils, Paper Numer: 403,“ in *IAEG2006, Engineering geology for tomorrow's cities, The 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom, 6-10 September 2006*, T. G. S. o. London, Hrsg., London, Eigenverlag, 2006.
- [18] W. Sondermann und K. Kirsch, in *Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 7. Auflage*, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst & Sohn, 2009.
- [19] C. Ladd, „Use of precompression and vertical sand drains for soil stabilisation of foundations soils,“ in *Soil and Site Improvement, Continuing Education in Engineering*, California, USA, University of California, 1976.
- [20] EAU, Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen, EAU 2004, 10. Auflage, A. ". d. H. e. V., Hrsg., Berlin: Ernst und Sohn, 2004.

- [21] FGSV Merkblatt 542, (zurückgez.) Merkblatt über Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund, FGSV 542, F. f. S. u. V. e. V. (FSGV), Hrsg., Köln: FSGV Verlag, 1988.
- [22] DIN EN 15237, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Vertikaldräns, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2007.
- [23] E. Koda, A. Szymanski und W. Wolski, Laboratory tests on Geodrains – Durability in organic soils; Seminar on Laboratory Testing of Prefabricated Band-Shaped Drains, Milan, 1986.
- [24] R. A. Barron, „Consolidation of fine-grained soils by drain wells,“ in *Transactions of ASCE*, Vol. 113, 1948, pp. 718-742.
- [25] S. Hansbo, „Consolidation of fine grained soils by prefabricated drains,“ in *Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, Stockholm, 1981, pp. 667-682.
- [26] B. Indraratna, R. C., V. Wijeyakulasuriya, G. McIntosh und R. Kelly, „Soft soils improved by prefabricated vertical drains: performance and prediction,“ in *Symposium on New Techniques for Design and Construction in Soft Clays 2010*, Brasilien, 2010, pp. 227-246.
- [27] H. Nakada, K. Akimoto, H. Kanazawa, Y. Tsuji und M. Inada, „Haneda Airport offshore expansion projekt,“ in *Proceedings of the ICE - Civil Engineering 120 (3)*, 1997, pp. 90-100.
- [28] N. Sidak und G. Strauch, „Herstellung geotextilummantelter Kiessäulen mit Keller-Tiefenrüttler,“ in *4. Österreichische Geotechniktagung, Österreichischer Ingenieur- u. Architektenverein*, Wien, 2003, pp. 415-435.
- [29] A. Herth und E. Arndts, „Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung,“ 3. Auflage Hrsg., Berlin, München, Düsseldorf, Wilhelm Ernst und Sohn, 1994.
- [30] LfU, UmweltWissen – Natur, Kompost nutzen, Moore schützen, 3. Auflage Hrsg., B. L. f. U. (LfU), Hrsg., Augsburg, 2017.
- [31] S. Ratering, W. Heinrichs, M. Heitkemper, S. Schnell, D. Thalmann und W. U., Zusammenfassender Bericht der Untersuchungen zum mikrobiellen Abbau von organischen Substanzen im Boden, nicht veröffentlicht, Giessen: Eigenverlag, 2009.

- [32] D. Wendel, „Autogene Regenerationserscheinungen in erzgebirgischen Moorwäldern und deren Bedeutung für Schutz und Entwicklung der Moore (Textteil), Dissertation,“ T. U. Dresden, Hrsg., 2010.
- [33] R. A. Herrmann, „Untersuchungen und Bewertungen zum Einfluss der Mineralisierung humoser Böden,“ in *2. Sachverständigenkolloquium RWE Power AG, Schloss Paffendorf, Bergheim-Paffendorf, Eigenverlag, 2015.*
- [34] H. Matthiesen, „Detecting and quantifying ongoing decay of organic archaeological remains: A discussion of different approaches,“ in *Quaternary International, New York, Elsevier, 2015, pp. 43-50.*
- [35] C. Klingenuß, D. Möller, C. Heller, T. Thrum, K. Köberich und J. Zeitz, „Abschlussbericht – Berliner Moorböden im Klimawandel – Entwicklung einer Anpassungsstrategie zur Sicherung ihrer Ökosystemleistungen – Forschungsprojekt im Umweltentlastungsprogramm II Berlin,“ H. z. Berlin, Hrsg., Berlin, 2015.
- [36] S. Schnell, „Mikrobiologische Aktivitäten bei der Mineralisierung humoser Böden,“ in *2. Sachverständigenkolloquium RWE Power AG, Schloss Paffendorf, Berheim-Paffendorf, Eigenverlag, 2015.*
- [37] L. Menard, „La consolidation dynamique des sols de foundation,“ in *JTBTP, 1974.*
- [38] D. Kolymbas, Geotechnik – Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 4. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [39] Bauer Maschinen GmbH, Bauer Dynamische Bodenverdichtung – BDC, Schrobenhausen: Eigenverlag, 2017.
- [40] H. Brandl, „Dynamische Intensivverdichtung beim Autobahnknoten Eben,“ in *Schriftenreihe "Straßenforschung" des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1994/1995.*
- [41] K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach und K. J. Beckmann, Grundlagen des Bauingenieurwesens, K. Zilch, R. Katzenbach, Diederichs und K. J. Beckmann, Hrsg., Heidelberg: Springer, 2013.
- [42] R. A. Beine, Verdichtungswirkung der Fallmasse und Lastausbreitung in nichtbindigem Boden bei der dynamischen Intensivverdichtung, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen. Serie Grundbau, Band 11, Bochum, 1986.



- [43] W. Wehr und T. U., „Baugrundverbesserung,“ in *Handbuch Geotechnik, Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen, 1. Auflage*, C. Boley, Hrsg., Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2012, pp. 469-542.
- [44] Terra-Mix, Impulsverdichtung System Terra-Mix, Die wirtschaftliche Alternative in der Bodenverbesserung, n.a.: n.a., n.a..
- [45] F.-J. Falkner, C. Adam, I. Paulmichl, D. Adam und J. Fürpaß, „Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden - Innovative Gerätetechnik, numerische und experimentelle Untersuchungen, Anwendung,“ in *Beiträge zum 25. Christian Veder Kolloquium, Neue Entwicklungen in Gerätetechnik, Ausführung und Berechnung, Heft 38, Technische Universität Graz*, D. M. e. al., Hrsg., Graz, Eigenverlag, 2010.
- [46] C. Adam, D. Adam, F.-J. Falkner, I. Paulmichl und J. Fürpaß, „Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden,“ in *1. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik an der Universität Siegen*, D. Adam und R. Herrmann, Hrsg., Siegen, Eigenverlag, 2011.
- [47] G. Strauch, „Bodenverbesserungsverfahren,“ in *Bohrhandbuch*, B. u. S. VÖBU – Verband Österreichischer Bohr-, Hrsg., Wien, 2012.
- [48] Cofra, <http://cofra.com/activities/rapid-impact-compaction/>; letzter Aufruf: 08.08.2016, 2016.
- [49] Menard GmbH, Effiziente und nachhaltige Baugrundverbesserung, Seevetal.
- [50] J. Chu und S. W. Yan, „Application of the Vacuum Preloading Method in Soil Improvement Projects, Elsevier Geo-Engineering Book Series, Volume 3,“ in *Ground Improvement – Case Histories*, London, UK, Elsevier, 2005.
- [51] J. F. E. Osorio und B. O’Kelly, „Peat improvement under vacuum preloading: A novel approach for bog roads in Ireland,“ in *Proceedings, Joint Symposium an Bridge and Infrastructure Research in Ireland and Concrete Research in Ireland, Cork, 2nd-3rd September, Vol. 1*, 2010, pp. 255-262.
- [52] E. R. Farrel, B. C. O’Kelly und J. P. Osorio-Salas, „Vacuum Consolidation in Peat,“ in *Invited Presentation (Continuing Professional Development Lecture), Geotechnical Society of Ireland, Institution of Engineers of Ireland (Engineers Ireland)*, Dublin, Ireland, Eigenverlag, 2012.

- [53] W. Kjellmann, „Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, Proc. Conf. Soil Stabilization, Mass. Inst. Techn. Univ. Cambridge,“ 1952, p. 258.
- [54] S. M. Woo, Z. C. Moh, A. F. van Weele, R. Chotivittayathanin und T. Trangkarahart, „Preconsolidation of soft Bangkok Clay by Vacuum Loading combined with Non-Displacement Sand Drains,“ in *Proceedings, XII Int'l Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg. Vol. 2*, Rio de Janeiro, Brasilien, Eigenverlag, 1989, pp. 1431-1434.
- [55] J. Chu, S. Yan und B. Indraratna, „Vacuum Preloading Techniques - Recent Developments and Applications,“ in *GeoCongress 2008, New Orleans, Geosustainability and Geohazard Mitigation GPS 178*, Reddy, KR, Khire, MV, Alshawabkeh, AN (eds), New Orleans, 2008, pp. 586-595.
- [56] B. Indraratna, 2009 E. H. Davis Memorial Lecture: Recent Advances in the Application of Vertical Drains and Vacuum Preloading in Soft Soil Stabilisation, A. G. Society, Hrsg., St Ives, NSW, Australien: Eigenverlag, 2009.
- [57] EBGEO, Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), 2. Auflage, D. G. f. G. (DGGT), Hrsg., Berlin: Ernst & Sohn, 2010.
- [58] S. Althoff, H. Klapperich und Tamaskovics, Beitrag zum Verbundverhalten von Geokunststoffen in bindigen Böden mit Bindemittelverbesserung, Technische Universität Bergakademie Freiberg, VSVI Seminar 2011, Münster, 2011.
- [59] DIN EN 14679, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Tiefreichende Bodenstabilisierung; Deutsche Fassung, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2005.
- [60] DIN 4093, Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2015.
- [61] M. Topolnicki, „In situ soil mixing,“ in *Ground Improvement, 2nd Edition*, M. P. Moseley und K. Kirsch, Hrsg., London, Spon Press, Taylor and Francis Group, 2004, pp. 331-428.
- [62] M. E. C. Bruce, R. R. Berg, J. G. Collin, G. M. Filz, M. Terashi und D. S. Yang, Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and

Foundation Support, O. o. T. M. F. H. Administration, Hrsg., Washington D. C., USA, 2013.

- [63] H. Ahnberg, Strength of Stabilised Soils– A laboratory study on clays and organic soils stabilised with differenttypes of binder, Report 72, Swedish Geotechnical Institute, Linköping: KFS i Lund AB, 2006.
- [64] D. Bruce, An introduction to the deep mixing methods as used in geotechnical applications. Volume III. The verification and properties of treated ground. Report No. FHWA-RD-99-167, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2001.
- [65] M. Gotoh, „Study on soil properties affecting the strength of cement treated soils. Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo 1996, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, May 1996,“ Tokio, Japan, 1996, pp. 399-404.
- [66] R. M. Babasaki, T. Terashi, A. Susuki, M. Maekaea und E. Kawamura, „JGS TC Report: Factors Influencing the Strength of Improved Soil. Grouting and Deep Mixing, Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing, May 1997,“ Tokio, Japan, 1996, pp. 913-918.
- [67] A. Dehghanbanadaki, K. Ahmad, N. Ali, M. Khari, P. Alimohammadi und N. Latifi, „Stabilization of Soft Soils with Deep Mixed Sois Columns – General Perspective,“ in *EJGE, Vol. 18, Bund. A* , 2013.
- [68] Keller Grundbau GmbH, „Tiefreichende Bodenstabilisierung: Bodenverbesserung durch Bodenmischverfahren, Prospekt 32-01 D,“ K. G. GmbH, Hrsg., Offenbach, Eigenverlag, n.a..
- [69] BAUER, SMW: Soil Mixing Wall-Verfahren, PI 39 d, 03/2012, B. M. GmbH, Hrsg., Schrobenuhausen: Eigenverlag, 2012.
- [70] Keller Grundbau GmbH, „<http://www.kellergrundbau.de/de/tubular-soil-mixing.html>,“ 19 Februar 2017. [Online].
- [71] EuroSoilStab, Design Guide Soft Soil Stabilisation, Development of design and construction methods to stallise soft organic soils, Design Guide Soft Soil Stabilisation, CT97-0351, Project no.: BE96-3177, Ministry of Transport Public Works and Water Management, 1997.

- [72] Cement Deep Mixing Association, „Cement Deep Mixing Method (CDM), Design and Construction Manual,“ 1999.
- [73] Research Department of the Iowa State Highway Commission, Soil-Cement Stabilization, Part 1, Materials and Construction, Iowa Highway Research Board Project HR-75, 1962.
- [74] FGSV Merkblatt 560, Merkblatt über die Behandlung von Böden und Baustoffen mit Bindemitteln zur Reduzierung der Eluirbarkeit umweltrelevanter Inhaltsstoffe, FGSV 560, F. f. S. u. V. (FGSV), Hrsg., Köln: FGSV Verlag, 2009.
- [75] DIN EN 12716, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau), Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2001.
- [76] Bauer Maschinen GmbH, HDI – Bauer Hochdruckinjektion, Schrobenhausen, 2017.
- [77] H.-P. Blume, G. W. Brümmer, R. K. E. Horn, I. Kögel-Knaber, R. Kretschmar, K. Stahr und B.-M. Wilke, Scheffer / Schachtschabel – Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage., Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- [78] J. Fiedler und H. Reissig, Lehrbuch der Bodenkunde, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 1964.
- [79] H. Kuntze, J. Niemann, G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger, Bodenkunde, 2. Auflage, Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1981.
- [80] S. A. Waksman, Humus, Baltimore: Williams and Wilkins, 1936.
- [81] E. J. Russel, Boden und Pflanze, Dresden, Leipzig: Theodor Steinkopff, 1936.
- [82] R. Neumann, „Geologie für Bauingenieure,“ Berlin, München, Verlag von Wilhem Ernst und Sohn, 1964.
- [83] A. Claussen, „Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser,“ in *Grundbau-Taschebuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage*, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 2008, pp. 219-242.
- [84] W. Kubiena, Entwicklungslehre des Bodens, Wien, 1948.
- [85] J. di Gleria, „Die Bodenbestandteile mineralischen und organischen Ursprungs und deren Eigenschaften,“ in *Bodenphysik und Bodenkolloidik*, Jena, VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 1962.

- [86] K. Gabrys und A. Szymanski, „The analysis of consolidation in organic soils,“ in *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation No 42 (2), Department of Geotechnical Engineering*, Warschau, Polen, Eigenverlag Department of Geotechnical Engineering, 2010.
- [87] A. Kezdi, *Handbuch der Bodenmechanik, Band 1, Bodenphysik*, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1969.
- [88] M. Goldscheider, *Baugrund und historische Gründungen; Untersuchen, Beurteilen, Instandsetzen*, F. Wenzel und J. Kleinmanns, Hrsg., Karlsruhe: Sonderforschungsbereich 315: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Bauegefüge, Konstruktionen, Werkstoffe, Universität Karlsruhe (TH)., 2003.
- [89] P. Hoering, *Moornutzung und Verwertung mit besonderer Berücksichtigung der Trockendestillation*, Anastatischer Neudruck, Berlin: Julius Springer, 1915.
- [90] G. Grosse-Brauckmann, zur Terminologie organogener Sedimente. *Geol. Jb. (79)*, 1961, pp. 117-144.
- [91] R. Meier-Uhlherr, C. Schulz und V. Luthardt, *Steckbrief Moorsubstrate*, Stand: April 2011, H. f. n. E. (. E. (. Eberswalde), Hrsg., Eberswalde, 2015.
- [92] DIN EN ISO 14688-1, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017)*; Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018, D. B. (NABau), Hrsg., Berlin: Beuth, 2018.
- [93] AD-HOC-Arbeitsgruppe Boden, *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage, B. f. G. u. Rohstoffe, Hrsg., Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2005.
- [94] C. Hinze, H. Jerz, B. Menke und H. Staude, *Geogenetische Definitionen quartärer Lockergesteine für die Geologische Karte 1 : 25 000 (GK 25)*, Reihe A, Heft 112, B. f. G. u. R. u. G. L. i. d. B. Deutschland, Hrsg., 1989.
- [95] W. Baden, H. Kuntze, J. Niemann, G. Schwerdtfeger und F.-J. Vollmer, *Bodenkunde – Lehrbuch für Ingenieurschulen*, Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 1969.
- [96] H. Kuntze, G. Roeschmann und G. Schwerdtfeger, *Bodenkunde*, 5. Auflage, Stuttgart: Ulmer, 1994.
- [97] W. E. H. Blum, *Bodenkunde in Stichworten*, 7. Auflage, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2012.

- [98] DIN 4047-4, Landwirtschaftlicher Wasserbau - Teil 4: Begriffe, Moore und Moorböden, D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1998.
- [99] F. Brüne, Die Praxis der Moor und Heidekultur – Leitfaden für Landwirte und Kulturtechniker, Berlin: Verlag von Paul Parey in Berlin und Hamburg, 1948.
- [100] R. Brinkmann, Abriss der Geologie – Erster Band: Allgemeine Geologie. 10. Auflage, Bd. 1, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1967.
- [101] G. Schröder, Landwirtschaftlicher Wasserbau, 4. Auflage, Handbibliothek für Bauingenieure, Ein Hand- u. Nachschlagebuch für Studium u. Praxis, Berlin: Springer, 1968.
- [102] K. Dierßen, „Die Entstehung von Mooren – Typisierung und Prozesse,“ in *Klimaschutz und Naturschutz, NNA Berichte, 13. Jahrgang, Heft 2*, A. T. A. f. Naturschutz, Hrsg., Schneverdinge, 2000.
- [103] DIN 19368-19, „(zurückgez.) Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Teil 19: Bestimmung der Moorsackung nach Entwässerung,“ A. I. 7. u. -. Normenausschuß Wasserwesen (NAW), Hrsg., Berlin, Beuth, 1997.
- [104] M. Fleischer, Mitteilungen über die Arbeit der Moor-Versuchsstation in Bremen. 1. bis 3. Bericht Landw. Jahrbücher, Berlin, 1883, 1886, 1891.
- [105] Tacke und Keppler, Die niedersächsischen Moore und ihre Nutzung. 2. Auflage, Oldenburg, 1941.
- [106] NABU, „Schutz und Entwicklung unserer Moore – Zum Nutzen von Mensch, Natur und Klima, NABU-Bundesverband, 2. aktualisierte Auflage 01/2013,“ NABU, Hrsg., Berlin, 2013.
- [107] M. Sommer, „Institut für Bodenlandschaftsforschung, Zalf, Münchenberg“.
- [108] K. Bülow, Geologie für Jedermann – Eine erste Einführung in geologisches Denken, Arbeiten und Wissen, 8. Auflage, Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung, 1964.
- [109] F. Brüne, Der Kalkstickstoff als Düngemittel für Hochmoorböden, n.b.: n.b., n.b..
- [110] J. Crouwenberg, Methane emissions from peat soils (organic soils, histosols): Facts, MRV-ability, emission factor, Greifswald, 2009.

- [111] I. Biczók, Untersuchungen der Böden organischen Gehaltes mit Rücksicht auf den Grundbau. Sonderdruck aus "Gedenkbuch für Prof. Dr. J. Jáky", n. a., 1955.
- [112] G. Stadnikoff, Neuere Torfchemie, Dresden und Leipzig: Verlag von theodor Steinkopff, 1930.
- [113] S. Krzack und D. Klinger, „Brennstofftechnische Charakterisierungsmethoden,“ in *Stoffliche Nutzung von Braunkohle*, Berlin, Springer Vieweg, 2018.
- [114] S. Ulrich, Gesteinskunde: Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender, 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [115] U. Förstner und P. Grathwohl, Ingenieurgeochemie: Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [116] G. H. Taylor, M. Teichmüller, A. Davis, C. F. K. Diessel, R. Littke und P. Robert, Organic petrology. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart, Berlin: Gebrüder Bornträger, 1998.
- [117] D. W. van Krevelen, Coal. 3rd ed., Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [118] DIN EN ISO 14688-2, „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-2:2018,“ D. B. (NABau), Hrsg., Berlin, Beuth, 2018.
- [119] W. Fuchs, Die Chemie der Kohle, Berlin: Julius Springer, 1931.
- [120] H. Grasshoff, P. Siedk und R. Floss, Handbuch Erd- und Grundbau, Teil I: Boden und Fels, Gründungen, Stützbauwerke, Düsseldorf: Werner, 1982.
- [121] DIN EN ISO 14688-2, (zurückgez.) Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2004 + Amd 1:2013), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2013.
- [122] DIN 18128, Baugrund; Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Glühverlustes, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2002.
- [123] DIN 4022-1, (zurückgez.) Baugrund und Grundwasser, Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels, Schichtenverzeichnisse für Untersuchungen und

Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1987.

[124] DIN 4022-1, (zurückgez.) Baugrund und Grundwasser, Benennung und Beschreibung von Bodenarten und Fels, Schichtenverzeichnisse für Untersuchungen und Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1969.

[125] DIN EN ISO 14688-1, (zurückgez.) Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002 + Amd 1:2013), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2013.

[126] DIN EN ISO 18196, Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2011.

[127] A. Atterberg, „Die Plastizität der Tone,“ in *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde* 1, 1911, p. 10.

[128] DIN 18122-1, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1997.

[129] DIN 18196, Erdbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1970.

[130] DIN 1054, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, D. D. I. f. N. e. V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2010.

[131] DIN 18196, Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, D. D. I. f. N. e. V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2011.

[132] SN 670004-2b-NA, Nationaler Anhang zur EN ISO 14688-2: 2004, S. V. d. S. u. V. VSS, Hrsg., Zürich: VSS, 2008.

[133] SN 670370a, Böden – organische Beimengungen, S. V. d. S. u. V. VSS, Hrsg., Zürich: VSS, 2008.

[134] P. Siedek und R. Voss, Die Bodenprüfverfahren bei Strassenbauten, Bundesanstalt für Strassenbau, Düsseldorf: Werner-Verlag, 1960.

[135] DIN 19682-12, Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 12: Bestimmung des Zersetzungsgrades der Torfe, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2007.



- [136] L. von Post, „Sveriges geologiska undersoknings torvinventering och nagre av dess hittills vunna resultat,“ in *Svenska mosskulturforeningens tidskrift* 1, 1922, pp. 1-27.
- [137] L. von Post, „Das genetische System der organogenen Bildung Schwedens.,“ in *Comité international de Pédologie. IVème Comm. Pour l'Europe*. 22, 1924, pp. 287-304.
- [138] G. Keppeler, „Bestimmung des Vertorfungsgrades von Moor- und Torfproben,“ in *Mitteilungen des Vereins zur Förderung der Moorkultur im Deutschen Reiche*, Jg. 38, H. 1, 1920, pp. 9-10.
- [139] H. Nowak und H. Niesche, „Beitrag zur Erkundung und Bauklassifizierung organogener Lockergesteine sowie zur erdstatischen Bemessung und Gründung kleiner Erdbauwerke auf Moorstandorten. Dissertation an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock.,“ 1982.
- [140] C. Koepke, Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstat. Berechnungen nach EC 7 / DIN 1054, Diss., Lehrstuhl f. Landeskult. Ingenieurbauwerke und Geotechnik, Universität Rostock, Rostock, 2014.
- [141] K. V. Helenelund, „Helenelund, K. V. (1975): Geotechnical peat investigations. Proceedings of the Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1. Gdansk. Vol. 1.,“ 1975, pp. 105-123.
- [142] TGL 24300/04, (zurückgez.) Fachbereichsstandard. Standortaufnahme von Böden. Gliederung der Moorstandorte, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1985.
- [143] TGL 24300/06, (zurückgez.) Fachbereichsstandard. Standortaufnahme von Böden. Torf- und Muddearten, Zersetzungsgrad der Torfe, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1977.
- [144] VDLUFA, „VDLUFA-Standpunkt–Humusbilanzierung–Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland,“ V. D. L. U. u. F. Hrsg., Speyer, VDLUFA, Selbstverlag, 2014.
- [145] VDLUFA, „VDLUFA Methodenhandbuch,“ in *Band 1–Böden–7. Teillieferung zu Band I*, V. D. L. U. u. F. e.V., Hrsg., Speyer, Selbstverlag, 2016.
- [146] ASTM D 1997:2013, Standard Test Method for Laboratory Determination of the Fiber Content of Peat Samples by Dry Mass, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM.

- [147] ASTM D 2944:2014, Standard Method of Sampling Processed Peat Materials, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2014.
- [148] ASTM D 2974:2014, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2014.
- [149] ASTM D 2976:2015, Standard Test Method for pH of Peat Materials, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2015.
- [150] ASTM D 2980:2017, Standard Test Method for Saturated Density, Moisture-Holding Capacity, and Porosity of Saturated Peat Materials, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [151] ASTM D 4427:2018, Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2018.
- [152] ASTM D 4531:2015, Standard Test Method for Bulk Density of Peat and Peat Products, ASTM, Hrsg., West Conshohocken: ASTM, 2015.
- [153] DIN 18132, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2012.
- [154] H. K. Neff, „Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte,“ in *Bautechnik 65 (1988) H. 5*, Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn Verlag für technische Wissenschaften, 1988, pp. 153-163.
- [155] N. Moris, „Composition of organic materials of peat soils in Peninsular Malaysia,“ in *Recent Developments in Soil Genesis and Classification*, Kuala Lumpur, 1989, pp. 81-87.
- [156] M. J. Andrejko, F. Fiene und A. Cohen, „Comparison of ashing techniques for determination of the inorganic content of peats,“ in *Testing of Peats and Organic Soils. ASTM Spec. Tech. Publ. 820*, M. P. Jarrett, Hrsg., Philadelphia, ASTM, 1983, pp. 5-20.
- [157] Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey, The Canadian System of Soil Classification (CSSC). Agric. Can. Publ. 1646, Ottawa: NRC Research Press, 1987, p. 164 pp..
- [158] A. Landva, E. Korpijaakko und P. Pheaney, „Geotechnical classification of peats and organic soils,“ in *Testing of Peats and Organic Soils. ASTM Spec. Tech. Publ. 820*, P. M. Jarret, Hrsg., Philadelphia, ASTM, 1983, pp. 37-51.

- [159] J. H. Davis, „The peat deposits of Florida: their occurrence, development and uses.“ in *Geology Bulletin, 30, Florida Department of Conservation, Fla. Geol. Surv. Tallahassee*, Tallahassee, 1946, p. 246 pp..
- [160] G. Mankinen und B. Gelfer, „Comprehensive use of peat in the U.S.S.R.“ in *5th Tech. Conf. Peat, US Department of Environment*, Bethesda, 1982, pp. 44-54.
- [161] F. Kearns, W. Autin und R. Gerdes, „Occurrence and stratigraphy of organic deposits,“ in *St. Mary Parish, Louisiana. Louisiana Geological Survey (LGS). Geol. Soc. Am. Abstr. Programs 14 (1), 30.*, 1982.
- [162] B. B. K. Huat, A. Prasad, A. A. und K. S., *Geotechnics of Organic Soils and Peat*, CRC Press, Taylor & Francis Ltd., 2014.
- [163] W. S. A. Wolski, J. Mirecki, Z. L. R. Lechowicz, J. Hartlen, K. Garbulewski und U. Bergdahl, „Behaviour of two test embankments on organic soils. Report No. 32. Swedish Geotechnical Institute,“ Linköping, 1988.
- [164] P. M. Jarret, *Geoguide 6. Site Investigation for Organic Soils and Peat*. J.K.R. Document 20709-0341-95. Institut Kerja Raya Malaysia, Sarawak, 1995.
- [165] E. C. Leong und C. Chin, „Geotechnical characteristics of peaty soils in Southeast Asia,“ in *Proceedings of GeoEngineering 2000*, Melbourne, 2000.
- [166] R. A. J. Wüst, Bustin und R. M., „Low-ash peat deposits from a dendritic, intermontane basin in the tropics: a new model for good quality coals,“ in *International Journal of Coal Geology 46*, Elsevier, 2001, pp. 179-206.
- [167] S. Huber, D. Heyer und E. Birle, *Bericht zum Umgang mit organikhaltigem Bodenaushub bei kleinen und mittleren Bauvorhaben.*, T. U. M. – Z. f. G. A. B. B. e. V., Hrsg., München, 2016.
- [168] DIN EN ISO 17892-4, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016)*, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2017.
- [169] TGL 11462/07, (zurückgez.) *Fachbereichsstandard. Baugrundmechanik. Prüfungen an Lockergesteinsproben im Laboratorium. Bestimmung der Korngrößenverteilung*, Berlin: Staatsverlag der DDR, 1969.

- [170] Z. Bialas und A. S. Kleczkowski, Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten  $k$ , A. Hydrotechniki, Hrsg., Warschau, 1979, pp. 405-417.
- [171] DIN EN ISO 17892-1, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2015.
- [172] DIN 18124, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2011.
- [173] DIN 18129, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Kalkgehaltsbestimmung, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2011.
- [174] DIN 19539, „Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC<sub>400</sub>, ROC, TIC<sub>900</sub>)“, D. D. I. f. N. e. V., Hrsg., Berlin, Beuth, 2016.
- [175] LfL Bayern, „<https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/031122/index.php>, letzter Aufruf: 27.07.2018,“ K. d. ö. R. B. L. f. L. (. B. Freistaat Bayern, Hrsg., Freising, Internetquelle, 2018.
- [176] P.-T. Huang, M. Patel, M. C. Sangata und A. Bobet, Classification of Organic Soils, Final Report, Joint Transportation Research Program, Purdue University, Indiana Department of Transportation, Indianapolis, 2009.
- [177] P. Schachtschabel, H.-P. Blume, K. -H. Harige und U. Schertmann, Lehrbuch der Bodenkunde, 11. Auflage, Enke, 1984.
- [178] B. C. O’Kelly, „Atterberg limits are not appropriate for peat soils,“ in *Geotechnical Research Volume 2 Issue 3*, Dublin, Ireland, ICE Publishing, 2015, pp. 123-134.
- [179] H. J. Lang, J. Huder, P. Amann und A. M. Puzrin, Bodenmechanik und Grundbau – Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 9., bearbeitete Auflage, Heidelberg: Springer, 2011.
- [180] A. Hussain Malkawi, A. S. Alawneh und O. T. Abu-Safaqah, „Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil,“ in *Applied Clay Science 14(5)*, 1999, pp. 257-278.

- [181] DIN 18127, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2012.
- [182] D. Heyer, E. B. T. Birle und H. S. F. Blomexer, „Effizienter und umweltverträglicher Umgang mit dem Baustoff Boden am Beispiel arsenhaltiger Böden bei der geplanten Erweiterung des Flughafens München,“ in *32. Baugrundtagung in Mainz*, D. G. f. G. e. V. (DGGT), Hrsg., Essen, 2012.
- [183] B. D. Soane, „The Role of Organic Matter in Soil Compactibility: A Review of Some Practical Aspects,“ in *Soil & Tillage Research*, 16, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V, 1990, pp. 179-201.
- [184] DIN EN ISO 10304-1, Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2009.
- [185] M. E. Tucker, Methoden der Sedimentologie, Stuttgart: Enke, 1996.
- [186] Dunkl et al., „Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik,“ W. Kollenberg, Hrsg., Essen, Vulkan-Verlag, 2004.
- [187] L. Spieß, G. Teichert, R. Schwarzer, H. Behnken und C. Genzel, Moderne Röntgenbeugung – Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2009.
- [188] C. Hage, Grundlegende Aspekte des 2K-Metallpulverspritzgiessens, Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Materialien (IAM), Band 36, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014.
- [189] DIN EN ISO 12677, Chemische Analyse von feuerfesten Erzeugnissen durch Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) - Schmelzaufschluss-Verfahren (ISO 12677:2011), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2013.
- [190] P. Hahn-Weinheimer, A. Hirner und K. Weber-Diefenbach, Grundlagen und praktische Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Wiesbaden: Springer, 1984.
- [191] K. Kleinstück, B. Wehner und K. Richter, „Physikalische Grundlagen der RFA,“ in *Röntgenfluoreszenzanalyse – Anwendung in Betriebslaboratorien*, 2. Auflage, H. Ehrhardt, Hrsg., Berlin, Springer, 1989.

- [192] DIN 14346, Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2007.
- [193] DIN 51081, Prüfung oxidischer Roh- und Werkstoffe - Bestimmung der Massenänderung beim Glühen, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2002.
- [194] H. Joosten und D. Clarke, *Wise Use Of Mires and Peatlands – Background and Principles including a Framework for Decision-Making*, Saarijärvi, Finland: International Mire Conservation Group and International Peat Society., 2002.
- [195] G. Mesri und M. Ajlouni, „Engineering properties of fibrous peat.“ in *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 2007, pp. 850-866.
- [196] B. E. Colley, „Construction of highways over peat and muck areas,“ in *American Highways*, 29 (1), Washington, D.C., 1950, pp. 3-6.
- [197] P. D. Moore und D. J. Bellamy, *Peatlands*, New York: Springer, 1974.
- [198] S. Hansbo, „Full-scale investigations of the effect of vertical drains on the consolidation of a peat deposit overlying clay,“ in *Can. Geotech. 35th Conf*, 1982, pp. 166-176.
- [199] S. Y. Ng und G. R. Eischens, „Repeated short-term consolidation of peats,“ in *Proc., Symp. Testing of Peats and Organic Soils, STP 820*, West Conshohocken, ASTM, 1983, p. 192–206.
- [200] C. Shier, „Fuel peat in developing countries,“ in *Rep. Prepared for Bord Na Mona/World Bank, Technical Paper No. 41*, Dublin, 1984.
- [201] B. B. K. Huat, S. Kazemian, A. Prasad und M. Barghchi, „State of an art review of peat: General perspective,“ in *International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(8)*, 2011, pp. 1988-1996.
- [202] B. B. K. Huat, *Organic and Peat Soils Engineering.*, Serdang: University Putra Malaysia Press, 2004.
- [203] N. B. Hobbs, „Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats,“ in *Quarterly journal of Engineering Geology*, 1986, Vol. 19, London, GB, 1986, pp. 7-80.
- [204] B. C. O’Kelly, „Compressibility of some peats and organic soils,“ in *Proceeding of international Conference on Problematic Soils, Eastern Mediterranean University, Famagusta*, Zypern, 2005, pp. 1193-1202.

- [205] C. Zwanenburg, The influence of anisotropic on the consolidation behaviour of peat, Dissertation, Delft: Delft University Press, 2005.
- [206] B. C. O'Kelly, „Compressibility and permeability anisotropy of some peaty soils,“ in *Proceedings of the 60th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, Kanada, 2007.
- [207] M. T. Hendry, J. S. Sharma, C. D. Martin und S. L. Barbour, „Effect of fibre content and structure on anisotropic elastic stiffness and shear strength of peat,“ in *Can. Geot. J.* 49, NRC Research Press, 2012, pp. 403-415.
- [208] I. MacFarlane, *Muskeg Engineering Handbook.*, Toronto: University of Toronto Press, 1969.
- [209] E. S. Verry, D. H. Boelter, J. Päivänen, D. S. Nichols, T. Malterer und A. Gafni, „Physical Properties of Organic Soils,“ in *Peatland Biogeochemistry and Watershed Hydrology at the Marcell Experimental Forest*, R. K. Kolka, S. D. Sebestyen, E. S. Verry und B. K. N., Hrsg., Boca Raton, CRC Press, 2011, pp. 135-176.
- [210] H. Kado und F. Reuter, „Beziehungenn zwischen Wassergehalt und Rohdichte bei organogenen Lockergesteinen,“ in *Zeitschrift für Angew. Geologie* 9, 1963, p. 410.
- [211] N. Radforth und C. O. Brawner, *Muskeg and the Nothern Enviroment in Canada*, Toronto, Kanada: University of Toronto Press, 1996.
- [212] L. Amaryan, *Soft Soils Properties and Testing Methods*, Rotterdam: Balkema, 1993.
- [213] B. Tiemeyer, U. Dettmann, M. Bechthold und D. Zak, „Zustand des Torfkörpers - Bodeneigenschaften,“ in *Moorschutz in Deutschland – Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen – Bewertungsinstrumente und Erhebungen von Indikatoren*, Bundesamt f. Naturschutz (BfN), BfN-Skripten 462, BfN, Hrsg., Bonn, 2017.
- [214] B. B. K. Huat, A. Asadi und S. Kazemian, „Experimental Investigation on Geomechanical Properties of Tropical Organic Soils and Peat,“ in *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (1), 2009, pp. 184-188.
- [215] J. R. Hosang und J. G. Locker, Discussion – Skempton, A. W., Petley, D. J.: *IgnitionLoss and other Properties of peats and Clays from Avonmouth, Kings´s Lynn and Cranberry Moos*, Ontario, 1970.

- [216] T. Edil, „Recent advances in geotechnical characterisation and construction over peats and organic soils,“ in *Proc. of the 2nd International Conference on Soft Soil Engineering and Technology*, Putrajaya, Malaysia, 2003.
- [217] L. Wong, R. Hashim und F. Ali, „A review on hydraulic conductivity and compressibility of peat,“ in *Journal of Applied Sciences*, 9(18), 2009, p. 3207–3218.
- [218] H. A. Gruen und C. W. Lovell, *Use of Peat for Embankment Foundations*, Indianapolis, USA, 1983.
- [219] E. T. Hanrahan, „An Investigation of Some Physical of Peat,“ in *Geotechnique*, Volume 4, No. 3, 1954, pp. 108-123.
- [220] R. C. Wyld, „A Further Investigation of the Engineering Properties of Muskeg,“ in *Unpublished M. Sc. Thesis. Faculty of Engineering. University of Alberta.*, Alberta, Canada, 1956.
- [221] J. Schulze, F. Arnecke und M. Kötter, „Torf als geologische Barriere?, Untersuchungen am Standort der Deponie Breinermoor,“ *Altlasten Spektrum*, pp. 288-294, Mai 1998.
- [222] DIN 18130-1, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 1998.
- [223] B. C. O’Kelly, „Development of a large consolidometer apparatus for testing peat and other highly organic soils, Suo 60(1–2): 23–36 – Research articles,“ in *SUO (Mires and peat)*, S. –. F. P. Society, Hrsg., Helsinki, Finnland, 2009, pp. 23-36.
- [224] A. A. Tveiten, „Applicability of Peat as an Impervious Material for Earth Dams,“ in *Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 14.*, 1956.
- [225] J. D. Silburn, „peat as the Impermeable Membrane in an Earth Dam,“ in *Symposium on Peat Moss in Canada, University of Sherbrooke*, 1972, pp. 163-196.
- [226] R. A. Herrmann und M. Löwen, Querschnittsstudie „Bestimmung des organischen Anteils in feinkörnigen Böden“, Siegen: nicht veröffentlicht, 2012.
- [227] R. A. Herrmann und M. Löwen, „Untersuchungen zum Setzungsverhalten von feinkörnigen Böden mit organischen Bestandteilen und zur Klassifizierung von feinkörnigen Böden mit organischen Bestandteilen,“ Siegen, nicht veröffentlicht, 2013.
- [228] R. A. Herrmann, „Bestimmung organischer Böden,“ in *1. Sachverständigenkolloquium RWE Power AG, Schloss Paffendorf, Bergheim-Paffendorf, Eigenverlag*, 2013.



- [229] R. A. Herrmann, M. Löwen und U. Wilden, „Untersuchungen zum Setzungs- und Scherverhalten sowie zur Klassifizierung von feinkörnigen Böden mit organischen Bestandteilen,“ in *Geotechnik 37 (2014), Heft 4*, Berlin, Ernst und Sohn, 2014, pp. 239-249.
- [230] A. W. Skempton und D. J. Petley, „Ignition Loss and other Properties of Peats and clays from Avonmouth King’s Lynn and Cranberry Moos,“ in *Geotechnique 20, No. 4*, 1970, pp. S. 343-356.
- [231] B. C. O’Kelly, „Oven-Drying Characteristics of Soils of Different Origins,“ in *Drying Technology 23*, Taylor & Francis, 2005, pp. 1141-1149.
- [232] B. C. O’Kelly, „Method to compare water content values determined on the basis of different oven-drying temperatures,“ in *Geotechnique 55, No. 4*, 2005, p. 329–332.
- [233] B. C. O’Kelly, „Water Content Determinations for Peat and Other Organic Soils Using the Oven-drying Method,“ in *Drying Technology: An International Journal, Vol. 32*, 2014, p. 13 pp..
- [234] H. Yamaguchi, Y. Ohira, K. Kogure und S. Mori, „Undrained shear characteristics of normally consolidated peat under triaxial compression and extension conditions,“ in *Soils and Foundations, Vol. 25, No. 3 Japanese Society of Soil Mechanics and foundation Engineering*, 1985, pp. 1-18.
- [235] P. M. Cook, „Consolidation Characteristics of Organic Soils,“ in *Proceedings 9th Canadian Soil Mechanics Conference, NRC, ACSSM Technical Memorandum 41*, 1956, pp. 82-87.
- [236] N. D. Lea und C. O. Brawner, „Highway Design and Construction Over Peat Deposits in Lower British Columbia,“ in *Highway Research Board. Research Record No . 7*, Washington. D. C., USA, 1963.
- [237] M. Pietsch und A. Schneider, „Zur Frage der Bestimmung organischer Bestandteile in Böden, Organic Matter Determination for Soils,“ in *Geotechnik 5 (2)*, Essen, 1982, pp. 67-73.
- [238] A. Walkley und I. A. Black, „An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method,“ in *Soiel Science 37*, 1934, pp. 29-37.

- [239] F. Gelman, R. Binstock und L. Halicz, Application of the Walkley-Black titration for organic carbon quantification in organic rich sedimentary rocks, The Ministry of national Infrastructures, Geological Survey of Israel, Report GSI/13/2011, Jerusalem, 2011.
- [240] FGSV, „Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der organischen Bestandteile in Böden,“ F. f. d. S. e. V. (FGSV), Hrsg., Köln, FGSV Verlag, 1965.
- [241] L. Silfverberg, „Chemical determination of soil organic matter. A critical review of existing methods,“ in *Proc. Swed. Geot. Inst. Nr. 15*, 1957.
- [242] DIN EN 15936, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2002.
- [243] DIN EN ISO 10693, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren (ISO 10693:1995), D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2014.
- [244] LfULG, Leitfaden zur Humusversorgung – Informationen für Praxis, Beratung und Schulung, L. u. G. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., Dresden, 2015.
- [245] F. Kausch, Geotechnische Charakterisierung des Hamburger Baugrundes, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg: Eigenverlag, 2010.
- [246] F. Rackwitz, M. Schüßler, S. A. Savidis und M. Ney, „Bodenmechanische Eigenschaften organischer Ablagerungen der brandenburgischen Niederungs- und Luchgebiete,“ in *Geotechnik 34*, Berlin, Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011, pp. S. 97-101.
- [247] S. Krieg, „Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 150,“ Bd. Heft 150, G. Gudehus und O. Natau, Hrsg., Karlsruhe, Eigenverlag, 2000.
- [248] A. Arman, „Discussion, Ignition Loss and other Properties of Peats and Clays from Avonmouth, King’s Lynn and Cranberry Moss,“ in *Géotechnique, Volume 21*, 1970, pp. S. 418-421.
- [249] I. Miyakawa, Some aspects of rod construction in peaty or marshy areas in Hokkaido. Sapporo, Japan: Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau., Sapporo, 1960.

- [250] B. B. K. Huat, „Deformation and Shear Strength Characteristics of Some Tropical Peat and Organic Soils,“ in *Pertanika J. Sci. & Technol.* 14(1 & 2), Universiti Putra Malaysia Press, 2006.
- [251] M. Santagata, A. Bobet, C. T. Johnston und J. Hwang, „One-Dimensional Compression Behavior of a Soil with High Organic Matter Content,“ in *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume: 134(1)*, American Society of Civil Engineers, 2008, pp. 1-13.
- [252] F. Scheffer und B. Ulrich, Humus und Humusdüngung, Band 1, Morphologie, Biologie, Chemie u. Dynamik des Humus, Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde, Teil 3, Stuttgart: Ferdinand Enke, 1960.
- [253] E. Mückenhausen, Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen, 3. Auflage, Frankfurt am Mein: DLG, 1985.
- [254] R. S. Swift, „Organic matter characterization,“ in *Methods of Soil Analysis, Part 3 – Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series*, D. L. S. e. al., Hrsg., Madison, USA, Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., 1996, pp. 1011-1071.
- [255] P. Sollins, P. Homann und B. A. Caldwell, „Stabilization and destabilization of soil organic organicmatter: mechanisms and controls,“ in *Geoderma* 74, 1996, pp. 65-105.
- [256] J. A. Van Veen und P. J. Kuikman, „Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms,“ in *Biogeochemistry*, 1990, pp. 213-233.
- [257] A. J. Sexstone, N. P. Revsbech, T. B. Parkin und J. M. Tiedje, „Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates.,“ in *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1985, pp. 645-651.
- [258] J. Glinski und J. Lipiec, „Soil physical conditions and plant roots,“ Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 1990.
- [259] F. Hole, „Effects of animals on soil,“ in *Geoderma* 25, 1981, pp. 75-112..
- [260] E. A. Mitscherlich, Bdk. für Lanwirte und Forstwirte, Berlin, 1923.
- [261] V. Koss, Umweltchemie: Eine Einführung für Studium und Praxis, Berlin, Heildberg: Springer Verlag, 1997.

- [262] N. E. Wilson, N. W. Radforth und I. C. L. M. B. MacFarlane, „The Rates of Consildation for Peat,“ in *Proceedings 6th International Conference on SFME*, Montreal, Canada, 1965, pp. 407-411.
- [263] P. L. Berry und T. J. Poskitt, „The consolidation of peat,“ in *Géotechnique 22, No. 1*, 1972, pp. 27-52.
- [264] EVB, „Empfehlungen "Verformungen des Baugrundes bei baulichen Anlage - EVB,“ U. d. A. ". d. D. G. f. E. u. G. e. V., Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 1993.
- [265] C. Boley und Y. Zou, „Bodenmechanik,“ in *Handbuch Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen*, C. Boley, Hrsg., Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2012, pp. 139-224.
- [266] B. C. O’Kelly und S. P. Pichan, „Effects of decomposition on the compressibility of fibrous peat – A review,“ in *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 9(4), 2013, p. 286–296.
- [267] DIN EN ISO 17892-5, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2017.
- [268] K. Terzaghi, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, leipzig und Wien: Deuticke, 1925.
- [269] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Paris, 1856.
- [270] A. Casagrande, *Notes on soil mechanics – First Semester.*, Havard University (unpublished), 1938.
- [271] D. W. Taylor, *Fundamentels of Soil Mechanics*, New York: John Wiley & Sons, 1948.
- [272] E. Schultze und H. Muhs, „Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten,“ Springer Verlag Berlin / Heidelberg / New York, 1967.
- [273] W. H. Bölling, *Zusammendrückung und Scherfestigkeit von Böden*, Wien: Springer, 1971.
- [274] R. D. Holtz und W. D. Kovacs, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.
- [275] W. Blümel, *Ein Beitrag zum eindimensionalen Konsolidierungsverhalten von Klei im Kompressionsversuch. Dissertation. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodememchnik der TU Hannover, Heft 6*, Hannover, 1974.

- [276] P. Quast, Ein Beitrag zum Kriechverhalten eines norddeutschen Kleis, Mitteilungen Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau und Institut f. Grundbau und Bodenmechanik d. Technischen Univ. Hannover, Heft 13, Hannover: Eigenverlag, 1977.
- [277] P. C. Kotzias, Die Zusammendrückbarkeit von Schluffen, Technische Hochschule Aachen, Forschungsbericht, Mitteilungen des Instituts für Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, Heft 28, Aachen, 1963.
- [278] A. Casagrande, „The determination of preconsolidation load and its practical significance,“ in *Proc. Int. Conf. Soil Mech. Foun. Eng*, Cambridge, MA, 1936, pp. 60-64.
- [279] H.-H. Schmidt und R. F. V.-B. C. Buchmaier, „Grundlagen der Geotechnik, Geotechnik nach Eurocode, 5. Auflage,“ Springer Vieweg, 2017.
- [280] DIN 18135, (zurückgez.) Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2012.
- [281] McNabb, „A MATHEMATICAL TREATMENT OF ONE-DIMENSIONAL SOIL CONSOLIDATION,“ in *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 17, Brown University, 1960, pp. 337-347.
- [282] R. L. Schiffmann und R. E. Gibson, „Consolidation of non-homogeneous clay layers,“ in *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 90(SM5), 1964, pp. 1-30.
- [283] F. E. Richart, „A Review of the theories for sand drains,“ in *Journal of Soil mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 83(3), 1957, pp. 1-38.
- [284] E. H. Davis und G. P. Raymond, „A non-linear Theory of Consildation,“ in *Géotechnique*, Vol. 15(2), 1965, pp. 161-173.
- [285] R. E. Gibson, G. L. England und M. J. L. Hussey, „The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays,“ in *Géotechnique*, Volume 17 Issue 3, 1967, pp. 261-273.
- [286] A. S. K. Buisman, „Results of long duration settlement tests,“ in *Proc. of 1. ICSMFE*, Vol. 1, Cambridge, 1936, pp. 103-106.
- [287] G. P. Raymond und H. E. Wahls, „Estimating One-Dimensional Consolidation, Including Secondary Compression of Clay Loaded from Overconsolidated to Normally

Consolidated State," in *Special Report 163, Transportation Report Board*, 1976, pp. 17-23.

- [288] G. Mesri und P. M. Godlewski, „TIME AND STRESS-COMPRESSIBILITY INTERRELATIONSHIP," in *ASCE J Geotech Eng Div, Vol. 103, 5*, 1977, pp. 417-430.
- [289] L. K. Walker und R. G. P., „The prediction of consolidation rates in a cemented clay," in *Can. Geotech. J.*, 5(4), 1968, pp. 192-216.
- [290] C. C. Ladd, R. Foote, K. Ishihara und F. P. H. G. Schlosser, „State-of-the-Art Report, Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2," Tokio, 1977, pp. 421-494.
- [291] G. Mesri, „Coefficient of secondary compression," in *Proc. of American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 99, S.M. 1, 1973, pp. 123-137.
- [292] G. Mesri und A. Castro, „Ca/Cc concept and K<sub>0</sub> during secondary compression," in *Journal of Geotechnical Engineering*, 113, 3, 1987, pp. 230-247.
- [293] H. J. Leinenkugel, Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Deutung. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, A. Blinde und L. Müller, Hrsg., Karlsruhe, 1976.
- [294] A. Verruijt, An Introduction to Soil Mechanics – Theory and Applications of Transport in Porous Media, Volume 30, Delft: Springer, 2018.
- [295] G. Mesri, G. Stark, M. A. Ajlouni und C. S. Chen, „Secondary Compression of Peat with or without Surcharging," in *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, pp. 411-421.
- [296] G. Mesri, D. O. K. Lo und T. W. Feng, „Settlement of embankments on soft clays," in *Geotech. Spec. Publ. No. 40, ASCE*, 1, 1994, pp. 1-8.
- [297] W. Karunawardena, Consolidation Analysis of Sri Lankan Peaty Clay Using Elastoviscoplastic Theory. Dissertation. Kyoto University, Kyoto, 2009.
- [298] W. A. Lewis, „The settlement of the approach embankments to a new road bridge at Lockford, West Suffolk," in *Géotechnique* 6(3), London, 1956, pp. 106-114.
- [299] J. Adams, „The engineering behavior of a Canadian muskeg," in *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Toronto, University of Toronto Press, 1965, pp. 3-7.

- [300] P. Keene und C. D. Zawodniak, „Embankment construction on peat utilizing hydraulic fill,“ in *Proc. 3rd int. Peat. Contr. National research Council of Canada*, Ottawa, 1968, pp. 45-50.
- [301] W. G. Weber, „Performance of embankments constructed over peat,“ in *J. Soil Mech. and Found Div., ASCE 95(1)*, ASCE, 1969, pp. 53-76.
- [302] L. Samson und P. La Rochelle, „Design and performance of an expressway constructed over peat by preloading,“ in *Can. Geot. J. 9(4)*, Ottawa, 1972, pp. 447-466.
- [303] ,. P. L. Berry und B. Vickers, „Consolidation of fibrous,“ in *J. Geot. Engrg., ASCE 101(8)*, 1975, pp. 741-753.
- [304] G. Lefebvre, P. Langlois, C. Lupien und J.-G. Lavallée, „Laboratory testing and in situ behaviour of peat as embankment foundation,“ in *Can. Geotech. J. 21(2)*, Ottawa, 1984, pp. 322-337.
- [305] E. J. den Haan, Vertical compression of soils, Phd Thesis, Delft University of Technology, Delft, 1994.
- [306] A. S. Azzouz, R. J. Krizek und R. B. Corotis, „Regression Analysis of Soil Compressibility,“ in *Soils and Foundations, Volume 16, No. 2*, 1976, pp. 19-29.
- [307] S. Maguchi, K. Sakai und H. Oyamada, „On Soil Investigations of the Foundation of Kuehiro Power Station,“ in *Soi 1 and Foundation , Japanese Society of SMFE, Volume 13. No*, 1965, pp. 3-9.
- [308] K. Kogure und Y. Ohira, „Statistical Forecasting of Compressibility of Peaty Ground,“ in *Canadian Geotechnical Journal. Volume 14. No. 4*, 1977, pp. 562-570.
- [309] E. Yilmaz und A. Saglamer, „Secondary and Tertiary Compression Behavior of Samsun Soft Blue Clay,“ in *Proc. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1*, Istanbul, 2001, pp. 329-332.
- [310] G. Cevikbilen und A. Saglamer, „Effects of organic content on secondary and tertiary compression behavior of a soft clay,“ in *Proc. of International Workshop on Geotechnics of Soft Soils Theory and Practice*, Noordwijkerhout, 2003, pp. 403-409.
- [311] H. Brandl, „Consolidation/Creeping of Soils and Pre-treated Sludge.,“ in *Proc. of the 5th Biot Conference in Poromechanics. American Society of Civil Engineers*, Wien, 2013, pp. 1346-1357.

- [312] H. Brandl, „Creeping (secondary/tertiary settlements) of highly compressible soils and sludge,“ in *Building Materials and Structures, Journal for Research of Materials and Structure, Society for Materials and Structures Testing of Serbia, Vol. 61, 1*, 2018, pp. 27-36.
- [313] O. Möller, Zum Langzeit-Kompressionsverhalten weicher organischer Sedimente, Dissertation, Hamburg: Institut für Geotechnik und Baubetrieb, TUHH, 2010.
- [314] M. Boso und G. J., „Lang Term Compression Behaviour of Soft Organic Sediments,“ in *Multiphysical testing of Soils and Shales*, SSGG, L. Laloui und A. Ferrari, Hrsg., Berlin, Springer, 2013, pp. 249-254.
- [315] O. Möller und K.-P. Mahutka, „Langzeit-Kompressions-Verhalten fluvialer Sedimentböden, Hochschule 21 - Technical Report, Nr. 2,“ Buxtehude, Eigenverlag, 2013.
- [316] W. C. Lynn, W. E. McKinzie und R. B. Grossmann, „Field Laboratory Tests for Characterization of Histosols,“ in *Histosols: Their Characteristics, Classification, and Use. No. 6. Soil Science Society of America.*, Madison, 1974, pp. 11-31.
- [317] J. Hartlen und W. Wolski, *Embankments on Organic Soils*, Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1996.
- [318] G. de Josselin de Jong, „Consolidation models consisting of an assembly of viscous elements or a cavity channel network,“ in *Geotechnique 18 (2)*, 1968, pp. 195-228.
- [319] A. Szymanski, S. Wojciech, A. Drozd und E. Malinowska, „Secondary compression in organic soils,“ in *Annals of Warsaw Agricultural University - SGGW*, 2004, pp. 221-228.
- [320] T. B. Edil und A. W. Dhowian, „At-Rest Lateral Pressure of Peat Soils,“ in *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(2)*, 1981, pp. 201-217.
- [321] S. Cola und G. Cortellazzo, „The shear strength behavior of two peaty soils,“ in *Geotechnical and Geological Engineering (2005) 23*, Springer, 2005, pp. 679-695.
- [322] EANG, „Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik (EANG),“ D. G. f. G. e. V., Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 2014.
- [323] P.-A. von Wolffersdorff und H. F. Schweiger, „Numerische Verfahren in der Geotechnik,“ in *Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage*, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 2008, pp. 501-555.



- [324] P.-A. von Wolffersdorff und H. F. Schweiger, „Numerische Verfahren in der Geotechnik,“ in *Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, 8. Auflage, Berlin, Ernst und Sohn, 2017, pp. 633-719.
- [325] H. F. Schweiger, P. A. Vermeer und M. Wehnert, „On the design of deep excavations based on finite element analysis,“ in *Geomechanics and Tunneling 2(2009)*, No. 4, Berlin, Ernst und Sohn, 2009, pp. 333-344.
- [326] A. Lim, C.-Y. Ou und P.-G. Hsieh, „Evaluation of clay constitutive models for analysis of deep excavation under undrained conditions,“ in *Journal of GeoEngineering*, Vol. 5, No. 1, 2010, pp. 9-20.
- [327] M. Bode, F. Schranz, G. Medicus und W. Fellin, „Vergleich unterschiedlicher Materialmodelle an einer Aushubsimulation,“ in *Geotechnik (42) 2019, Heft 1*, Berlin, Ernst und Sohn, 2019, pp. 11-20.
- [328] D. Kolymbas und I. Herle, „Stoffgesetze für Böden,“ in *Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, 7. Auflage, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 2008.
- [329] D. Kolymbas und I. Herle, „Stoffgesetze für Böden,“ in *Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, 8. Auflage, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst und Sohn, 2017, pp. 457-509.
- [330] D. Aubram, Skript – Numerische Verfahren in der Geotechnik, Technische Universität Berlin, Fak. IV: Planen, Bauen, Umwelt; Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Berlin, 2016.
- [331] I. C. MacFarlane und N. W. Radforth, „A study of the physical behaviour of peat derivatives under compression,“ in *Proc 10th Muskeg Res Conf – NRC*, N. R. C. o. Canada, Hrsg., Ottawa, 1965, pp. 159-164.
- [332] K. Kogure, „An analytic prediction of consolidation settlement of fibrous peat deposit under loading,“ in *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri University of Science and Technology, Missouri, 1993.
- [334] L. Zhang und B. O'Kelly, „Constitutive models for peat – a review,“ in *Proceedings of the 12th International Conference on Computational Plasticity – Fundamentals and Applications (COMPLAS XII)*, Barcelona, Spain, 3rd–5th September 2013, edited by E. Onate, D.R.J. Owen, D. Peric and B. Suárez, International Center for Numeri, 2013, p. 1294–1304.

- [335] W. Dachroth, Handbuch der Baugelologie und Geotechnik, Bde. %1 von %24., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin: Springer Spektrum, 2017.
- [336] W. Brand, „Probleme bei der Verwendung schluffiger und toniger Böden als Baustoff im Erd- und Straßenbau,“ in *Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im Öster. Ing.- und Arch.-Verein, Arbeitsgruppe "Untergrundforschung", Heft 23*, 1963, pp. 141-155.
- [337] Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e.V., Bodenverbesserung / Bodenverfestigung mit Kalk, Köln: Eigenverlag, 2013.
- [338] M. Cartus, „Bodenvermörtelungstechnik,“ in *Spezialtiefbau, Erkundung und Ausführung – Technik und Umwelt – Methoden und Auswirkungen – Baustoffe und Verfahren, 3. Auflage*, W. J. Bartz, H. Mesenholl und E. Wipper, Hrsg., Renningen, Expert Verlag, 2009, p. ergänzen.
- [339] M. Terashi und H. Tanaka, „Settlement analysis for deep mixing methods,“ in *Proc. of the 8th Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Helsinki, 1983, pp. 955-960.
- [340] M. Terashi, „Theme Lecture: Deep mixing method – Brief State of the Art,“ in *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 4*, 1997, pp. 2475-2478.
- [341] K. J. Witt, „Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden. Geotechnikseminar Weimar 2002,“ in *Schanz, Witt (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7*, Bauhaus-Universität Weimar Universitätsverlag, 2002, pp. 1-12.
- [342] DIN EN 197-1, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, D. D. I. f. N. e. V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2011.
- [343] Verein Deutscher Zementwerke e.V. – VDZ, Zement Taschenbuch 2002, 50. Ausgabe, Düsseldorf: Bau+Technik, 2002.
- [344] J. Stark und B. Wicht, „Zement und Balk – Der Baustoff als Werkstoff,“ F. A. F. f. B. d. B. Weimar, Hrsg., Basel, Birkhäuser, 2000.
- [345] K. Krenkler, Chemie des Bauwesens, Bd. 1. Anorganische Chemie, Berlin: Springer, 1980.
- [346] J. Stark und B. Wicht, Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2013.

- [347] D. Adam, „Erdbau,“ in *Grundbau-Taschenbuch, Teil 2. Geotechnische Verfahren*, K. J. Witt, Hrsg., Berlin, Ernst u. Sohn, 2018, pp. 1-164.
- [348] DIN EN 459-1, Baukalk - Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2015.
- [349] H. L. Jessberger, „Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung,“ Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1967.
- [350] A. Lottmann, Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen, Dissertation, Cottbus: Eigenverlag, 2003.
- [351] P. Nicholson, „Soil Improvement and Ground Modification Methods, 1st Edition,“ Elsevier, 2014.
- [352] K. Kitsugi und H. Azakami, „Lime-column technique in the improvement of clay ground,“ in *Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques, Including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods*, Bangkok, 1982, pp. 105-115.
- [353] R. Floss, Handbuch ZTVE: Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau, 4. Auflage, Bonn: Kirschbaum, 2009.
- [354] M. R. Hausmann, Engineering principles of ground modification, New York: Mc-Graw-Hill, 1990.
- [355] H. Ahnberg, S.-E. Johansson, H. Pihl und T. Carlsson, „Stabilising effects of different binders in some Swedish soils,“ in *Ground Improvement (2003) 7, No. 1*, 2003, pp. 9-23.
- [356] K. Jasmund und G. Lagaly, Tonminerale und Tone – Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, K. Jasmund und G. Lagaly, Hrsg., Darmstadt: Steinkopff, 1993.
- [357] B. Mason und C. B. Moore, Grundzüge der Geochemie, Stuttgart: Ferdinand Enke, 1985.
- [358] W. Brand, „Der Einfluß von Kalziumhydroxyd auf die Eigenschaften schluffiger Böden im Straßenbau. Dissertation,“ Aachen, 1962.
- [359] K. J. Witt, „Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln,“ in *8. Erdbaufachtagung, Baugrundverbesserung und -verdichtung - Verfahren, Methoden, Materialien, Prüfungen*, Leipzig, 2012.

- [360] D. T. Bergado, L. R. Anderson, M. N. und A. S. Balasubramaniam, *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*, New York: ASCE, 1996.
- [361] W. E. Müllauer, *Mechanismen des Sulfatangriffs auf Beton – Phasenneubildung und Expansionsdrücke in Mörteln unter Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Belastung*, Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [362] P. Keller, A. Mosthof, V. Laptev und S. Gilde, „Gipskeuper: Baugrundrisiken durch die Bildung von Ettringit/Thaumasit,“ in *3. Kolloquium Bauen in Boden und Fels*, Esslingen, 2002, pp. 387-400.
- [363] J. Knopp und C. Moormann, „Ettringite Swelling in the Treatment of Sulfate-Containing Soils Used as Subgrade for Road Constructions,“ in *Procedia Engineering, Volume 143, Advances in Transportation Geotechnics 3 . The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)* , Elsevier, 2016, pp. 128-137.
- [364] G. Rajasekaran, „Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays,“ in *Ocean Engineering 32 (2005)* , Elsevier, 2005, p. 1133–1159.
- [365] P. Nieminen, „Stabilisation with gypsum and lime,“ in *Proc. of the 2nd International Conference on Use By-Products Waste Civil Engineering, Vol. 1*, Paris, 1978, pp. 229-235.
- [366] G. Holm, R. Tränk, A. Ekström und B. Torstensson, „Lime columns under embankments – a full scale test.,“ in *Improvement of Ground, Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2*, Helsinki, 1983, pp. 909-912.
- [367] S. Kazemian, B. K. K. Huat, A. Prasad und M. Barghchi, „Effect of peat media on stabilization of peat by tradional binders,“ in *International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(3)*, 2011, pp. 4476-481.
- [368] J. P. Andriessse, *Nature and management of tropical peat soils*, FAO Soils Bulletin 59, Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988.
- [369] R. F. Hammond, *Survey of peat deposits on Makandudu, Milandu and Forkaidu Islands in Miladummandulu, North Atoll. Repot to the Government of the Maldives*. FAO TA3013, 1971.
- [370] H. Tremblay, D. J., L. J. und L. S., „Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement,“ in *Can. Geotech. J.*, 39, 2002, pp. 535-546.

- [371] W. Schäfer, E. Gehrt, U. Müller, J. Blankenburg und J. Gröger, Geofakten 24-Boden, Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten, Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), 2010.
- [372] A. Bobet, J. Hwang, C. T. Johnston und M. Santagata, „One-dimensional consolidation behavior of cement-treated organic soil,“ NRC Research Press, 2011, pp. 1100-1115.
- [373] S. Kazemian, A. Prasad, B. B. K. Huat, B. Bazaz, J., T. A. Mohammed und F. N. Abdul Aziz, „Effect of aggressive pH media on peat treated by cement and sodium silicate grout,“ in *Journal of Central South University of Technology*, Springer, 2011, pp. 840-847.
- [374] N. Z. .. Mohd Yunus, D. Wanatowski und L. R. Stace, „Lime Stabilisation of Organic Clay and the Effects of Humic Acid Content,“ in *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 44*, 2013.
- [375] H. Brandl, „Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime,“ in *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1981, pp. 587-594.
- [376] P.-E. Bengtsson und H. Ahnberg, Settlement calculations for lime column stabilisations. Road E18 at Fiskvik kanal. SGI project 1-261/86., 1995.
- [377] H. Ahnberg, „Measured permeabilities in stabilised Swedish soils,“ in *Proc. of the 3rd Int. Conference on Grouting and Ground Treatment, Vol. 1*, New Orleans, 2003, pp. 622-633.
- [378] S. Baker, Deformation behavior of lime/cement column stabilized clay. Ph.D. thesis, Dept. of Geotechn. Eng., Chalmers Univ. of Techn., Gothenburg, 2000.
- [379] T. Kawasaki, S. Saitoh, Y. Suzuki und T. Babasaki, „Deep mixing method using cement slurry as hardening agent,“ in *Seminar on soil improvement and construction techniques in soft ground.*, Singapur, 1984.
- [380] H. Ahnberg, S.-E. Johansson, A. Retelius, C. Ljungkrantz, L. Holmqvist und G. Holm, Cement and lime for deep stabilisation of soil, Swedish Geotechnical Institute, Report No. 48, 1995.
- [381] B. B. Broms, „Lime and lime/cement columns,“ in *Ground Improvement, 2nd Edition*, M. P. Moseley und K. Kirsch, Hrsg., London, Spon Press, Taylor and Francis Group, 2004, pp. 252-330.

- [382] M. Nygren und A.-S. Welander, Estimates of properties of lime-cement columns. Master's thesis 91/5, Royal Institute of Technology., Stockholm, 1991.
- [383] M. Bergwall und M. Falksund, Consolidation of lime cement columns - permeability and stiffness. Master's thesis 1996:1, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1996.
- [384] H. Ahnberg, P.-E. Bengtsson und G. Holm, „Effect of initial loading on the strength of stabilised peat,“ in *Ground Improvement, Vol. 5, No. 1*, 2001, pp. 35-40.
- [385] S. Hebib und E. R. Farrel, „Some experiences on the stabilisation of Irish peats,“ in *Canadian Geotechnical Journal 40*, Ottawa, Canada, NRC Research Press, 2003, pp. 107-120.
- [386] J. Hwang, A. Humphrey, A. Bobet und M. C. Santaga, Stabilization and Improvement of Organic Soils, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2004/38, Conducted in Cooperation with the Indiana Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, West Lafayette, USA: Eigenverlag, 2005.
- [387] Y. Hayashi, A. Suzuki, Y. Kitazono und K. Teraoka, „Consolidation characteristics of the cement-treated soil in fresh state,“ in *Deep Mixing '05, International Conference on Deep Mixing, Best Practice and Recent Advances, Volume 1.1*, Stockholm, 2005.
- [388] H. Hayashi und S. Nishimoto, „Strength Characteristic of Stabilized Peat using Different Types of Binders,“ in *Deep Mixing '05, International Conference on Deep Mixing, Best Practice and Recent Advances, Volume 1.1*, Stockholm, 2005.
- [389] M. Janz und S.-E. Johansson, The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization, Report 9, English Translation, N. D. M. P. N. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Hrsg., Linköping, 2002.
- [390] L. Zhang und B. C. O'Kelly, „Effect of salt grain additions on fibrous peat consolidation,“ in *Ground Improvement Volume 168 Issue G11*, Dublin, Ireland, ICE Publishing, 2013, pp. 14-21.
- [391] T. B. Edil und P. J. Fox, „Field observations of thermal precompression of peat,“ in *Proc. of Settlement '94: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Special Publication 40, Vol. 2*, E. T. Yeung und G. Y. Felio, Hrsg., 1994, pp. 1274-1286.

- [392] J. L. Hanson, T. B. Edil, Fox und P. J., „Stress-Temperature Effects on Peat Compression,“ in *Geotechnical Special Publications*, 2001.
- [393] Schwenk Spezialbaustoffe GmbH Co. KG, „Technisches Merk- und Datenblatt für das Werk Mergelstetten – Bodenbinder 100 bis 700,“ Ulm, 2015.
- [394] F. G. Hernandez-Martinez und A. Al-Tabbaa, „Strength Properties of Stabilised Peat,“ in *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing’05*, S. G. Institute, Hrsg., Linköping, 2005, pp. 69-78.
- [395] F. G. Hernandez-Martinez und A. Al-Tabbaa, „Effectiveness of different binders in the stabilisation of organic soils,“ in *Proceedings of the International Symposium on Soil Mixing and Admixture Stabilisation*, Okinawa, 2009.
- [396] G. Lorenzo und D. T. Bergado, „Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay—New Approach,“ in *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(10), 2004, pp. 1042-1050.
- [397] T. Müller, C. Krämer, C. Pritzel, R. Bornemann, T. L. Kowald, R. H. F. Trettin und P. H. Bolívar, „Influence of cocamidopropyl betaine on the formatrion and carbonation of portlandite - A microscopy study,“ in *Construction and Building Materials* 163, Elsevier, 2018, pp. 793-797.
- [398] B. Kalantari und A. Prasad, „A Study of the Effect of Various Curing Techniques on the Strength of Stabilized Peat,“ in *Transportation Geotechnics 1*, Elsevier, 2014, pp. 119-128.
- [399] P. Skels, K. Bondars und A. Korjakins, „UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT STABILIZED PEAT,“ in *4th International Conference CIVIL ENGINEERING`13 Proceedings Part I – CONSTRUCTION AND MATERIALS*, Jelgava, 2013, pp. 202-206.
- [400] DIN EN ISO 17892-7, „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 7: Einaxialer Druckversuch (ISO 17892-7:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-7:2018,“ D. B. (NABau), Hrsg., Berlin, Beuth.
- [401] DIN 18137-3, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch, D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin: Beuth, 2002.

[402] KrWG, Kreislaufwirtschaftsgesetz, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Stand: Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 9 G v. 20.7.2017, 2808, 2012.

[403] FE 05.0204/2018/CGB, Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoff im Erdbau, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Auftraggeber) , 2018.

[404] LfU, „Merkblatt – Umgang mit humusreichem und organischem Bodenmaterial – Vermeidung – Verwertung – Beseitigung,“ B. L. f. U. (LfU), Hrsg., 2016.

[405] S. Ratering, U. Wilden, M. Neumann, N. Nolde, R. A. Herrmann, O. Bublitz, M. Löwen und S. Schnell, „Identifikation von kritischen Bodenparametern für die Risikoabschätzung von Bodensekungen durch mikrobiellen Abbau von organischen Substanzen,“ in *Geotechnik*, Berlin, Ernst und Sohn, eingereicht 2018.



## Anhang (A.)



## Inhaltsverzeichnis Anhang

<b>Inhaltsverzeichnis Anhang</b> .....	<b>291</b>
<b>Abbildungsverzeichnis Anhang</b> .....	<b>295</b>
<b>Tabellenverzeichnis Anhang</b> .....	<b>299</b>
<b>A. 1 Erklärungen – Statistische Kennwerte</b> .....	<b>303</b>
<b>A. 2 Zusammenstellung der Wasseraufnahmevermögen der Versuchstorfe und Liapor</b> .....	<b>305</b>
<b>A. 3 Zusammenstellung der Bodenkennwerte der Oedometerversuchsr.</b> .....	<b>311</b>
A. 3.1 Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen .....	314
A. 3.2 T1-Versuchsreihen .....	314
A. 3.2.1 T1-unbehandelt/getrocknet-Versuchsreihen.....	314
A. 3.2.2 T1-DM LP, -BK, -B300/B500-Versuchsreihen .....	314
A. 3.2.3 T1-CEM I-Versuchsreihen .....	315
A. 3.3 T2-Versuchsreihen .....	316
A. 3.4 T3-Versuchsreihen .....	316
A. 3.5 S1-Versuchsreihen .....	317
<b>A. 4 Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile der Oedometerversuchsreihen</b> .....	<b>319</b>
A. 4.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	320
A. 4.2 T1-60 und -105°C-Versuchsreihen .....	320
A. 4.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen .....	320
A. 4.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen .....	320
A. 4.5 T1-DM-B500-Versuchsreihen .....	321
A. 4.6 T1-DM-BK-Versuchsreihen.....	321
A. 4.7 T1-CEM I-Versuchsreihen .....	321
A. 4.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	321
A. 4.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen.....	322
A. 4.8 T2-CEM I-Versuchsreihen .....	322
A. 4.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	322
A. 4.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen.....	322
A. 4.9 T3-CEM I-Versuchsreihen .....	322
A. 4.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	322
A. 4.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen.....	323
A. 4.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	323
<b>A. 5 Zusammenstellung <math>w</math>, <math>w_A</math>, <math>\rho_f</math>, und <math>\rho_d</math> der Oedometerversuchsreihen</b> .....	<b>325</b>

A. 5.1	Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	326
A. 5.2	T1-60 und 105°C-Versuchsreihen .....	326
A. 5.3	T1-DM-LP-Versuchsreihen.....	327
A. 5.4	T1-DM-B300-Versuchsreihen.....	327
A. 5.5	T1-DM-B500-Versuchsreihen.....	328
A. 5.6	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	329
A. 5.7	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	330
A. 5.7.1	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	330
A. 5.7.2	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	332
A. 5.8	T2-CEM I-Versuchsreihen .....	334
A. 5.8.1	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	334
A. 5.8.2	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	334
A. 5.9	T3-CEM I-Versuchsreihen.....	335
A. 5.9.1	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	335
A. 5.9.2	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	335
A. 5.10	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen.....	336
<b>A. 6</b>	<b>Zusammenstellung <math>\rho_s</math>, <math>e</math> und <math>n</math> der Oedometerversuchsreihen .....</b>	<b>337</b>
A. 6.1	Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	338
A. 6.2	T1-60 und 105°C-Versuchsreihen.....	338
A. 6.3	T1-DM-LP-Versuchsreihen.....	339
A. 6.4	T1-DM-B300-Versuchsreihen.....	339
A. 6.5	T1-DM-B500-Versuchsreihen.....	340
A. 6.6	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	341
A. 6.7	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	342
A. 6.7.1	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	342
A. 6.7.2	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	344
A. 6.8	T2-CEM I-Versuchsreihen .....	346
A. 6.8.1	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	346
A. 6.8.2	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	346
A. 6.9	T3-CEM I-Versuchsreihen.....	347
A. 6.9.1	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	347
A. 6.9.2	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	348
A. 6.10	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen.....	348
<b>A. 7</b>	<b>Zusammenstellung <math>e</math>, <math>n</math>, <math>s'</math> und <math>E_{Oed}</math> der Oedometerversuchsreihen .....</b>	<b>349</b>
A. 7.1	Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	350
A. 7.2	T1-60 und 105 °C-Versuchsreihen.....	351
A. 7.3	T1-DM-LP-Versuchsreihen.....	352

A. 7.4	T1-DM B300-Versuchsreihen .....	353
A. 7.5	T1-DM B500-Versuchsreihen .....	354
A. 7.6	T1-DM BK-Versuchsreihen .....	355
A. 7.7	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	356
A. 7.7.1	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	356
A. 7.7.2	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	358
A. 7.8	T2-CEM I-Versuchsreihen .....	360
A. 7.8.1	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	360
A. 7.8.2	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	361
A. 7.9	T3-CEM I-Versuchsreihen .....	362
A. 7.9.1	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	362
A. 7.9.2	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	363
A. 7.10	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	364
<b>A. 8</b>	<b>Zusammenstellung der Setzungen s der Oedometerversuchsreihen .....</b>	<b>365</b>
A. 8.1	Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	366
A. 8.2	T1 60 und 105°C-Versuchsreihen .....	367
A. 8.3	T1-DM-LP-Versuchsreihen .....	367
A. 8.4	T1-DM-B300-Versuchsreihen .....	368
A. 8.5	T1-DM-B500-Versuchsreihen .....	369
A. 8.6	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	370
A. 8.7	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	371
A. 8.7.1	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	371
A. 8.7.2	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	373
A. 8.8	T2-CEM I-Versuchsreihen .....	375
A. 8.8.1	T2-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	375
A. 8.8.2	T2-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	376
A. 8.9	T3-CEM I-Versuchsreihen .....	377
A. 8.9.1	T3-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	377
A. 8.9.2	T3-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	378
A. 8.10	S1-DM CEM I-Versuchsreihen .....	379
<b>A. 9</b>	<b>Zusammenstellung der graphischen Darstellungen der Oedometerversuchsreihen .....</b>	<b>381</b>
A. 9.1	Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1 .....	382
A. 9.1.1	log t-s' <sub>ges</sub> -Linien .....	382
A. 9.1.2	log t-s' <sub>ink</sub> -Linien .....	383
A. 9.2	T1-60 und 105 °C-Versuchsreihen .....	385
A. 9.2.1	log t-s' <sub>ges</sub> -Linien .....	385

A. 9.2.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	386
A. 9.3	T1-DM-LP-Versuchsreihen .....	388
A. 9.3.1	log t-s <sub>ges</sub> '-Linien .....	388
A. 9.3.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	389
A. 9.4	T1-DM-B500-Versuchsreihen .....	391
A. 9.4.1	log t-s <sub>ges</sub> '-Linien .....	391
A. 9.4.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	392
A. 9.5	T1-DM-B300-Versuchsreihen .....	394
A. 9.5.1	log t-s <sub>ges</sub> '-Linien .....	394
A. 9.5.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	395
A. 9.6	T1-DM-BK-Versuchsreihen .....	397
A. 9.6.1	log t-s <sub>ges</sub> '-Linien .....	397
A. 9.6.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	398
A. 9.7	T1-CEM I-Versuchsreihen .....	400
A. 9.7.1	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	400
A. 9.7.2	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen .....	403
A. 9.8	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen .....	406
A. 9.9	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen .....	409
A. 9.10	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen .....	412
A. 9.10.1	log t-s <sub>ges</sub> '-Linien .....	412
A. 9.10.2	log t-s <sub>ink</sub> '-Linien .....	413
<b>A. 10</b>	<b>Zusammenstellungen der Ergebnisse der Scherversuche .....</b>	<b>415</b>

## Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb. A. 1:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t/s'_{ges(25,0)}$ .....	382
Abb. A. 2:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .....	382
Abb. A. 3:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .....	383
Abb. A. 4:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t/s'_{ink(25,0)}$ .....	383
Abb. A. 5:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .....	384
Abb. A. 6:	Unbehandelte Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .....	384
Abb. A. 7:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .....	385
Abb. A. 8:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .....	385
Abb. A. 9:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .....	386
Abb. A. 10:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .....	386
Abb. A. 11:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .....	387
Abb. A. 12:	T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .....	387
Abb. A. 13:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .....	388
Abb. A. 14:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .....	388
Abb. A. 15:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .....	389
Abb. A. 16:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .....	389
Abb. A. 17:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .....	390
Abb. A. 18:	T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .....	390
Abb. A. 19:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .....	391
Abb. A. 20:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .....	391
Abb. A. 21:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .....	392
Abb. A. 22:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .....	392
Abb. A. 23:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .....	393
Abb. A. 24:	T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .....	393
Abb. A. 25:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .....	394
Abb. A. 26:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .....	394
Abb. A. 27:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .....	395
Abb. A. 28:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .....	395
Abb. A. 29:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .....	396
Abb. A. 30:	T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .....	396

Abb. A. 31:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .	397
Abb. A. 32:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .	397
Abb. A. 33:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .	398
Abb. A. 34:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .	398
Abb. A. 35:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100,0)}$ .	399
Abb. A. 36:	T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .	399
Abb. A. 37:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ .	400
Abb. A. 38:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(100)}$ .	400
Abb. A. 39:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(400)}$ .	401
Abb. A. 40:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .	401
Abb. A. 41:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(100)}$ .	402
Abb. A. 42:	T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(400)}$ .	402
Abb. A. 43:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .	403
Abb. A. 44:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(200)}$ .	403
Abb. A. 45:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ges(400)}$ .	404
Abb. A. 46:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ .	404
Abb. A. 47:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(200)}$ .	405
Abb. A. 48:	T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ink(400)}$ .	405
Abb. A. 49:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .	406
Abb. A. 50:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(200)}$ .	406
Abb. A. 51:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ges(400)}$ .	407
Abb. A. 52:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .	407
Abb. A. 53:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(200)}$ .	408
Abb. A. 54:	T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ink(400)}$ .	408
Abb. A. 55:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .	409
Abb. A. 56:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(200)}$ .	409
Abb. A. 57:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ges(400)}$ .	410
Abb. A. 58:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(50,0)}$ .	410
Abb. A. 59:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ink(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ink(200)}$ .	411
Abb. A. 60:	T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – $\log t-s'_{ink(400)}$ .	411
Abb. A. 61:	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(25,0)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .	412
Abb. A. 62:	S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: $\log t-s'_{ges(100)}$ , r.: $\log t-s'_{ges(200)}$ .	412



Abb. A. 63: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .....413  
Abb. A. 64: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ .....413  
Abb. A. 65: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(100)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(200)}$  .....414  
Abb. A. 66: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen –  $\log t-s'_{ink(400)}$  .....414



## Tabellenverzeichnis Anhang

Tab. A. 1:	Wasseraufnahmevermögen in $w$ und $w_A$ der T1-Versuchsreihen.....	306
Tab. A. 2:	Wasseraufnahmevermögen in $w$ und $w_A$ der T2-Versuchsreihen.....	307
Tab. A. 3:	Wasseraufnahmevermögen in $w$ und $w_A$ der T3-Versuchsreihen.....	308
Tab. A. 4:	Wasseraufnahmevermögen in $w$ und $w_A$ des Zuschlags Liapor Blähton.....	309
Tab. A. 5:	Bodenkennwerte der Dry-Mixed (DM) Oedometerversuchsreihen. ....	311
Tab. A. 6:	Bodenkennwerte der Wet-Mixed (WM) Versuchsreihen ( $w/z$ -Wert der Z-Suspension=1,5).....	312
Tab. A. 7:	Bodenkennwerte der Wet-Mixed (WM-0,5) Versuchsreihen ( $w/z$ -Wert der Z-Suspension=0,5).....	313
Tab. A. 8:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-unbehandelt/getrocknet. ....	314
Tab. A. 9:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-DM LP, -BK und -B300/B500. ....	314
Tab. A. 10:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-DM-CEM I.....	315
Tab. A. 11:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-WM-CEM I.....	315
Tab. A. 12:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T2-unbehandelt, -DM CEM I und -WM CEM I. ....	316
Tab. A. 13:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T3-unbehandelt, -DM CEM I und -WM CEM I. ....	316
Tab. A. 14:	Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen– S1-unbehandelt und -DM CEM I.....	317
Tab. A. 15:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1.....	320
Tab. A. 16:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-60 u. 105 °C.....	320
Tab. A. 17:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-LP.....	320
Tab. A. 18:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-B300.....	320
Tab. A. 19:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-B500.....	321
Tab. A. 20:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-BK. ....	321
Tab. A. 21:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-CEM I.....	321
Tab. A. 22:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-WM-CEM I. ....	322
Tab. A. 23:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T2-DM-CEM I. ....	322

Tab. A. 24:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T2-WM-CEM I. ....	322
Tab. A. 25:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T3-DM-CEM I. ....	322
Tab. A. 26:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T3-WM-CEM I. ....	323
Tab. A. 27:	Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – S1-DM-CEM I. ....	323
Tab. A. 28:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1. ....	326
Tab. A. 29:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-60 u. 105°C. ....	326
Tab. A. 30:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-LP. ....	327
Tab. A. 31:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-B300. ....	327
Tab. A. 32:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-B500. ....	328
Tab. A. 33:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-BK. ....	329
Tab. A. 34:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-CEM I-1 von 2. ....	330
Tab. A. 35:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-DM-CEM I-2 von 2. ....	331
Tab. A. 36:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-WM-CEM I-1 von 2. ....	332
Tab. A. 37:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T1-WM-CEM I-2 von 2. ....	333
Tab. A. 38:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T2-DM-CEM I. ....	334
Tab. A. 39:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T2-WM-CEM I. ....	334
Tab. A. 40:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T3-DM-CEM I. ....	335
Tab. A. 41:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – T3-WM-CEM I. ....	335
Tab. A. 42:	Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , u. $\rho_d$ – S1-DM-CEM I. ....	336
Tab. A. 43:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – unbehandelte Versuchsreihen. ....	338
Tab. A. 44:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-60 u. 105°C. ....	338
Tab. A. 45:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-LP. ....	339
Tab. A. 46:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-B300. ....	339
Tab. A. 47:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-B500. ....	340
Tab. A. 48:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-BK. ....	341
Tab. A. 49:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-CEM I-1 von 2. ....	342
Tab. A. 50:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-DM-CEM I-2 von 2. ....	343
Tab. A. 51:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-WM-CEM I-1 von 2. ....	344
Tab. A. 52:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T1-WM-CEM I-2 von 2. ....	345
Tab. A. 53:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T2-DM-CEM I. ....	346
Tab. A. 54:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T2-WM-CEM I. ....	346

Tab. A. 55:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T3-DM-CEM I .....	347
Tab. A. 56:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – T3-WM-CEM I .....	348
Tab. A. 57:	Zusammenstellung $\rho_s$ , e u. n – S1-DM-CEM I .....	348
Tab. A. 58:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1.....	350
Tab. A. 59:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-60 u. 105°C-1d 12,5-400d 400.....	351
Tab. A. 60:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-10 u. 20% LP-1d 12,5-5d 400.....	352
Tab. A. 61:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-B300.....	353
Tab. A. 62:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-B500.....	354
Tab. A. 63:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-BK.....	355
Tab. A. 64:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-CEM I-1 von 2.....	356
Tab. A. 65:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-DM-CEM I-2 von 2.....	357
Tab. A. 66:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-WM-CEM I-1 von 2.....	358
Tab. A. 67:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T1-WM-CEM I-2 von 2.....	359
Tab. A. 68:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T2-DM-CEM I.....	360
Tab. A. 69:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T2-WM-CEM I.....	361
Tab. A. 70:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T3-DM-CEM I.....	362
Tab. A. 71:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – T3-WM-CEM I.....	363
Tab. A. 72:	Zusammenstellung e, n, s' und $E_{Oed}$ – S1-DM-CEM I.....	364
Tab. A. 73:	Zusammenstellung der Setzungen s – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2 T3 u. S1.....	366
Tab. A. 74:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-60 u. 105°C.....	367
Tab. A. 75:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-LP.....	367
Tab. A. 76:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-B300.....	368
Tab. A. 77:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-B500.....	369
Tab. A. 78:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-BK.....	370
Tab. A. 79:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-CEM I-1 von 2.....	371
Tab. A. 80:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-CEM I-2 von 2.....	372
Tab. A. 81:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-WM-CEM I-1 von 2.....	373
Tab. A. 82:	Zusammenstellung der Setzungen s – T1-WM-CEM I-2 von 2.....	374
Tab. A. 83:	Zusammenstellung der Setzungen s – T2-DM-CEM I.....	375
Tab. A. 84:	Zusammenstellung der Setzungen s – T2-WM-CEM I.....	376

Tab. A. 85:	Zusammenstellung der Setzungen s – T3-DM-CEM I. ....	377
Tab. A. 86:	Zusammenstellung der Setzungen s – T3-WM-CEM I. ....	378
Tab. A. 87:	Zusammenstellung der Setzungen s – S1-DM-CEM I. ....	379
Tab. A. 88:	Zusammenstellung der Einbaudichten $\rho_f$ der Scherversuche. ....	415
Tab. A. 89:	Mittelwerte der unbehandelten Scherversuche T1-K1, K2 und Q1-1d. ....	416
Tab. A. 90:	Vergleich der Scherversuche T1-DM-B500 und T1-unbehandelt. ....	417
Tab. A. 91:	Vergleich der Scherversuche T1-DM-B300 und T1-unbehandelt. ....	417
Tab. A. 92:	Vergleich der Scherversuche T1-DM-BK und T1-unbehandelt. ....	418
Tab. A. 93:	Vergleich der Scherversuche T1-DM-CEM I und T1-unbehandelt. ....	418
Tab. A. 94:	Vergleich der Scherversuche T1-DM-LP und T1-unbehandelt. ....	419

## A. 1 Erklärungen – Statistische Kennwerte

Die in dieser Arbeit verwendeten Kennwerte beschränken sich auf Grundlage des Versuchsumfanges der Versuchsreihen auf die folgende statistischen Kenngrößen:

- empirischer Mittelwert<sup>18</sup>:

---

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. A. 1})$$

---

- empirische Standardabweichung über die korrigierte Stichprobenvarianz (wird nicht aufgeführt, Verwendung zu Berechnung des empirischen Variationskoeffizienten V):

---

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Gl. A. 2})$$

---

- empirischer Variationskoeffizient V:

---

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (\text{Gl. A. 3})$$

---

---

<sup>18</sup> in dieser Arbeit wird prinzipiell der empirische Mittelwert verwendet bzw. angesprochen, da ausschließlich die Scherversuche und einzelne Laborversuche mit einer Versuchsanzahl n=1 Versuch durchgeführt wurden.





## **A. 2 Zusammenstellung der Wasseraufnahmevermögen der Versuchstorfe und Liapor**

In den folgenden Tabellen sind die versuchstechnisch ermittelten Wasseraufnahmen der verschiedenen Versuchsreihen dargestellt. Der angegebene Variationskoeffizient  $V$  [%] bezieht sich hier auf die Wasseranteile  $w_A$  [M.-%].

**Tab. A. 1: Wasseraufnahmevermögen in  $w$  und  $w_A$  der T1-Versuchsreihen.**

		Versuchsreihe [Bez.]					
		T1-60°C-0,2g			T1-60°C-1,0g		
		Einwaage [g]: 0,2 Versuchszahl [n]: 4			Einwaage [g]: 1,0 Versuchszahl [n]: 2		
		$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]	$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]
Zeit [min]	0,5	26,95	21,23	21,69	34,93	25,89	47,16
	1	48,03	32,45	3,39	53,39	34,81	29,41
	2	63,62	38,88	3,10	75,35	42,97	11,31
	4	77,35	43,61	3,87	88,32	46,90	13,34
	8	85,33	46,04	6,89	98,85	49,71	7,25
	15	97,43	49,35	11,15	111,28	52,67	3,91
	30	103,47	50,85	8,79	118,26	54,18	3,56
	60	112,28	52,89	6,21	127,74	56,09	5,85
		Versuchsreihe [Bez.]					
		T1-105°C-1,0g					
		Einwaage [g]: 1,0 Versuchszahl [n]: 6					
		$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]			
Zeit [min]	0,5	0,00	0,00	-			
	1	0,00	0,00	-			
	2	0,25	0,25	150,91			
	4	0,50	0,50	106,60			
	8	0,98	0,97	106,47			
	15	2,20	2,15	52,68			
	30	4,43	4,24	47,80			
	60	8,22	7,60	49,17			

**Tab. A. 2: Wasseraufnahmevermögen in  $w$  und  $w_A$  der T2-Versuchsreihen.**

		Versuchsreihe [Bez.]					
		T2-60°C-0,2g			T2-60°C-1,0g		
		Einwaage [g]: 0,2 Versuchsanzahl [n]: 4			Einwaage [g]: 1,0 Versuchsanzahl [n]: 2		
		$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]	$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]
Zeit [min]	0,5	52,40	34,38	28,66	43,91	30,51	36,12
	1	74,85	42,81	24,29	67,12	40,16	27,69
	2	86,08	46,26	15,32	81,59	44,93	17,46
	4	92,32	48,00	10,70	90,82	47,59	9,93
	8	96,06	49,00	7,39	97,18	49,28	5,54
	15	98,55	49,63	4,45	100,80	50,20	3,74
	30	99,80	49,95	3,24	103,04	50,75	2,41
	60	101,67	50,41	2,06	103,92	50,96	1,82
		Versuchsreihe [Bez.]					
		T2-105°C-1,0g					
		Einwaage [g]: 1,0 Versuchsanzahl [n]: 4					
		$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]			
Zeit [min]	0,5	2,62	2,55	72,56			
	1	3,87	3,73	55,56			
	2	5,11	4,86	42,24			
	4	6,49	6,09	29,63			
	8	7,98	7,39	26,86			
	15	9,73	8,87	24,40			
	30	11,60	10,39	21,30			
	60	13,60	11,97	14,31			

**Tab. A. 3: Wasseraufnahmevermögen in  $w$  und  $w_A$  der T3-Versuchsreihen.**

		Versuchsreihe [Bez.]					
		T3-60°C-0,2g			T3-60°C-1,0g		
		Einwaage [g]: 0,2 Versuchszahl [n]: 2			Einwaage [g]: 1,0 Versuchszahl [n]: 1		
		<b>w</b> [M.-%]	<b>w<sub>A</sub></b> [M.-%]	<b>V<sub>wA</sub></b> [%]	<b>w</b> [M.-%]	<b>w<sub>A</sub></b> [M.-%]	<b>V<sub>wA</sub></b> [%]
Zeit [min]	0,5	86,83	46,47	4,35	82,83	45,31	-
	1	87,82	46,76	4,28	83,83	45,60	-
	2	87,82	46,76	4,28	84,33	45,75	-
	4	87,82	46,76	4,28	84,83	45,90	-
	8	88,82	47,04	4,21	84,88	45,91	-
	15	88,82	47,04	4,21	84,98	45,94	-
	30	90,32	47,46	4,52	84,98	45,94	-
	60	92,12	47,95	5,83	85,63	46,13	-
		Versuchsreihe [Bez.]					
		T3-60°C-0,2g-MW			T3-60°C-1,0g-MW		
		Einwaage [g]: 0,2 Versuchszahl [n]: 2			Einwaage [g]: 1,0 Versuchszahl [n]: 1		
		<b>w</b> [M.-%]	<b>w<sub>A</sub></b> [M.-%]	<b>V<sub>wA</sub></b> [%]	<b>w</b> [M.-%]	<b>w<sub>A</sub></b> [M.-%]	<b>V<sub>wA</sub></b> [%]
Zeit [min]	0,5	71,86	41,81	4,57	73,85	42,48	-
	1	73,35	42,31	3,89	76,35	43,29	-
	2	73,90	42,50	4,34	77,84	43,77	-
	4	73,95	42,51	4,28	77,84	43,77	-
	8	73,95	42,51	4,28	77,84	43,77	-
	15	73,95	42,51	4,28	79,34	44,24	-
	30	73,95	42,51	4,28	80,84	44,70	-
	60	73,95	42,51	4,28	80,84	44,70	-

**Tab. A. 4: Wasseraufnahmevermögen in  $w$  und  $w_A$  des Zuschlags Liapor Blähton.**

		Versuchsreihe [Bez.]		
		Liapor- 105°C- 1,0g		
		Einwaage [g]: 1,0 Versuchszahl [n]: 3		
		$w$ [M.-%]	$w_A$ [M.-%]	$V_{wA}$ [%]
Zeit [min]	0,5	77,24	43,58	0,37
	1	77,30	43,60	0,37
	2	77,37	43,62	0,37
	4	77,48	43,66	0,37
	8	77,64	43,71	0,37
	15	77,90	43,79	0,37
	30	78,43	43,96	0,56
	60	79,84	44,40	2,99



### A. 3 Zusammenstellung der Bodenkennwerte der Oedometerversuchsr.

Tab. A. 5: Bodenkennwerte der Dry-Mixed (DM) Oedometerversuchsreihen.

Bodenkennwerte <sup>1</sup>	Versuchsboden				
	T1	T2	T3	S1	
<b>vor Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt: [M.-%]	31,42	44,41	50,58	83,22	
FS-Anteil mineralisch: [M.-%]	20,85	32,98	41,75	81,67	
FS-Anteil organisch: [M.-%]	10,57	11,43	8,83	1,56	
natürlicher Wasseranteil $w_{An}$ : [M.-%]	68,58	55,59	49,42	16,78	
natürlicher Wassergehalt $w_n$ : [M.-%]	218,30	125,15	97,69	20,16	
<b>nach Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt bez. auf die Feuchtmasse <sup>2</sup> : [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	34,68	47,06	52,94	84,02
	10,0	37,65	49,47	55,08	84,75
	20,0	42,85	53,68	58,82	86,02
BM-Anteil bez. auf die Feuchtmasse: [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	4,76	4,76	4,76	4,76
	10,0	9,09	9,09	9,09	9,09
	20,0	16,67	16,67	16,67	16,67
BM-Anteil bez. auf die Trockenmasse: [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	15,92	11,26	9,88	6,01
	10,0	31,83	22,52	19,77	12,02
	20,0	63,66	45,03	39,54	24,03
FS-Anteil mineralisch bez. auf die Feuchtmasse: [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	19,86	31,41	39,76	77,78
	10,0	18,96	29,98	37,96	74,24
	20,0	17,38	27,49	34,79	68,06
FS-Anteil organisch bez. auf die Feuchtmasse: [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	10,06	10,89	8,41	1,48
	10,0	9,61	10,39	8,03	1,41
	20,0	8,80	9,53	7,36	1,30
Wasseranteil $w_{Acalc}$ nach BM-Zugabe: [M.-%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	65,32	52,94	47,06	15,98
	10,0	62,35	50,53	44,92	15,25
	20,0	57,15	46,32	41,18	13,98
Wassergehalt $w_{calc}$ nach BM-Zugabe: [%]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	188,33	112,49	88,90	19,02
	10,0	165,59	102,15	81,57	18,00
	20,0	133,39	86,29	70,01	16,25
theoretischer w/BM-Wert: [-]					
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	13,72	11,12	9,88	3,36
	10,0	6,86	5,56	4,94	1,68
	20,0	3,43	2,78	2,47	0,84

<sup>1</sup>die Werte basieren auf den mittleren gemessenen natürlichen Wasseranteilen  $w_{An}$  bzw. -gehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$ , (nicht untersuchte Kombinationen), <sup>2</sup> der FS-Anteil insgesamt ergibt sich aus BM-Anteil bez. a. d. Feuchtm. + FS-Anteil mineral. bez. auf die Feuchtm. + FS-Anteil org. bez. a. d. Feuchtm., der BM-Anteil wurde nicht als mineralischer Anteil berücksichtigt.

Tab. A. 6: Bodenkennwerte der Wet-Mixed (WM) Versuchsreihen (w/z-Wert der Z-Suspension=1,5).

Bodenkennwerte <sup>1</sup>		Versuchsboden			
		T1	T2	T3	S1
<b>vor Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt:	[M.-%]	31,42	44,41	50,58	83,22
FS-Anteil mineralisch:	[M.-%]	20,85	32,98	41,75	81,67
FS-Anteil organisch:	[M.-%]	10,57	11,43	8,83	1,56
natürlicher Wasseranteil $w_{An}$ :	[M.-%]	68,58	55,59	49,42	16,78
natürlicher Wassergehalt $w_n$ :	[M.-%]	218,30	125,15	97,69	20,16
<b>nach Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt bez. auf die Feuchtmasse <sup>2</sup> :		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	32,37	43,92	49,41	78,42
	10,0	33,13	43,53	48,47	74,58
	20,0	34,28	42,94	47,06	68,81
BM-Anteil bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	4,44	4,44	4,44	4,44
	10,0	8,00	8,00	8,00	8,00
	20,0	13,33	13,33	13,33	13,33
BM-Anteil bez. auf die Trockenmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	15,92	11,26	9,88	6,01
	10,0	31,83	22,52	19,77	12,02
	20,0	63,66	45,03	39,54	24,03
FS-Anteil mineralisch bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	18,53	29,32	37,11	72,59
	10,0	16,68	26,39	33,40	65,33
	20,0	13,90	21,99	27,83	54,44
FS-Anteil organisch bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	9,39	10,16	7,85	1,38
	10,0	8,45	9,15	7,07	1,25
	20,0	7,04	7,62	5,89	1,04
Wasseranteil $w_{Acalc}$ nach BM-Zugabe:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	67,63	56,08	50,59	21,58
	10,0	66,87	56,47	51,53	25,42
	20,0	65,72	57,06	52,94	31,19
Wassergehalt $w_{calc}$ nach BM-Zugabe:		[%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	208,92	127,66	102,40	27,52
	10,0	201,81	129,72	106,32	34,09
	20,0	191,73	132,87	112,51	45,32
theoretischer w/z-Wert:		[-]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	15,22	12,62	11,38	4,86
	10,0	8,36	7,06	6,44	3,18
	20,0	4,93	4,28	3,97	2,34

<sup>1</sup>die Werte basieren auf den mittleren gemessenen natürlichen Wasseranteilen  $w_{An}$  bzw. -gehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$ , (nicht untersuchte Kombinationen), <sup>2</sup> der FS-Anteil insgesamt ergibt sich aus BM-Anteil bez. a. d. Feuchtm. + FS-Anteil mineral. bez. auf die Feuchtm. + FS-Anteil org. bez. a. d. Feuchtm., der BM-Anteil wurde nicht als mineralischer Anteil berücksichtigt.



Tab. A. 7: **Bodenkennwerte der Wet-Mixed (WM-0,5) Versuchsreihen (w/z-Wert der Z-Suspension=0,5).**

Bodenkennwerte <sup>1</sup>		Versuchsboden			
		T1	T2	T3	S1
<b>vor Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt:	[M.-%]	31,42	44,41	50,58	83,22
FS-Anteil mineralisch:	[M.-%]	20,85	32,98	41,75	81,67
FS-Anteil organisch:	[M.-%]	10,57	11,43	8,83	1,56
natürlicher Wasseranteil $w_{An}$ :	[M.-%]	68,58	55,59	49,42	16,78
natürlicher Wassergehalt $w_n$ :	[M.-%]	218,30	125,15	97,69	20,16
<b>nach Zugabe Zuschlag, Mischbinder oder Bindemittel (BM):</b>					
FS-Anteil insgesamt bez. auf die Feuchtmasse <sup>2</sup> :		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	33,88	45,97	51,71	82,07
	10,0	36,01	47,32	52,68	81,06
	20,0	39,55	49,55	54,30	79,40
BM-Anteil bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	4,65	4,65	4,65	4,65
	10,0	8,70	8,70	8,70	8,70
	20,0	15,38	15,38	15,38	15,38
BM-Anteil bez. auf die Trockenmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	15,92	11,26	9,88	6,01
	10,0	31,83	22,52	19,77	12,02
	20,0	63,66	45,03	39,54	24,03
FS-Anteil mineralisch bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	19,40	30,68	38,84	75,97
	10,0	18,13	28,68	36,31	71,01
	20,0	16,04	25,37	32,12	62,82
FS-Anteil organisch bez. auf die Feuchtmasse:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	9,83	10,63	8,22	1,45
	10,0	9,19	9,94	7,68	1,35
	20,0	8,13	8,79	6,79	1,20
Wasseranteil $w_{Acalc}$ nach BM-Zugabe:		[M.-%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	66,12	54,03	48,29	17,93
	10,0	63,99	52,68	47,32	18,94
	20,0	60,45	50,45	45,70	20,60
Wassergehalt $w_{calc}$ nach BM-Zugabe:		[%]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	195,19	117,55	93,40	21,85
	10,0	177,66	111,34	89,82	23,36
	20,0	152,84	101,82	84,18	25,94
theoretischer w/z-Wert:		[-]			
Zugabe Bindemittel zum Versuchsboden [M.-%]	5,0	14,22	11,62	10,38	3,86
	10,0	7,36	6,06	5,44	2,18
	20,0	3,93	3,28	2,97	1,34

<sup>1</sup>die Werte basieren auf den mittleren gemessenen natürlichen Wasseranteilen  $w_{An}$  bzw. -gehalten  $w_n$  und Glühverlusten  $V_{gl}$  (nicht untersuchte Kombinationen), <sup>2</sup> der FS-Anteil insgesamt ergibt sich aus BM-Anteil bez. a. d. Feuchtm. + FS-Anteil mineral. bez. auf die Feuchtm. + FS-Anteil org. bez. a. d. Feuchtm., der BM-Anteil wurde nicht als mineralischer Anteil berücksichtigt.

### A. 3.1 Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen

#### A. 3.2 T1-Versuchsreihen

##### A. 3.2.1 T1-unbehandelt/getrocknet-Versuchsreihen

Tab. A. 8: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-unbehandelt/getrocknet.

<b>Torf 1 (T1) unbehandelt bzw. getrocknet</b>
unbehandelt („“)
T1-1d 12,5-5d 400
T1-3d 25,0-10d 400
getrocknet bei 60 und 105°C („60 u. 105°C“)
T1-60°C-1d 12,5-20d 400
T1-105°C-1d 12,5-20d 400

##### A. 3.2.2 T1-DM LP, -BK, -B300/B500-Versuchsreihen

Tab. A. 9: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-DM LP, -BK und -B300/B500.

<b>Torf 1 (T1) Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“)</b>
Zuschlag: Liapor („LP“)
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400
T1-DM-20%- LP-1d 12,5-5d 400
Bindemittel: Branntkalk („BK“)
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400
T1-DM-10% BK-3d 25-4d-400
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400
Bindemittel: B300 („B300“)
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400
Bindemittel: B500 („B500“)
T1-DM-5%-B500-1d 12,5-5d 400
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400

### A. 3.2.3 T1-CEM I-Versuchsreihen

#### A. 3.2.3.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 10: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-DM-CEM I.

<b>Torf 1 (T1)</b> <b>Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“)</b>
Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400
T1-DM-10% CEM I-1d 12,5-28d 400
T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400
T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400
T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400
T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400
T1-DM-5% CEM I-5d 25-9d 400
T1-DM-10% CEM I-5d 25-9d 400
T1-DM-20% CEM I-5d 25-9d 400
T1-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400
T1-DM-5% CEM I-14d-54d 400
T1-DM-20% CEM I-14d 25-54 d 400
T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400

#### A. 3.2.3.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 11: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T1-WM-CEM I.

<b>Torf 1 (T1)</b> <b>Nassmischverfahren Wet-Mixed („WM“)</b> <b>mit <math>w/z=2,0</math> bzw. <math>w/z=0,5</math></b>
Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T1-WM-5% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400
T1-WM-10% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400
T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400
T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400
T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400
T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400
T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400
T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400
T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400

### A. 3.3 T2-Versuchsreihen

Tab. A. 12: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T2-unbehandelt, -DM CEM I und -WM CEM I.

<b>Torf 2 (T2) unbehandelt, Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“) Nassmischverfahren Wet-Mixed („WM“)</b>
unbehandelt („-“)
T2-1d 25-19d 400
Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“) Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T2-DM-5% CEM I -1d 25-5d 400
T2-DM-10% CEM I -1d 25-5d 400
T2-DM-20% CEM I -1d 25-5d 400
T2-DM-20% CEM I -7d 25-170d 400
T2-DM-20% CEM I -3d 0-1d 25-4d 400
Nassmischverfahren Wet-Mixed mit w/z=2,0 („WM“) bzw. w/z=0,5 („WM 0,5“) Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T2-WM-20% CEM I -3d 0-1d 25-4d 400
T2-WM-20% CEM I -3d 0-7d 25-6d 400
T2-WM 0,5-20% CEM I -3d 0-1d 25-12d 400

### A. 3.4 T3-Versuchsreihen

Tab. A. 13: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen – T3-unbehandelt, -DM CEM I und -WM CEM I.

<b>Torf 3 (T3) unbehandelt, Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“) Nassmischverfahren Wet-Mixed</b>
unbehandelt („-“)
T3-1d 25-32d 400
Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“) Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T3-DM-5% CEM I -1d 25-4d 400
T3-DM-10% CEM I -1d 25-4d 400
T3-DM-20% CEM I -1d 25-4d 400
T3-DM-20% CEM I -7d 25-170d 400
T3-DM-20% CEM I -3d 0-1d 25-5d 400
Nassmischverfahren („WM“) Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)
T3-WM-20% CEM I -3d 0-1d 25-5d 400
T3-WM-20% CEM I -3d 0-7d 25-5d 400
T3-WM 0,5-20% CEM I -3d 0-1d 25-12d 400

### A. 3.5 S1-Versuchsreihen

Tab. A. 14: Zusammenstellung der Oedometerversuchsreihen– S1-unbehandelt und -DM CEM I.

<b>Schluff (S1) unbehandelt, Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“)</b>
unbehandelt („ “)
S1-1d 25,0-19d 400
<b>Trockenmischverfahren Dry-Mixed („DM“) Bindemittel: CEM I 52,5 R („CEM I“)</b>
S1-DM-5% CEM I-1d 25-19d 400
S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400



#### A. 4 Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile der Oedometerversuchsreihen

Die in den Tabellen dieses Abschnitts aufgeführten Differenzen sind die relativen Differenzen (rel. D.) [%], die sich aus dem bestimmten Wasseranteil der in die Oedometerversuchsringe eingebauten Probemassen  $w_{AE}$  (durch Trocknung best. Wasseranteil bei Einbau) [M.-%] (s. Abschn. A.6) bzw. bei den unbehandelten Versuchsreihen bzw. getrockneten und wieder befeuchteten Versuchsreihen (T1-60 und 105°C-1d 12,5-20d 400), bezogen auf den bestimmten mittleren natürlichen Wasseranteil  $w_{An}$  [M.-%] (s. Tab. 6.3) nach (Gl. A. 4) ergeben.

Bei den behandelten Proben beziehen sich diese auf den berechneten Wasseranteil  $w_{Acalc}$  nach Tab. A. 5 bis Tab. A. 7, der sich ohne Berücksichtigung etwaiger Verluste (bspw. Wasseraustrieb durch exotherme Reaktionen o. Verdunstung) durch die Zugabe des Zuschlags (LP) bzw. Bindemittels (B300, B500, BK und CEM I) rein rechnerisch ergibt und dessen Grundlage wiederum der bestimmte mittlere natürliche Wasseranteil  $w_{An}$  (s. Tab. 6.3) bildet.

---


$$\text{rel. D. Wasseranteil} = \frac{\text{Wasseranteil bei Einbau der Probe } w_{AE}}{\text{natürlicher / berechneter Wasseranteil } w_{An} / w_{calc}} \quad [\%] \quad (\text{Gl. A. 4})$$


---

#### A. 4.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

Tab. A. 15: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1.

Versuchsreihe [Bez.]	WAE [M.-%]	W <sub>An</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-1d 12,5-5d 400	68,81	68,58	2,35
T1-3d 25-4d 400	70,19	68,58	0,34
T2-1d 25-19d 400	56,36	55,59	1,39
T3-1d 25-32d 400	49,25	49,42	-0,35
S1-1d 25-19 d 400	17,10	16,78	1,92

#### A. 4.2 T1-60 und -105°C-Versuchsreihen

Tab. A. 16: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-60 u. 105 °C.

Versuchsreihe [Bez.]	WAE [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-60°C-1d 12,5-20d 400	60,71	68,58	11,47
T1-105°C-1d 12,5-20d 400	55,71	68,58	18,76

#### A. 4.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Tab. A. 17: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-LP.

Versuchsreihe [Bez.]	WAE [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400	61,32	62,35	-1,65
T1-DM-20% LP-1d 12,5-5d 400	57,46	57,15	0,54

#### A. 4.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Tab. A. 18: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-B300.

Versuchsreihe [Bez.]	WAE [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400	67,06	65,32	2,66
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400	64,02	62,35	2,68
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400	56,56	57,15	-1,03
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400	67,35	65,32	3,11
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400	63,81	62,35	2,34
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400	56,35	57,15	-1,40



#### A. 4.5 T1-DM-B500-Versuchsreihen

Tab. A. 19: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-B500.

Versuchsreihe [Bez.]	W <sub>AE</sub> [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400	66,76	65,32	2,20
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400	62,47	62,35	0,19
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400	55,51	57,15	-2,86
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400	66,92	65,32	2,45
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400	62,08	62,35	-0,43
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400	55,57	57,15	-2,77

#### A. 4.6 T1-DM-BK-Versuchsreihen

Tab. A. 20: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-BK.

Versuchsreihe [Bez.]	W <sub>AE</sub> [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400	66,76	65,32	2,20
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400	61,52	62,35	-1,34
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400	53,64	57,15	-6,14
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400	66,18	65,32	1,32
T1-DM-10% BK-3d 25-4d 400	61,59	62,35	-1,22
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400	53,41	57,15	-6,54

#### A. 4.7 T1-CEM I-Versuchsreihen

##### A. 4.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 21: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-DM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	W <sub>AE</sub> [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400	66,49	65,32	1,80
T1-DM-10% CEM I-1d 12,5-28d 400	63,31	62,35	1,54
T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400	57,01	57,15	-0,25
T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400	66,75	65,32	2,18
T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400	63,47	62,35	1,79
T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400	55,22	57,15	-3,37
T1-DM-5% CEM I-5d 25-9d 400	66,11	65,32	1,21
T1-DM-10% CEM I-5d 25-9d 400	61,94	62,35	-0,66
T1-DM-20% CEM I-5d 25-9d 400	56,28	57,15	-1,52
T1-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	56,28	57,15	-1,53
T1-DM-5% CEM I-14d 25-54d 400	66,53	65,32	1,85
T1-DM-20% CEM I-14d 25-54d 400	56,23	57,15	-1,61
T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	55,27	57,15	-3,29

**A. 4.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 22: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T1-WM-CEM I.**

<b>Versuchsreihe</b> [Bez.]	<b>W<sub>AE</sub></b> [M.-%]	<b>W<sub>Acalc</sub></b> [M.-%]	<b>rel. D.</b> [%]
T1-WM-5% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	65,69	67,63	-2,87
T1-WM-10% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	64,76	66,87	-3,16
T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	63,67	65,72	-3,11
T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	65,06	67,63	-3,81
T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	63,57	66,87	-4,93
T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	62,75	65,72	-4,52
T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	63,03	65,72	-4,09
T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	63,23	65,72	-3,78
T1-WM 0,5-20 % CEM-3d 0-1d 25-12d 400	59,35	60,45	-1,83

**A. 4.8 T2-CEM I-Versuchsreihen****A. 4.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 23: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T2-DM-CEM I.**

<b>Versuchsreihe</b> [Bez.]	<b>W<sub>AE</sub></b> [M.-%]	<b>W<sub>Acalc</sub></b> [M.-%]	<b>rel. D.</b> [%]
T2-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400	51,76	52,49	-1,39
T2-DM-10% CEM I-1d 25-5d 400	49,89	50,53	-1,26
T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400	45,44	46,32	-1,90
T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	46,83	46,32	1,10
T2-DM-20% CEM I- 3d 0-1d 25-4d 400	44,82	46,32	-3,23

**A. 4.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 24: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T2-WM-CEM I.**

<b>Versuchsreihe</b> [Bez.]	<b>W<sub>AE</sub></b> [M.-%]	<b>W<sub>Acalc</sub></b> [M.-%]	<b>rel. D.</b> [%]
T2-WM-20% CEM I- 3d 0-1d 25-4d 400	55,65	57,06	-2,47
T2-WM-20% CEM I- 3d 0-7d 25-6d 400	56,01	57,06	-1,83
T2-WM 0,5-20% CEM I- 3d 0-1d 25-12d 400	51,45	50,45	1,98

**A. 4.9 T3-CEM I-Versuchsreihen****A. 4.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 25: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T3-DM-CEM I.**

<b>Versuchsreihe</b> [Bez.]	<b>W<sub>AE</sub></b> [M.-%]	<b>W<sub>Acalc</sub></b> [M.-%]	<b>rel. D.</b> [%]
T3-DM-5% CEM I-1d 25-4d 400	46,08	47,06	-2,08
T3-DM-10% CEM I-1d 25-4d 400	43,85	44,92	-2,38
T3-DM-20% CEM I-1d 25-4d 400	39,68	41,18	-3,64
T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	40,24	41,18	-2,28
T3-DM-20% CEM I- 3d 0-1d 25-5d 400	39,41	41,18	-4,30

#### A. 4.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 26: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – T3-WM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	W <sub>AE</sub> [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
T3-WM-20% CEM I- 3d 0-1d 25-5d 400	51,65	52,94	-2,44
T3-WM-20% CEM I- 3d 0-7d 25-6d 400	51,52	52,94	-2,69
T3-WM 0,5-20% CEM I- 3d 0-1d 25-5d 400	44,52	45,70	-2,59

#### A. 4.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 27: Zusammenstellung der rel. Differenzen der Wasseranteile – S1-DM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	W <sub>AE</sub> [M.-%]	W <sub>Acalc</sub> [M.-%]	rel. D. [%]
S1-DM-5% CEM I-1d 25-19d 400	16,29	15,98	1,94
S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400	14,17	13,98	1,36



### **A. 5 Zusammenstellung $w$ , $w_A$ , $\rho_f$ , und $\rho_d$ der Oedometerversuchsreihen**

Die in diesem Abschnitt abgebildeten Tabellen enthalten die mittleren Einbau- und Ausbauparameter Wassergehalt  $w$  [M.-%], Wasseranteil  $w_A$  [M.-%], Feuchtdichte  $\rho_f$  und Trockendichte  $\rho_d$  [g/cm<sup>3</sup>] der Oedometerversuchsreihen.

Zusätzlich sind hier die Variationskoeffizienten  $V$  [%] angegeben. Auf eine Angabe des Abweichungskoeffizienten der Wassergehalte wurde verzichtet. Da der Wassergehalt  $w$  bzw. Wasseranteil  $w_A$  vor Einbau nur an einer Probe bestimmt wurde, ergeben sich auch hier keine Abweichungen bzw. die Variationskoeffizienten  $V$  der Einbaufeuchtdichte  $\rho_f$  und der Trockendichte  $\rho_d$  weisen die gleichen Werte auf.

## A. 5.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

Tab. A. 28: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1- 1d 12,5- 5d 400	Wert	220,64	68,81	1,21	0,38	111,89	52,80	1,52	0,72
	V [%]	-	-	0,82	0,82	-	0,77	1,04	1,35
T1- 3d 25- 4d 400	Wert	235,49	70,19	1,20	0,36	123,92	55,34	1,52	0,68
	V [%]	-	-	0,18	0,18	-	0,67	0,83	0,22
T2- 1d 25- 19d 400	Wert	129,15	56,36	1,34	0,59	64,01	39,03	1,68	1,03
	V [%]	-	-	0,46	0,46	-	0,98	0,33	0,72
T3- 1d 25- 32d 400	Wert	97,03	49,25	1,41	0,72	52,95	34,62	1,78	1,16
	V [%]	-	-	2,50	2,50	-	0,61	3,54	3,75
S1- 1d 25- 19 d 400	Wert	20,63	17,10	1,99	1,65	17,81	15,12	2,10	1,79
	V [%]	-	-	0,29	0,29	-	0,96	0,57	0,57

## A. 5.2 T1-60 und 105°C-Versuchsreihen

Tab. A. 29: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-60 u. 105°C.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1- 60°C- 1d 12,5- 20d 400	Wert	154,53	60,71	1,32	0,52	100,81	50,20	1,49	0,74
	V [%]	-	-	0,30	0,30	-	0,88	2,12	1,92
T1- 105°C- 1d 12,5- 20d 400	Wert	125,81	55,71	1,34	0,59	77,78	43,90	1,63	0,91
	V [%]	-	-	0,07	0,07	-	0,32	6,29	6,05

### A. 5.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Tab. A. 30: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-DM-LP.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400	Wert	158,56	61,32	1,22	0,47	100,11	50,02	1,53	0,77
	V [%]	-	-	0,71	0,71	-	1,01	1,21	0,74
T1-DM-20% LP-1d 12,5-5d 400	Wert	135,05	57,46	1,16	0,49	98,26	49,56	1,38	0,70
	V [%]	-	-	0,93	0,93	-	1,38	2,94	2,79

### A. 5.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Tab. A. 31: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-DM-B300.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	203,58	67,06	1,21	0,40	102,63	50,65	1,43	0,71
	V [%]	-	-	0,73	0,73	-	0,80	2,44	2,42
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	177,96	64,02	1,28	0,46	98,86	49,71	1,46	0,73
	V [%]	-	-	0,15	0,15	-	0,55	1,70	2,05
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	130,21	56,56	1,35	0,59	96,02	48,98	1,43	0,73
	V [%]	-	-	1,26	1,26	-	0,56	1,99	2,50
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400	Wert	206,32	67,35	1,22	0,40	124,55	55,45	1,41	0,63
	V [%]	-	-	0,73	0,73	-	2,13	1,33	3,92
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400	Wert	176,30	63,81	1,27	0,46	115,57	53,61	1,47	0,68
	V [%]	-	-	0,40	0,40	-	0,16	2,42	2,48
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400	Wert	129,08	56,35	1,36	0,59	110,55	52,50	1,50	0,72
	V [%]	-	-	0,33	0,33	-	0,62	1,00	0,33

**A. 5.5 T1-DM-B500-Versuchsreihen****Tab. A. 32: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-DM-B500.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	200,84	66,76	1,24	0,41	121,35	54,82	1,48	0,74
	V [%]	-	-	0,15	0,15	-	-	0,46	0,82
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	166,45	62,47	1,26	0,47	114,58	53,40	1,46	1,04
	V [%]	-	-	0,09	0,09	-	-	0,92	2,64
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	124,79	55,51	1,36	0,60	107,54	51,82	1,50	1,03
	V [%]	-	-	0,23	0,23	-	-	1,84	7,38
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400	Wert	202,28	66,92	1,23	0,41	120,04	54,55	1,46	0,67
	V [%]	-	-	1,04	1,04	-	0,32	2,41	2,49
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400	Wert	163,72	62,08	1,27	0,48	115,31	53,55	1,49	0,69
	V [%]	-	-	0,23	0,23	-	0,62	2,41	3,00
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400	Wert	125,07	55,57	1,36	0,60	111,00	52,60	1,50	0,71
	V [%]	-	-	0,24	0,24	-	0,75	1,30	0,67



**A. 5.6 T1-DM-BK-Versuchsreihen****Tab. A. 33: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$  u.  $\rho_d$  – T1-DM-BK.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	200,84	66,76	1,25	0,42	118,80	54,30	1,48	0,74
	V [%]	-	-	0,24	0,24	-	0,24	0,46	0,82
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	159,85	61,52	1,29	0,50	105,29	51,29	1,51	0,77
	V [%]	-	-	0,24	0,24	-	0,54	1,24	1,59
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	115,71	53,64	1,35	0,63	91,35	47,74	1,56	0,86
	V [%]	-	-	0,16	0,16	-	0,40	3,75	3,19
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400	Wert	195,71	66,18	1,25	0,42	115,12	53,51	1,50	0,70
	V [%]	-	-	0,54	0,54	-	0,62	0,84	1,24
T1-DM-10% BK-3d 25-4d 400	Wert	160,33	61,59	1,30	0,50	103,80	50,93	1,52	0,75
	V [%]	-	-	0,37	0,37	-	0,36	1,23	1,53
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400	Wert	114,65	53,41	1,34	0,62	88,84	47,04	1,49	0,79
	V [%]	-	-	0,41	0,41	-	0,46	0,90	1,31

**A. 5.7 T1-CEM I-Versuchsreihen****A. 5.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 34: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-DM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		w [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	w [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM- 5% CEM I- 1d 12,5- 28d 400	Wert	198,46	66,49	1,27	0,43	138,98	58,15	1,47	0,69
	V [%]	-	-	1,32	1,32	-	0,59	0,95	1,05
T1-DM- 10% CEM I- 1d 12,5- 28d 400	Wert	172,57	63,31	1,30	0,48	136,32	57,68	1,45	0,68
	V [%]	-	-	1,38	1,38	-	0,19	1,67	1,33
T1-DM- 20% CEM I- 1d 12,5- 28d 400	Wert	132,59	57,01	1,34	0,58	119,00	54,34	1,44	0,72
	V [%]	-	-	0,70	0,70	-	0,23	0,75	1,58
T1-DM- 5% CEM I-3d 25- 4d 400	Wert	200,71	66,75	1,24	0,41	138,31	58,04	1,42	0,60
	V [%]	-	-	0,54	0,54	-	0,01	0,71	0,72
T1-DM- 10% CEM I-3d 25- 4d 400	Wert	173,72	63,47	1,30	0,47	137,93	57,97	1,44	0,60
	V [%]	-	-	0,48	0,48	-	0,26	0,77	0,72
T1-DM- 20% CEM I-3d 25- 4d 400	Wert	123,33	56,22	1,35	0,60	118,88	54,31	1,43	0,65
	V [%]	-	-	0,98	0,98	-	0,47	0,47	0,82

Tab. A. 35: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-DM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-DM- 5% CEM I- 5d 25- 9d 400	Wert	195,08	66,11	1,24	0,42	129,20	56,37	1,42	0,62
	V [%]	-	-	0,21	0,21	-	0,81	1,39	0,49
T1-DM- 10% CEMI- 5d 25- 9d 400	Wert	162,74	61,94	1,29	0,49	130,60	56,63	1,41	0,61
	V [%]	-	-	0,15	0,15	-	1,00	0,54	0,77
T1-DM- 20% CEMI- 5d 25- 9d 400	Wert	128,74	56,28	1,34	0,59	112,46	52,93	1,42	0,67
	V [%]	-	-	0,24	0,24	-	0,74	0,64	1,26
T1-DM 20% CEMI- 7d 25- 170d 400	Wert	128,72	56,28	1,33	0,58	118,38	54,20	1,43	0,65
	V [%]	-	-	1,00	1,00	-	0,98	1,60	2,61
T1-DM- 5% CEM I-14d 25- 54d 400	Wert	198,74	66,53	1,25	0,42	123,94	55,34	1,42	0,63
	V [%]	-	-	0,04	0,04	-	0,80	1,15	2,14
T1-DM- 20% CEM I- 14d 25- 54d 400	Wert	128,47	56,23	1,34	0,59	109,51	52,27	1,41	0,67
	V [%]	-	-	0,34	0,34	-	0,94	0,50	1,07
T1-DM- 20% CEM I- 10d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	123,56	55,27	1,32	0,59	113,89	53,25	1,40	0,75
	V [%]	-	-	1,42	1,42	-	0,71	1,28	1,66

**A. 5.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 36: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-WM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-WM- 5% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	191,48	65,69	1,22	0,42	130,98	56,71	1,40	0,60
	V [%]	-	-	0,76	0,76	-	0,50	1,68	2,18
T1-WM- 10% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	183,74	64,76	1,25	0,44	137,40	57,88	1,40	0,59
	V [%]	-	-	1,40	1,40	-	0,33	1,69	1,76
T1-WM- 20% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	175,28	63,67	1,30	0,47	143,18	58,88	1,41	0,58
	V [%]	-	-	0,86	0,86	-	0,06	1,30	1,26
T1-WM- 5% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	186,17	65,06	1,28	0,45	121,73	54,90	1,50	0,68
	V [%]	-	-	0,67	0,67	-	0,22	1,43	1,25
T1-WM- 10% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	174,52	63,57	1,32	0,48	127,51	56,04	1,48	0,65
	V [%]	-	-	2,07	2,07	-	0,61	2,84	3,33
T1-WM- 20% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	168,47	62,75	1,31	0,49	135,08	57,46	1,38	0,59
	V [%]	-	-	0,61	0,61	-	0,57	0,61	0,79

Tab. A. 37: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T1-WM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T1-WM- 20% CEM I- 10d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	170,51	65,72	1,28	0,47	145,40	59,25	1,39	0,82
	V [%]	-	-	0,85	0,85	-	0,24	0,57	0,62
T1-WM- 20% CEM I- 3d 0- 7d 25- 6d 400	Wert	171,99	63,23	1,27	0,47	146,16	59,38	1,37	0,56
	V [%]	-	-	1,51	1,51	-	0,40	0,67	1,17
T1-WM 0,5- 20 % CEM I- 3d 0- 1d 25- 12d 400	Wert	145,98	59,35	1,28	0,52	126,73	55,89	1,40	0,62
	V [%]	-	-	0,89	0,89	-	0,49	0,87	0,80

**A. 5.8 T2-CEM I-Versuchsreihen****A. 5.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 38: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T2-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T2-DM- 5% CEM I- 1d 25- 5d 400	Wert	107,29	51,76	1,38	0,67	84,98	45,94	1,53	0,82
	V [%]	-	-	1,19	1,19	-	0,53	1,37	1,37
T2-DM- 10% CEM I- 1d 25- 5d 400	Wert	99,58	49,89	1,40	0,70	86,50	46,38	1,50	0,80
	V [%]	-	-	1,24	1,24	-	0,27	2,12	2,29
T2-DM- 20% CEM I- 1d 25- 5d 400	Wert	83,29	45,44	1,44	0,79	46,32	42,93	1,53	0,88
	V [%]	-	-	0,55	0,55	-	0,55	0,69	0,92
T2-DM 20% CEM I- 7d 25- 170d 400	Wert	88,08	46,83	1,48	0,78	78,22	43,89	1,56	0,88
	V [%]	-	-	1,00	1,00	-	0,85	1,27	1,73
T2-DM- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	81,24	44,82	1,48	0,81	78,55	43,99	1,57	0,88
	V [%]	-	-	1,12	1,12	-	0,13	1,81	1,82

**A. 5.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 39: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – T2-WM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T2-WM- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	125,47	55,65	1,37	0,61	107,48	51,80	1,48	0,71
	V [%]	-	-	1,26	1,26	-	0,33	0,66	0,35
T2-WM- 20% CEM I- 3d 0- 7d 25- 6d 400	Wert	127,34	56,01	1,36	0,60	110,32	52,45	1,46	0,70
	V [%]	-	-	1,99	1,99	-	0,39	2,03	1,83
T2-WM 0,5- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 12d 400	Wert	105,96	51,54	1,40	0,68	93,77	48,39	1,50	0,77
	V [%]	-	-	2,07	2,07	-	0,45	2,32	2,73

### A. 5.9 T3-CEM I-Versuchsreihen

#### A. 5.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 40: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ ,  $u$ ,  $\rho_d$  – T3-DM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T3-DM-5% CEM I- 1d 25- 4d 400	Wert	85,47	46,08	1,43	0,77	64,92	39,36	1,59	0,97
	V [%]	-	-	1,27	1,27	-	0,54	2,00	1,69
T3-DM-10% CEM I- 1d 25- 4d 400	Wert	78,10	43,85	1,47	0,83	65,96	39,74	1,58	0,95
	V [%]	-	-	1,83	1,83	-	0,62	2,02	2,42
T3-DM-20% CEM I- 1d 25- 4d 400	Wert	65,78	39,68	1,54	0,94	59,97	37,49	1,65	1,03
	V [%]	-	-	0,88	0,88	-	0,25	0,51	0,42
T3-DM-20% CEM I- 7d 25- 170d 400	Wert	67,34	40,24	1,61	0,96	60,79	37,80	1,71	1,06
	V [%]	-	-	1,67	1,67	-	1,21	2,47	2,49
T3-DM-20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 5d 400	Wert	65,04	39,41	1,56	0,95	61,02	37,89	1,66	1,03
	V [%]	-	-	1,49	1,49	-	0,56	2,24	2,36

#### A. 5.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 41: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ ,  $u$ ,  $\rho_d$  – T3-WM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w$ [%]	$w_A$ [M.-%]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
T3-WM-20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 5d 400	Wert	106,81	51,65	1,39	0,67	76,03	43,19	1,59	0,90
	V [%]	-	-	1,29	1,29	-	0,32	0,70	0,48
T3-WM-20% CEM I- 3d 0- 7d 25- 6d 400	Wert	106,25	51,52	1,45	0,70	81,98	45,05	1,64	0,90
	V [%]	-	-	0,71	0,71	-	0,12	1,54	1,54
T3-WM 0,5- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25-	Wert	80,23	44,52	1,51	0,84	69,96	41,16	1,63	0,96
	V [%]	-	-	0,74	0,74	-	0,38	1,15	1,36

**A. 5.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 42: Zusammenstellung  $w$ ,  $w_A$ ,  $\rho_f$ , u.  $\rho_d$  – S1-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau				Ausbau			
		$w$	$w_A$	$\rho_f$	$\rho_d$	$w$	$w_A$	$\rho_f$	$\rho_d$
		[%]	[M.-%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[M.-%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
S1-DM- 5% CEM I- 1d 25- 19d 400	Wert	19,46	16,29	2,04	1,71	17,96	15,23	2,10	1,78
	V [%]	-	-	0,83	0,83	-	0,92	0,58	0,44
S1-DM- 20% CEM I- 1d 25- 19d 400	Wert	16,51	14,17	1,92	1,64	18,55	15,65	2,06	1,74
	V [%]	-	-	1,95	1,95	-	2,75	1,03	1,52



## **A. 6 Zusammenstellung $\rho_s$ , $e$ und $n$ der Oedometerversuchsreihen**

Die in diesem Abschnitt angefügten Tabellen enthalten die Korndichten  $\rho_s$  [g/cm<sup>3</sup>] der Versuchsreihen, die sich bei den behandelten Versuchsreihen aus der jeweils bestimmten mittleren Korndichten des Versuchsbodens (s. Tab. 6.5) und des Zuschlags bzw. Bindemittels (s. Tab. 9.1) in Abhängigkeit von der Zugabemenge (s. Abschn. A. 3 Tab. A. 5 bis Tab. A. 7.) dieser ergeben und für die Berechnung der Porenzahlen  $e$  bzw. -räume  $n$  verwendet wurden.

Bei den unbehandelten Versuchsböden wurden die in Tab. 6.5 (Bestimmung nach Trocknung bei 105 °C) ausgewiesenen Korndichten  $\rho_s$  verwendet. Bei den durch Trocknung behandelten Versuchsreihen wurden die nach Trocknung bei 60 bzw. 105 °C bestimmten Korndichten  $\rho_s$  nach Tab. 6.5 verwendet.

Weiter sind in den Tabellen die Einbau- und Ausbauporenzahlen  $e$  bzw. Einbau- und Ausbauporenräume  $n$  [-], die sich aus der Korndichte  $\rho_s$  und der Trockendichte  $\rho_d$  [g/cm<sup>3</sup>] ergeben, aufgeführt. Die Einbau- und Ausbauporenzahlen  $e$  bzw. -porenräume  $n$  [-] basieren hier bei Einbau und Ausbau auf dem bei dem Einbau bestimmten Wassergehalt  $w$  [M.-%]. Die Ausbauporenzahlen  $e_{\text{calc}}$  bzw. -porenräume  $n_{\text{calc}}$  [-] hingegen basieren auf dem bestimmten Wassergehalt  $w$  [M.-%] der ausgebauten Probekörper der Versuchsreihen.

Die sich ergebenden rel. Differenzen (rel. D.) [%] der Ausbauporenzahlen  $e$  bzw. -porenräume  $n$  [-] bezogen auf die Ausbauporenzahlen  $e_{\text{calc}}$  bzw. -porenräume  $n_{\text{calc}}$  [-] sind zusätzlich unter diesen angeführt.

## A. 6.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

Tab. A. 43: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – unbehandelte Versuchsreihen.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1- 1d 12,5- 5d 400	Wert	2,057	4,47	0,82	1,95	0,66	1,86	0,65
	rel. D. [%]	-	-	-	4,86	1,65	-	-
T1- 3d 25- 4d 400	Wert	2,057	4,74	0,83	2,03	0,67	2,03	0,67
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,02	-0,01	-	-
T2- 1d 25- 19d 400	Wert	2,139	2,65	0,73	1,07	0,52	1,08	0,52
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,78	-0,38	-	-
T3- 1d 25- 32d 400	Wert	2,324	2,24	0,69	0,99	0,50	1,00	0,50
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,66	-0,33	-	-
S1- 1d 25- 19 d 400	Wert	2,682	0,63	0,39	0,51	0,34	0,50	0,33
	rel. D. [%]	-	-	-	0,48	0,72	-	-

## A. 6.2 T1-60 und 105°C-Versuchsreihen

Tab. A. 44: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-60 u. 105°C.

Versuchsreihen [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1- 60°C- 1d 12,5- 20d 400	Wert	2,038	2,93	0,75	1,80	0,64	1,74	0,63
	rel. D. [%]	-	-	-	3,40	1,21	-	-
T1- 105°C- 1d 12,5- 20d 400	Wert	2,057	2,47	0,71	1,42	0,59	1,26	0,56
	rel. D. [%]	-	-	-	12,97	5,36	-	-

### A. 6.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Tab. A. 45: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-LP.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400	Wert	2,082	3,39	0,77	1,72	0,63	1,72	0,63
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,02	-0,01	-	-
T1-DM-20% LP-1d 12,5-5d 400	Wert	2,102	3,28	0,77	2,02	0,67	2,02	0,67
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,03	-0,01	-	-

### A. 6.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Tab. A. 46: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-B300.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	2,099	4,26	0,81	2,32	0,70	2,28	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	1,84	0,55	-	-
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	2,137	3,65	0,79	2,25	0,69	2,19	0,69
	rel. D. [%]	-	-	-	2,98	0,91	-	-
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400	Wert	2,203	2,76	0,73	2,30	0,70	2,24	0,69
	rel. D. [%]	-	-	-	2,46	0,75	-	-
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400	Wert	2,099	4,27	0,81	2,38	0,70	2,35	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	1,34	0,40	-	-
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400	Wert	2,137	3,65	0,79	2,18	0,69	2,14	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	1,85	0,58	-	-
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400	Wert	2,203	2,72	0,73	2,06	0,67	2,08	0,67
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,58	-0,19	-	-

**A. 6.5 T1-DM-B500-Versuchsreihen****Tab. A. 47: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-B500.**

Versuchsreihen [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	2,099	4,09	0,80	2,22	0,69	2,10	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	5,42	1,69	-	-
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	2,136	3,51	0,78	2,11	0,68	2,14	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	-1,49	-0,48	-	-
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400	Wert	2,203	2,63	0,72	2,07	0,67	2,12	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	-2,43	-0,79	-	-
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400	Wert	2,099	4,15	0,81	2,16	0,68	2,15	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	0,19	0,06	-	-
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400	Wert	2,136	3,44	0,77	2,01	0,67	2,09	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	-3,94	-1,31	-	-
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400	Wert	2,203	2,66	0,73	2,03	0,67	2,10	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	-3,31	-1,09	-	-

**A. 6.6 T1-DM-BK-Versuchsreihen****Tab. A. 48: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-BK.**

Versuchsreihen [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	2,109	3,95	0,80	2,10	0,68	2,09	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	0,60	0,19	-	-
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	2,156	3,34	0,77	1,92	0,66	1,93	0,66
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,75	-0,26	-	-
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400	Wert	2,239	2,58	0,72	1,72	0,63	1,75	0,64
	rel. D. [%]	-	-	-	-1,85	-0,68	-	-
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400	Wert	2,109	3,97	0,80	2,03	0,67	2,06	0,67
	rel. D. [%]	-	-	-	-1,56	-0,52	-	-
T1-DM-10% BK-3d 25-4d 400	Wert	2,156	3,33	0,77	1,89	0,65	1,91	0,66
	rel. D. [%]	-	-	-	-1,06	-0,37	-	-
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400	Wert	2,239	2,58	0,72	1,83	0,65	1,71	0,63
	rel. D. [%]	-	-	-	6,84	2,42	-	-

**A. 6.7 T1-CEM I-Versuchsreihen****A. 6.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 49: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400	Wert	2,107	3,95	0,80	2,41	0,71	2,43	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,72	-0,21	-	-
T1-DM-10% CEM I-1d 12,5-28d 400	Wert	2,153	3,51	0,78	2,53	0,72	2,52	0,72
	rel. D. [%]	-	-	-	0,48	0,14	-	-
T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400	Wert	2,234	2,88	0,74	2,44	0,71	2,40	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	1,64	0,48	-	-
T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400	Wert	2,107	4,09	0,80	2,52	0,72	2,53	0,72
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,03	-0,01	-	-
T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400	Wert	2,153	3,55	0,78	2,60	0,72	2,57	0,72
	rel. D. [%]	-	-	-	1,03	0,29	-	-
T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400	Wert	2,234	2,81	0,74	2,42	0,71	2,42	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,01	0,00	-	-

Tab. A. 50: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-DM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-DM- 5% CEM I- 5d 25- 9d 400	Wert	2,107	4,00	0,80	2,51	0,72	2,41	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	4,20	1,20	-	-
T1-DM- 10% CEM I- 5d 25- 9d 400	Wert	2,153	3,38	0,77	2,56	0,72	2,64	0,73
	rel. D. [%]	-	-	-	-3,20	-0,90	-	-
T1-DM- 20% CEM I- 5d 25- 9d 400	Wert	2,234	2,80	0,74	2,48	0,71	2,35	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	5,27	1,52	-	-
T1-DM 20% CEM I- 7d 25- 170d 400	Wert	2,234	2,84	0,74	2,52	0,72	2,42	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	4,12	1,17	-	-
T1-DM- 5% CEM I- 14d 25- 54d 400	Wert	2,107	4,05	0,80	2,56	0,72	2,32	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	10,28	2,88	-	-
T1-DM- 20% CEM I- 14d 25- 54d 400	Wert	2,234	2,80	0,74	2,49	0,71	2,32	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	7,23	2,07	-	-
T1-DM- 20% CEM I- 10d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	2,234	2,78	0,74	2,53	0,72	2,41	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	5,02	1,42	-	-

**A. 6.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 51: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-WM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-WM- 5% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	2,104	4,04	0,80	2,58	0,72	2,48	0,71
	rel. D. [%]	-	-	-	3,97	1,11	-	-
T1-WM- 10% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	2,142	3,86	0,79	2,70	0,73	2,62	0,72
	rel. D. [%]	-	-	-	3,10	0,84	-	-
T1-WM- 20% CEM I- 2d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	2,198	3,66	0,79	2,89	0,74	2,79	0,74
	rel. D. [%]	-	-	-	3,61	0,93	-	-
T1-WM- 5% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	2,104	3,70	0,79	2,26	0,69	2,11	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	6,96	2,14	-	-
T1-WM- 10% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	2,142	3,46	0,78	2,50	0,71	2,30	0,70
	rel. D. [%]	-	-	-	8,70	2,49	-	-
T1-WM- 20% CEM I- 2d 0- 5d 25- 22d 400	Wert	2,198	3,50	0,78	3,05	0,75	2,74	0,73
	rel. D. [%]	-	-	-	11,31	2,79	-	-



**Tab. A. 52: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T1-WM-CEM I-2 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T1-WM- 20% CEM I- 10d 0- 1d 25- 4d 400	Wert	2,198	3,66	0,79	2,95	0,75	2,88	0,74
	rel. D. [%]	-	-	-	2,28	0,58	-	-
T1-WM- 20% CEM I- 3d 0- 7d 25- 6d 400	Wert	2,198	3,73	0,79	2,99	0,75	2,94	0,75
	rel. D. [%]	-	-	-	1,61	0,40	-	-
T1-WM 0,5- 20 % CEM I- 3d 0- 1d 25- 12d 400	Wert	2,220	3,28	0,77	2,78	0,74	2,62	0,72
	rel. D. [%]	-	-	-	5,90	0,72	-	-

**A. 6.8 T2-CEM I-Versuchsreihen****A. 6.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 53: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T2-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T2-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400	Wert	2,186	2,28	0,69	1,63	0,62	1,65	0,62
	rel. D. [%]	-	-	-	-1,03	-0,39	-	-
T2-DM-10% CEM I-1d 25-5d 400	Wert	2,228	2,18	0,69	1,78	0,64	1,77	0,64
	rel. D. [%]	-	-	-	0,68	0,24	-	-
T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400	Wert	2,302	1,67	0,66	1,67	0,63	1,63	0,62
	rel. D. [%]	-	-	-	2,72	1,02	-	-
T2-DM 20% CEM I-7d 25-170d 400	Wert	2,302	1,93	0,66	1,71	0,63	1,63	0,62
	rel. D. [%]	-	-	-	4,74	1,75	-	-
T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	Wert	2,302	1,83	0,65	1,65	0,62	1,62	0,62
	rel. D. [%]	-	-	-	2,22	0,83	-	-

**A. 6.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 54: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T2-WM-CEM I.**

Versuchsreihen [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	Wert	2,269	2,74	0,73	2,22	0,69	2,19	0,69
	rel. D. [%]	-	-	-	1,51	0,47	-	-
T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	Wert	2,269	2,78	0,74	2,26	0,69	2,26	0,69
	rel. D. [%]	-	-	-	-0,41	-0,12	-	-
T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	Wert	2,289	2,37	0,70	2,11	0,68	2,11	0,68
	rel. D. [%]	-	-	-	0,38	0,12	-	-

## A. 6.9 T3-CEM I-Versuchsreihen

### A. 6.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 55: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T3-DM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T2-DM- 5% CEM I-1d 25- 4d 400	Wert	2,362	2,06	0,67	1,47	0,59	1,45	0,59
	rel. D. [%]	-	-	-	1,25	0,51	-	-
T2-DM- 10% CEM I-1d 25- 4d 400	Wert	2,396	1,90	0,66	1,54	0,61	1,52	0,60
	rel. D. [%]	-	-	-	1,51	0,59	-	-
T2-DM- 20% CEM I-1d 25- 4d 400	Wert	2,457	1,62	0,62	1,41	0,59	1,38	0,58
	rel. D. [%]	-	-	-	2,23	0,93	-	-
T3-DM- 20% CEM I- 7d 25- 170d 400	Wert	2,457	1,56	0,61	1,36	0,58	1,31	0,57
	rel. D. [%]	-	-	-	3,65	1,55	-	-
T3-DM- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 5d 400	Wert	2,457	1,60	0,62	1,40	0,58	1,38	0,58
	rel. D. [%]	-	-	-	1,92	0,80	-	-

**A. 6.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 56: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – T3-WM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
T3-WM- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 5d 400	Wert	2,430	2,62	0,72	1,70	0,63	1,69	0,63
	rel. D. [%]	-	-	-	0,78	0,29	-	-
T3-WM- 20% CEM I- 3d 0- 7d 25- 6d 400	Wert	2,430	2,47	0,71	1,74	0,63	1,70	0,63
	rel. D. [%]	-	-	-	2,08	0,76	-	-
T3-WM 0,5- 20% CEM I- 3d 0- 1d 25- 12d 400	Wert	2,430	1,91	0,66	1,59	0,61	1,55	0,61
	rel. D. [%]	-	-	-	2,46	0,95	-	-

**A. 6.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 57: Zusammenstellung  $\rho_s$ ,  $e$  u.  $n$  – S1-DM-CEM I**

Versuchsreihe [Bez.]		Einbau			Ausbau			
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e$ [-]	$n$ [-]	$e_{calc}$ [-]	$n_{calc}$ [-]
S1-DM- 5% CEM I- 1d 25- 19d 400	Wert	2,703	0,58	0,37	0,55	0,35	0,52	0,34
	rel. D.	-	-	-	5,10	3,33	-	-
S1-DM- 20% CEM I- 1d 25- 19d 400	Wert	2,755	0,68	0,40	0,65	0,39	0,59	0,37
	rel. D.	-	-	-	10,86	6,58	-	-

### **A. 7 Zusammenstellung $e$ , $n$ , $s'$ und $E_{Oed}$ der Oedometerversuchsreihen**

Die in den Tabellen dieses Abschnitts aufgeführten bez. ink. / ges. Setzungen  $s'_{ink(\sigma)/ges(\sigma)}$  [-] und Porenzahlen / räumen  $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$  [-] stellen die zum Ende der Anfangslaststufe (1 bis 14 d Konsolidation) gemessenen / berechneten Werte dar.

Die aufgeführten Werte der Zwischenlaststufen und der Endlaststufe sind die nach 1 d Konsolidation gemessenen / berechneten Werte.

Bei den Porenzahlen / räumen  $e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$  [-] in Spalte „ $\sigma = 0 \text{ kN/m}^2$ “ sind die Werte vor Beginn der Belastung ( $t=0 \text{ d}$  bzw.  $\sigma = 0 \text{ kN/m}^2$ ) eingetragen.

## A. 7.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

Tab. A. 58: Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{Oed}$  – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 u. S1.

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																	
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$		$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$					
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T1- 1d 12,5- 5d 400	4,47 / 0,82	4,08 / 0,80		3,87 / 0,79			3,55 / 0,78		3,10 / 0,76		2,56 / 0,72		2,04 / 0,67					
		0,071		0,109 / 0,038			0,167 / 0,059		0,250 / 0,083		0,349 / 0,099		0,444 / 0,096					
		0,18		0,33			0,43		0,60 / 0,53		1,01 / 0,73		2,09 / 1,12 / 0,90					
T1- 3d 25,0- 4d 400	4,74 / 0,83	- / -		4,03 / 0,80			3,76 / 0,79		3,29 / 0,77		2,70 / 0,73		2,12 / 0,68					
		-		0,115 / -			0,170 / 0,047		0,252 / 0,083		0,355 / 0,103		0,455 / 0,100					
		-		0,20			0,53		0,60 / 0,58		0,97 / 0,75		1,99 / 1,13 / 0,88					
T2- 1d 25- 19d 400	2,65 / 0,73	- / -		2,18 / 0,69			2,00 / 0,67		1,75 / 0,66		1,46 / 0,59		1,17 / 0,54					
		-		0,130 / -			0,178 / 0,048		0,246 / 0,068		0,326 / 0,080		0,407 / 0,081					
		-		0,19			0,52		0,73 / 0,65		1,25 / 0,89		2,46 / 1,35 / 0,98					
T3- 1d 25- 32d 400	2,24 / 0,69	- / -		1,84 / 0,65			1,70 / 0,63		1,50 / 0,60		1,29 / 0,56		1,07 / 0,52					
		-		0,123 / -			0,168 / 0,045		0,227 / 0,060		0,294 / 0,067		0,360 / 0,067					
		-		0,20			0,56		0,84 / 0,72		1,50 / 1,02		2,99 / 1,57 / 1,11					
S1- 1d 25- 19d 400	0,63 / 0,39	- / -		0,58 / 0,37			0,56 / 0,36		0,55 / 0,35		0,53 / 0,35		0,51 / 0,34					
		-		0,032 / -			0,041 / 0,009		0,051 / 0,010		0,062 / 0,011		0,075 / 0,013					
		-		0,78			2,94		4,92 / 4,02		8,96 / 5,87		15,79 / 8,82 / 5,36					

**A. 7.2 T1-60 und 105 °C-Versuchsreihen**

**Tab. A. 59: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-60 u. 105°C-1d 12,5-400d 400.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																		
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$		$\sigma=100$			$\sigma=200$		$\sigma=400$					
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$	$E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$
T1-60°C- 1d 12,5- 20d 400	2,93 / 0,75	2,68 / 0,73		2,60 / 0,72			2,49 / 0,71		2,34 / 0,70			2,16 / 0,68		1,92 / 0,66					
		0,065		0,086 / 0,021			0,113 / 0,028		0,151 / 0,038			0,197 / 0,046		0,257 / 0,059					
		0,19		0,61			0,90		1,32 / 1,14			2,17 / 1,57		3,37 / 2,19 / 1,56					
T1-105°C- 1d 12,5-20d 400	2,47 / 0,71	2,25 / 0,69		2,16 / 0,68			2,05 / 0,67		1,91 / 0,66			1,75 / 0,64		1,54 / 0,61					
		0,064		0,090 / 0,026			0,123 / 0,033		0,163 / 0,040			0,210 / 0,047		0,267 / 0,058					
		0,20		0,47			0,76		1,24 / 1,03			2,14 / 1,46		3,47 / 2,11 / 1,50					

### A. 7.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Tab. A. 60: Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{Oed}$  – T1-DM-10 u. 20% LP-1d 12,5-5d 400.

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																	
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$		$\sigma=100$			$\sigma=200$		$\sigma=400$				
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400	3,39 / 0,77	3,12 / 0,76		2,99 / 0,75			2,78 / 0,74		2,38 / 0,70			2,03 / 0,67		1,78 / 0,64				
		0,063		0,093 / 0,030			0,139 / 0,046		0,230 / 0,091			0,312 / 0,082		0,368 / 0,056				
		0,20		0,42			0,54		0,55 / 0,55			1,22 / 0,80		3,55 / 1,36 / 1,09				
T1-DM-20% LP-1d 12,5-5d 400	3,28 / 0,77	3,09 / 0,76		3,00 / 0,75			2,86 / 0,74		2,66 / 0,73			2,39 / 0,71		2,06 / 0,67				
		0,043		0,064 / 0,021			0,097 / 0,033		0,144 / 0,047			0,208 / 0,064		0,283 / 0,076				
		0,29		0,59			0,76		1,06 / 0,94			1,57 / 1,22		2,64 / 1,71 / 1,41				



**A. 7.4 T1-DM B300-Versuchsreihen**

**Tab. A. 61: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> –T1-DM-B300.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																	
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$		$\sigma=400$			
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400	4,26 / 0,81	3,93 / 0,80		3,83 / 0,79			3,66 / 0,79			3,35 / 0,77			2,92 / 0,75		2,42 / 0,71			
		0,062		0,081 / 0,019			0,113 / 0,032			0,172 / 0,059			0,254 / 0,082		0,349 / 0,095			
		0,20		0,66			0,78			0,85 / 0,82			1,23 / 1,01		2,11 / 1,40 / 1,15			
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400	3,65 / 0,79	3,43 / 0,77		3,38 / 0,77			3,27 / 0,77			3,06 / 0,75			2,73 / 0,73		2,31 / 0,70			
		0,047		0,059 / 0,012			0,083 / 0,024			0,128 / 0,045			0,197 / 0,069		0,288 / 0,090			
		0,26		1,09			1,05			1,10 / 1,08			1,44 / 1,26		2,22 / 1,64 / 1,39			
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400	2,76 / 0,73	2,72 / 0,73		2,70 / 0,73			2,67 / 0,73			2,62 / 0,72			2,53 / 0,72		2,32 / 0,70			
		0,012		0,017 / 0,006			0,025 / 0,008			0,039 / 0,014			0,063 / 0,024		0,117 / 0,054			
		1,09		2,21			3,06			3,66 / 3,44			4,20 / 3,83		3,68 / 3,75 / 3,41			
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400	4,27 / 0,81	-		3,66 / 0,79			3,58 / 0,78			3,38 / 0,77			2,98 / 0,75		2,47 / 0,71			
		-		0,116 / -			0,131 / 0,015			0,169 / 0,038			0,244 / 0,075		0,340 / 0,096			
		-		0,22			1,63			1,31 / 1,40			1,33 / 1,36		2,09 / 1,67 / 1,18			
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400	3,65 / 0,79	-		3,18 / 0,76			3,12 / 0,76			2,97 / 0,75			2,66 / 0,73		2,24 / 0,69			
		-		0,102 / -			0,114 / 0,012			0,147 / 0,033			0,214 / 0,067		0,304 / 0,090			
		-		0,24			2,05			1,52 / 1,67			1,50 / 1,57		2,22 / 1,86 / 1,32			
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400	2,72 / 0,73	-		2,46 / 0,71			2,44 / 0,71			2,40 / 0,71			2,31 / 0,70		2,09 / 0,68			
		-		0,070 / -			0,075 / 0,005			0,085 / 0,010			0,110 / 0,025		0,169 / 0,060			
		-		0,36			4,84			4,84 / 4,84			4,03 / 4,34		3,36 / 3,76 / 2,36			

## A. 7.5 T1-DM B500-Versuchsreihen

Tab. A. 62: Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{Oed}$  – T1-DM-B500.

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																	
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$		$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$					
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400	4,09 / 0,80	3,77 / 0,79		3,66 / 0,79			3,48 / 0,78		3,19 / 0,76		2,78 / 0,74		2,31 / 0,70					
		0,062		0,084 / 0,022			0,118 / 0,035		0,175 / 0,057		0,257 / 0,082		0,349 / 0,092					
		0,20		0,57			0,72		0,88 / 0,82		1,22 / 1,01		2,18 / 1,41 / 1,15					
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400	3,51 / 0,78	3,28 / 0,77		3,22 / 0,76			3,12 / 0,76		2,80 / 0,74		2,45 / 0,71		2,18 / 0,69					
		0,051		0,064 / 0,013			0,088 / 0,024		0,157 / 0,069		0,236 / 0,080		0,296 / 0,060					
		0,24		0,99			1,06		0,72 / 0,81		1,26 / 1,02		3,36 / 1,62 / 1,35					
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400	2,63 / 0,72	2,62 / 0,72		2,59 / 0,72			2,55 / 0,72		2,48 / 0,71		2,34 / 0,70		2,10 / 0,68					
		0,005		0,011 / 0,006			0,022 / 0,011		0,042 / 0,020		0,081 / 0,039		0,147 / 0,066					
		2,78		1,97			2,24		2,48 / 2,39		2,59 / 2,50		3,02 / 2,75 / 2,72					
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400	4,15 / 0,81	-		3,51 / 0,78			3,41 / 0,77		3,16 / 0,76		2,76 / 0,73		2,26 / 0,69					
		-		0,124 / -			0,145 / 0,021		0,192 / 0,048		0,271 / 0,079		0,367 / 0,096					
		-		0,20			1,21		1,05 / 1,09		1,27 / 1,19		2,08 / 1,54 / 1,09					
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400	3,44 / 0,77	-		2,99 / 0,75			2,93 / 0,75		2,79 / 0,74		2,49 / 0,71		2,08 / 0,68					
		-		0,102 / -			0,113 / 0,015		0,146 / 0,033		0,213 / 0,067		0,306 / 0,093					
		-		0,25			2,17		1,53 / 1,70		1,49 / 1,57		2,16 / 1,84 / 1,31					
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400	2,66 / 0,73	-		2,44 / 0,71			2,42 / 0,71		2,38 / 0,70		2,29 / 0,70		2,06 / 0,67					
		-		0,059 / -			0,064 / 0,005		0,075 / 0,012		0,101 / 0,026		0,162 / 0,061					
		-		0,42			5,00		4,35 / 4,55		3,87 / 4,13		3,27 / 3,62 / 2,46					

**A. 7.6 T1-DM BK-Versuchsreihen**

**Tab. A. 63: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-DM-BK.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$		$\sigma=400$		
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$ E <sub>Oed(6,25)</sub>	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	E <sub>Oed(12,5)</sub> bzw. E <sub>Oed(18,75)</sub>	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	E <sub>Oed(37,5)</sub>	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	E <sub>Oed(75,0)</sub> / E <sub>Oed(62,5)</sub>	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	E <sub>Oed(150)</sub> / E <sub>Oed(112,5)</sub>	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400	3,95 / 0,80	3,67 / 0,79		3,55 / 0,78			3,35 / 0,77			3,04 / 0,75			2,66 / 0,73		2,21 / 0,69		
		0,057		0,079 / 0,023			0,120 / 0,040			0,184 / 0,064			0,260 / 0,076		0,352 / 0,092		
		0,22		0,55			0,62			0,78 / 0,72			1,31 / 0,97		2,18 / 1,38 / 1,14		
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400	3,34 / 0,77	3,14 / 0,76		3,09 / 0,76			2,96 / 0,75			2,72 / 0,73			2,40 / 0,61		2,00 / 0,67		
		0,044		0,058 / 0,013			0,087 / 0,029			0,143 / 0,056			0,216 / 0,073		0,308 / 0,092		
		0,28		0,94			0,86			0,89 / 0,88			1,38 / 1,11		2,19 / 1,50 / 1,30		
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400	2,58 / 0,72	2,56 / 0,72		2,53 / 0,72			2,43 / 0,71			2,29 / 0,70			2,08 / 0,68		1,78 / 0,64		
		0,008		0,015 / 0,007			0,042 / 0,027			0,082 / 0,041			0,141 / 0,058		0,225 / 0,084		
		1,63		1,83			0,91			1,23 / 1,11			1,71 / 1,39		2,39 / 1,79 / 1,78		
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400	3,97 / 0,80	- / -		3,34 / 0,77			3,26 / 0,77			3,04 / 0,75			2,65 / 0,73		2,14 / 0,6		
		-		0,128 / -			0,144 / 0,016			0,187 / 0,044			0,267 / 0,080		0,369 / 0,102		
		-		0,20			1,58			1,14 / 1,26			1,26 / 1,26		1,96 / 1,55 / 1,08		
T1-DM-10% BK-3d 25-4d 400	3,33 / 0,77	- / -		2,87 / 0,74			2,83 / 0,74			2,68 / 0,73			2,38 / 0,70		1,97 / 0,66		
		-		0,107 / -			0,115 / 0,008			0,150 / 0,035			0,220 / 0,070		0,315 / 0,095		
		-		0,23			3,00			1,44 / 1,74			1,44 / 1,55		2,10 / 1,80 / 1,27		
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400	2,58 / 0,72	- / -		2,47 / 0,71			2,44 / 0,71			2,36 / 0,70			2,18 / 0,69		1,88 / 0,65		
		-		0,031 / -			0,040 / 0,009			0,064 / 0,024			0,114 / 0,050		0,195 / 0,081		
		-		0,81			2,78			2,11 / 2,30			2,00 / 2,12		2,46 / 2,29 / 2,05		

**A. 7.7 T1-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 7.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 64: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-DM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																				
	$\sigma=0$			$\sigma=12,5$			$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$			$\sigma=400$		
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5)}$	$s'_{ges(12,5)} / E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)} / E_{Oed(12,5)}$	$E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)} / E_{Oed(37,5)}$	$E_{Oed(75,0)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)} / E_{Oed(62,5)}$	$E_{Oed(150)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)} / E_{Oed(112,5)}$	$E_{Oed(225)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)} / E_{Oed(300)}$	$E_{Oed(600)}$			
T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400	3,95 / 0,80	3,70 / 0,79			3,66 / 0,79			3,59 / 0,78			3,42 / 0,77			3,06 / 0,75			2,56 / 0,72				
		0,052			0,058 / 0,006			0,074 / 0,015			0,108 / 0,034			0,181 / 0,073			0,282 / 0,101				
		0,24			1,92			1,65			1,46 / 1,52			1,36 / 1,42			1,98 / 1,68 / 1,42				
T1-DM-10% CEM I-1d 12,5-28d 400	3,51 / 0,78	3,32 / 0,77			3,31 / 0,77			3,27 / 0,77			3,20 / 0,76			3,01 / 0,75			2,61 / 0,72				
		0,040			0,044 / 0,004			0,052 / 0,007			0,067 / 0,016			0,110 / 0,043			0,198 / 0,087				
		0,31			3,00			3,41			3,23 / 3,28			2,31 / 2,64			2,29 / 2,44 / 2,02				
T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400	2,88 / 0,74	2,75 / 0,73			2,74 / 0,73			2,73 / 0,73			2,71 / 0,73			2,59 / 0,72			2,47 / 0,71				
		0,034			0,036 / 0,001			0,038 / 0,002			0,042 / 0,005			0,074 / 0,032			0,106 / 0,032				
		0,37			9,38			10,71			11,11 / 10,98			3,16 / 4,55			6,28 / 5,33 / 3,78				
T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400	4,09 / 0,80	-			3,59 / 0,78			3,55 / 0,78			3,43 / 0,77			3,11 / 0,76			2,60 / 0,72				
		-			0,099 / -			0,106 / 0,008			0,131 / 0,024			0,193 / 0,062			0,293 / 0,100				
		-			0,25			3,19			2,07 / 2,34			1,61 / 1,86			2,00 / 1,93 / 1,37				
T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400	3,55 / 0,78	-			3,17 / 0,76			3,16 / 0,76			3,12 / 0,76			2,99 / 0,75			2,64 / 0,73				
		-			0,084 / -			0,087 / 0,003			0,095 / 0,008			0,123 / 0,028			0,200 / 0,077				
		-			0,30			9,37			5,88 / 6,72			3,61 / 4,51			2,61 / 3,25 / 2,01				
T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400	2,81 / 0,74	-			2,52 / 0,72			2,52 / 0,72			2,51 / 0,71			2,49 / 0,71			2,43 / 0,71				
		-			0,074 / -			0,075 / 0,001			0,078 / 0,003			0,083 / 0,005			0,099 / 0,016				
		-			0,34			25,00			18,75 / 20,45			20,00 / 20,19			12,63 / 15,31 / 4,05				

Tab. A. 65: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-DM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																				
	$\sigma=0$		$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$			$\sigma=400$				
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$		$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$	$E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$	
T1-DM-5% CEM I-5d 25-9d 400	4,00 / 0,80	-			3,52 / 0,78			3,49 / 0,78			3,40 / 0,77			3,13 / 0,76			2,62 / 0,72				
		-			0,096 / -			0,101 / 0,005			0,120 / 0,018			0,175 / 0,055			0,276 / 0,102				
		-			0,26			5,00			2,73 / 3,21			1,82 / 2,23			1,97 / 2,08 / 1,45				
T1-DM-10% CEM I-5d 25-9d 400	3,38 / 0,77	-			3,02 / 0,75			3,02 / 0,75			2,99 / 0,75			2,91 / 0,74			2,62 / 0,72				
		-			0,081 / -			0,083 / 0,002			0,088 / 0,005			0,107 / 0,019			0,173 / 0,066				
		-			0,31			13,64			9,09 / 10,23			5,41 / 6,77			3,03 / 4,08 / 2,31				
T1-DM-20% CEM I-5d 25-9d 400	2,80 / 0,74	-			2,56 / 0,72			2,56 / 0,72			2,55 / 0,72			2,53 / 0,72			2,49 / 0,71				
		-			0,065 / -			0,065 / 0,001			0,067 / 0,002			0,072 / 0,004			0,083 / 0,012				
		-			0,39			50,00			23,08 / 28,12			22,22 / 24,42			17,14 / 19,91 / 4,80				
T1-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	2,84 / 0,74	-			2,62 / 0,72			2,62 / 0,72			2,61 / 0,72			2,59 / 0,72			2,55 / 0,72				
		-			0,058 / -			0,059 / 0,001			0,061 / 0,002			0,065 / 0,004			0,076 / 0,012				
		-			0,43			37,50			23,08 / 26,47			24,00 / 25,00			17,91 / 20,64 / 5,26				
T1-DM-5% CEM I-14d 25-54d 400	4,05 / 0,80	-			3,53 / 0,78			3,52 / 0,78			3,46 / 0,78			3,22 / 0,76			2,72 / 0,73				
		-			0,104 / -			0,106 / 0,003			0,118 / 0,012			0,165 / 0,047			0,264 / 0,098				
		-			0,24			8,82			4,29 / 5,17			2,11 / 2,83			2,04 / 2,34 / 1,36				
T1-DM-20% CEM I-14d 25-54d 400	2,80 / 0,74	-			2,56 / 0,72			2,55 / 0,72			2,55 / 0,72			2,54 / 0,72			2,50 / 0,71				
		-			0,065 / -			0,065 / 0,000			0,066 / 0,001			0,070 / 0,004			0,079 / 0,009				
		-			0,38			150,00			50,00 / 64,29			27,27 / 36,21			22,22 / 27,11 / 4,81				
T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	2,78 / 0,74	-			2,72 / 0,73			2,70 / 0,73			2,68 / 0,73			2,63 / 0,72			2,54 / 0,72				
		-			0,017 / -			0,021 / 0,005			0,028 / 0,007			0,039 / 0,011			0,064 / 0,025				
		-			1,52			5,56			7,69 / 6,82			8,96 / 7,89			7,89 / 7,89 / 6,25				

**A. 7.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 66: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-WM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)} [-] /$ bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)} [-] /$ Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)} [MN/m^2]$ $\sigma$ in $[kN/m^2]$																				
	$\sigma=0$			$\sigma=12,5$			$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$			$\sigma=400$		
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$ $E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$ $E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$ $E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$ $E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$ $E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$ $E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$								
T1-WM-5% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	4,04 / 0,80	-	3,87 / 0,79	3,79 / 0,79	3,60 / 0,78	3,20 / 0,76	2,64 / 0,73	-	0,033 / -	0,049 / 0,016	0,088 / 0,039	0,166 / 0,078	0,277 / 0,112	-	0,75	1,56	1,29 / 1,37	1,29 / 1,32	1,79 / 1,54 / 1,44		
		-	3,69 / 0,79	3,64 / 0,78	3,55 / 0,78	3,28 / 0,77	2,75 / 0,73	-	0,034 / -	0,045 / 0,011	0,062 / 0,018	0,120 / 0,057	0,227 / 0,107	-	0,75	2,24	2,86 / 2,62	1,74 / 2,03	1,87 / 1,94 / 1,76		
		-	3,56 / 0,78	3,54 / 0,78	3,49 / 0,78	3,34 / 0,77	2,92 / 0,74	-	0,020 / -	0,025 / 0,005	0,036 / 0,011	0,068 / 0,032	0,159 / 0,091	-	1,26	4,69	4,48 / 4,55	3,14 / 3,62	2,21 / 2,70 / 2,52		
T1-WM-10% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	3,86 / 0,79	-	3,46 / 0,78	3,42 / 0,77	3,28 / 0,77	2,90 / 0,74	2,37 / 0,70	-	0,052 / -	0,059 / 0,007	0,090 / 0,031	0,171 / 0,081	0,282 / 0,112	-	0,49	3,49	1,60 / 1,95	1,24 / 1,47	1,79 / 1,62 / 1,42		
		-	3,29 / 0,77	3,27 / 0,77	3,21 / 0,76	3,00 / 0,75	2,58 / 0,72	-	0,038 / -	0,042 / 0,004	0,056 / 0,014	0,102 / 0,046	0,197 / 0,096	-	0,66	6,00	3,61 / 4,17	2,18 / 2,74	2,09 / 2,35 / 2,03		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	3,70 / 0,79	-	3,29 / 0,77	3,27 / 0,77	3,21 / 0,76	3,00 / 0,75	2,58 / 0,72	-	0,038 / -	0,042 / 0,004	0,056 / 0,014	0,102 / 0,046	0,197 / 0,096	-	0,66	6,00	3,61 / 4,17	2,18 / 2,74	2,09 / 2,35 / 2,03		
		-	3,46 / 0,78	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	3,70 / 0,79	-	3,46 / 0,78	3,42 / 0,77	3,28 / 0,77	2,90 / 0,74	2,37 / 0,70	-	0,052 / -	0,059 / 0,007	0,090 / 0,031	0,171 / 0,081	0,282 / 0,112	-	0,49	3,49	1,60 / 1,95	1,24 / 1,47	1,79 / 1,62 / 1,42		
		-	3,29 / 0,77	3,27 / 0,77	3,21 / 0,76	3,00 / 0,75	2,58 / 0,72	-	0,038 / -	0,042 / 0,004	0,056 / 0,014	0,102 / 0,046	0,197 / 0,096	-	0,66	6,00	3,61 / 4,17	2,18 / 2,74	2,09 / 2,35 / 2,03		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	3,46 / 0,78	-	3,29 / 0,77	3,27 / 0,77	3,21 / 0,76	3,00 / 0,75	2,58 / 0,72	-	0,038 / -	0,042 / 0,004	0,056 / 0,014	0,102 / 0,046	0,197 / 0,096	-	0,66	6,00	3,61 / 4,17	2,18 / 2,74	2,09 / 2,35 / 2,03		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	3,50 / 0,78	-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		
		-	3,42 / 0,77	3,42 / 0,77	3,39 / 0,77	3,32 / 0,77	3,08 / 0,75	-	0,018 / -	0,020 / 0,002	0,026 / 0,006	0,040 / 0,015	0,094 / 0,054	-	1,39	15,00	8,57 / 10,00	6,74 / 7,84	3,73 / 4,93 / 4,26		

Tab. A. 67: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T1-WM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																		
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$			$\sigma=400$			
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$	$E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$
T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	3,66 / 0,79	-	-	3,56 / 0,78	-	3,53 / 0,78	-	3,48 / 0,78	-	3,36 / 0,77	-	2,97 / 0,75	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,022 / -	-	0,029 / 0,007	-	0,040 / 0,011	-	0,065 / 0,025	-	0,149 / 0,083	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	1,15	-	3,57	-	4,41 / 4,09	-	3,97 / 4,02	-	2,40 / 2,96 / 2,69	-	-	-	-	-	-	-
T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	3,73 / 0,79	-	-	3,59 / 0,78	-	3,57 / 0,78	-	3,52 / 0,78	-	3,40 / 0,77	-	3,02 / 0,75	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,029 / -	-	0,032 / 0,003	-	0,043 / 0,011	-	0,068 / 0,025	-	0,149 / 0,081	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,85	-	9,38	-	4,55 / 5,49	-	3,97 / 4,51	-	2,48 / 3,14 / 2,69	-	-	-	-	-	-	-
T1-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	3,28 / 0,77	-	-	3,13 / 0,76	-	3,10 / 0,76	-	3,06 / 0,75	-	2,99 / 0,75	-	2,81 / 0,74	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,034 / -	-	0,041 / 0,007	-	0,052 / 0,011	-	0,067 / 0,016	-	0,108 / 0,041	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,74	-	3,57	-	4,76 / 4,29	-	6,32 / 5,25	-	4,94 / 5,08 / 3,71	-	-	-	-	-	-	-

**A. 7.8 T2-CEM I-Versuchsreihen****A. 7.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 68: Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{Oed}$  – T2-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																		
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$			$\sigma=200$			$\sigma=400$			
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$	$E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$
T2-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400	2,28 / 0,69	-	-	-	2,01 / 0,67	-	1,99 / 0,67	-	-	1,96 / 0,66	-	-	1,86 / 0,65	-	-	-	1,67 / 0,63	-	-
	-	-	-	-	0,082 / -	-	0,087 / 0,005	-	-	0,098 / 0,010	-	-	0,126 / 0,028	-	-	-	0,185 / 0,060	-	-
	-	-	-	-	0,30	-	4,84	-	-	4,84 / 4,84	-	-	3,55 / 4,01	-	-	-	3,56 / 3,63 / 2,16	-	-
T2-DM-10% CEM I-1d 25-5d 400	2,18 / 0,69	-	-	-	1,92 / 0,66	-	1,91 / 0,66	-	-	1,90 / 0,66	-	-	1,87 / 0,65	-	-	-	1,80 / 0,64	-	-
	-	-	-	-	0,081 / -	-	0,083 / 0,002	-	-	0,087 / 0,004	-	-	0,096 / 0,008	-	-	-	0,120 / 0,024	-	-
	-	-	-	-	0,31	-	10,71	-	-	12,50 / 11,84	-	-	11,76 / 11,80	-	-	-	8,22 / 9,57 / 3,33	-	-
T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400	1,92 / 0,66	-	-	-	1,74 / 0,63	-	1,73 / 0,63	-	-	1,72 / 0,63	-	-	1,71 / 0,63	-	-	-	1,68 / 0,63	-	-
	-	-	-	-	0,063 / -	-	0,066 / 0,002	-	-	0,069 / 0,003	-	-	0,073 / 0,005	-	-	-	0,083 / 0,009	-	-
	-	-	-	-	0,39	-	10,71	-	-	16,67 / 14,06	-	-	21,43 / 17,50	-	-	-	21,82 / 19,57 / 4,85	-	-
T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	1,93 / 0,66	-	-	-	1,79 / 0,64	-	1,78 / 0,64	-	-	1,78 / 0,64	-	-	1,76 / 0,64	-	-	-	1,73 / 0,63	-	-
	-	-	-	-	0,049 / -	-	0,051 / 0,001	-	-	0,053 / 0,003	-	-	0,059 / 0,005	-	-	-	0,070 / 0,012	-	-
	-	-	-	-	0,51	-	18,75	-	-	18,75 / 18,75	-	-	18,75 / 18,75	-	-	-	17,14 / 17,86 / 5,70	-	-
T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	1,83 / 0,65	-	-	-	1,78 / 0,64	-	1,76 / 0,64	-	-	1,74 / 0,64	-	-	1,71 / 0,63	-	-	-	1,66 / 0,62	-	-
	-	-	-	-	0,017 / -	-	0,022 / 0,005	-	-	0,030 / 0,007	-	-	0,040 / 0,011	-	-	-	0,059 / 0,018	-	-
	-	-	-	-	1,44	-	5,00	-	-	6,82 / 6,08	-	-	9,52 / 7,66	-	-	-	10,91 / 9,11 / 6,84	-	-



**A. 7.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 69: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T2-WM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]															
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$		
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$ $s'_{ges(12,5)}$ $E_{Oed(6,25)}$		$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$ $s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$ $E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$			$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$ $s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$ $E_{Oed(37,5)}$			$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$ $s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$ $E_{Oed(62,5)}$			$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$ $s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$ $E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$			$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$ $s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$ $E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$
T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	2,74 / 0,73	-		2,67 / 0,73			2,64 / 0,73			2,60 / 0,72			2,49 / 0,71			2,24 / 0,69
		-		0,019 / -			0,026 / 0,006			0,038 / 0,012			0,067 / 0,029			0,134 / 0,067
		-		1,29			3,95			4,23 / 4,13			3,43 / 3,70			2,99 / 3,28 / 3,00
T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	2,78 / 0,74	-		2,67 / 0,73			2,66 / 0,73			2,62 / 0,72			2,52 / 0,72			2,28 / 0,69
		-		0,029 / -			0,033 / 0,004			0,044 / 0,011			0,069 / 0,026			0,134 / 0,064
		-		0,86			6,82			4,55 / 5,11			3,92 / 4,36			3,11 / 3,59 / 3,00
T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	2,37 / 0,70	-		2,30 / 0,70			2,27 / 0,69			2,24 / 0,69			2,20 / 0,69			2,13 / 0,68
		-		0,023 / -			0,030 / 0,008			0,039 / 0,009			0,050 / 0,011			0,071 / 0,022
		-		1,10			3,33			5,88 / 4,69			9,09 / 6,48			9,30 / 7,73 / 5,62

**A. 7.9 T3-CEM I-Versuchsreihen****A. 7.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen****Tab. A. 70: Zusammenstellung  $e$ ,  $n$ ,  $s'$  und  $E_{Oed}$  – T3-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																	
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$		$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$					
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$
T3-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400	2,06 / 0,67	-	1,87 / 0,65		1,85 / 0,65		1,79 / 0,64		1,67 / 0,63		1,50 / 0,60		-		-		-	
		-	0,061 / -		0,071 / 0,009		0,089 / 0,019		0,127 / 0,038		0,185 / 0,058		-		-		-	
		-	0,41		2,68		2,70 / 2,69		2,63 / 2,66		3,47 / 3,04 / 2,17		-		-		-	
T3-DM-10% CEM I-1d 25-5d 400	1,90 / 0,66	-	1,77 / 0,64		1,75 / 0,64		1,73 / 0,63		1,67 / 0,63		1,56 / 0,61		-		-		-	
		-	0,045 / -		0,050 / 0,005		0,059 / 0,009		0,079 / 0,020		0,119 / 0,040		-		-		-	
		-	0,55		4,84		5,77 / 5,42		4,96 / 5,15		5,06 / 5,10 / 3,37		-		-		-	
T3-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400	1,62 / 0,62	-	1,51 / 0,60		1,50 / 0,60		1,48 / 0,60		1,44 / 0,59		1,42 / 0,59		-		-		-	
		-	0,042 / -		0,045 / 0,003		0,053 / 0,008		0,067 / 0,013		0,077 / 0,010		-		-		-	
		-	0,60		7,50		6,00 / 6,43		7,59 / 7,05		20,00 / 10,77 / 5,23		-		-		-	
T3-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	1,56 / 0,61	-	1,45 / 0,59		1,44 / 0,59		1,44 / 0,59		1,42 / 0,59		1,37 / 0,59		-		-		-	
		-	0,043 / -		0,044 / 0,001		0,047 / 0,003		0,053 / 0,007		0,071 / 0,018		-		-		-	
		-	0,58		21,43		18,75 / 19,57		15,38 / 16,94		11,11 / 13,24 / 5,62		-		-		-	
T3-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	1,60 / 0,62	-	1,60 / 0,61		1,55 / 0,61		1,54 / 0,60		1,52 / 0,60		1,48 / 0,59		-		-		-	
		-	0,018 / -		0,022 / 0,005		0,031 / 0,008		0,044 / 0,014		0,072 / 0,028		-		-		-	
		-	1,42		5,36		6,12 / 5,84		7,41 / 6,65		7,23 / 6,94 / 5,58		-		-		-	

**A. 7.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 71: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – T3-WM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]																		
	$\sigma=0$	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$			$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$					
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$	$s'_{ges(12,5)}$	$E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$	$s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$	$E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$	$s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$	$E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$	$s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$	$E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$	$s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$	$E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(0,0)}$	$s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$	$E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$
T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	2,62 / 0,72	-	-	2,47 / 0,71	-	2,40 / 0,71	-	2,24 / 0,69	-	2,01 / 0,67	-	1,71 / 0,63	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,043 / -	-	0,061 / 0,018	-	0,104 / 0,044	-	0,169 / 0,065	-	0,249 / 0,080	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,58	-	1,42	-	1,15 / 1,22	-	1,55 / 1,39	-	2,52 / 1,82 / 1,61	-	-	-	-	-	-	-
T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	2,47 / 0,71	-	-	2,31 / 0,70	-	2,30 / 0,70	-	2,21 / 0,69	-	2,01 / 0,67	-	1,75 / 0,64	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,044 / -	-	0,049 / 0,005	-	0,075 / 0,026	-	0,131 / 0,055	-	0,205 / 0,075	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,57	-	5,00	-	1,91 / 2,41	-	1,81 / 2,02	-	2,67 / 2,32 / 1,95	-	-	-	-	-	-	-
T3-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	1,91 / 0,66	-	-	1,85 / 0,65	-	1,83 / 0,65	-	1,80 / 0,64	-	1,74 / 0,63	-	1,61 / 0,62	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,022 / -	-	0,029 / 0,007	-	0,040 / 0,012	-	0,061 / 0,021	-	0,104 / 0,043	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	1,14	-	3,85	-	4,29 / 4,13	-	4,84 / 4,51	-	4,65 / 4,58 / 3,85	-	-	-	-	-	-	-

**A. 7.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 72: Zusammenstellung e, n, s' und E<sub>Oed</sub> – S1-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Porenzahl $e_{ges(\sigma)} / n_{ges(\sigma)}$ [-] / bez. Setzung $s'_{ges(\sigma)} / s'_{ink(\sigma)}$ [-] / Oedometermodul $E_{Oed(\sigma)}$ [MN/m <sup>2</sup> ] $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]													
	$\sigma=0$		$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$		$\sigma=50,0$		$\sigma=100$		$\sigma=200$		$\sigma=400$	
	$e_{ges(0,0)} / n_{ges(0,0)}$	$e_{ges(12,5)} / n_{ges(12,5,0)}$ $s'_{ges(12,5)}$ $E_{Oed(6,25)}$	$e_{ges(25,0)} / n_{ges(25,0)}$ $s'_{ges(25,0)} / s'_{ink(25,0)}$ $E_{Oed(12,5)}$ bzw. $E_{Oed(18,75)}$	$e_{ges(50,0)} / n_{ges(50,0)}$ $s'_{ges(50,0)} / s'_{ink(50,0)}$ $E_{Oed(37,5)}$	$e_{ges(100)} / n_{ges(100)}$ $s'_{ges(100)} / s'_{ink(100)}$ $E_{Oed(75,0)} / E_{Oed(62,5)}$	$e_{ges(200)} / n_{ges(200)}$ $s'_{ges(200)} / s'_{ink(200)}$ $E_{Oed(150)} / E_{Oed(112,5)}$	$e_{ges(400)} / n_{ges(400)}$ $s'_{ges(400)} / s'_{ink(400)}$ $E_{Oed(300)} / E_{Oed(212,5)} / E_{Oed(200)}$							
S1-DM-5% CEM I-1d 25-19d 400	0,58	-	0,56 / 0,36	0,56 / 0,36	0,55 / 0,36	0,55 / 0,36	0,55 / 0,35							
	/	-	0,014 / -	0,015 / 0,001	0,016 / 0,002	0,019 / 0,002	0,021 / 0,003							
	0,37	-	1,83	21,43	33,33 / 28,13	46,15 / 36,21	75,00 / 50,00 / 18,90							
S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400	0,68	-	0,66 / 0,40	0,66 / 0,40	0,66 / 0,40	0,65 / 0,40	0,65 / 0,39							
	/	-	0,008 / -	0,009 / 0,001	0,010 / 0,001	0,013 / 0,002	0,014 / 0,001							
	0,40	-	3,13	25,00	37,50 / 32,14	42,86 / 37,50	171,43 / 64,29 / 28,92							

## **A. 8 Zusammenstellung der Setzungen $s$ der Oedometerversuchsreihen**

In diesem Abschnitt sind die aufgezeichneten Setzungen  $s$  [mm] der verschiedenen Versuchsreihen zum Ende der unterschiedlichen Zwischenlaststufen bzw. nach den verschiedenen Zeiten in den Anfangs- und Endlaststufen dargestellt. Zusätzlich ist der Variationskoeffizient  $V$  [%] der Messungen angegeben.

## A. 8.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

Tab. A. 73: Zusammenstellung der Setzungen  $s$  – unbehandelte Versuchsreihen T1, T2 T3 u. S1.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]							
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$		$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$	
	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 3 [d] / $V$ [%] $s$ [mm] nach 5 [d] / $V$ [%] $s$ [mm] nach 14 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / $V$ [%] $s$ [mm] nach 4 [d] / $V$ [%] $s$ [mm] nach 5 [d] / $V$ [%] Endsetzung $s$ [mm] / $V$ [%]	
T1- 1d 12,5- 5d 400	1,42 / 6,26	2,17 / 2,93		3,34 / 1,25	5,00 / 0,50	6,97 / 0,86	8,88 / 0,79	
		-					9,16 / 0,77	
		-					9,21 / 0,77	
		-					9,21 / 0,77	
T1- 3d 25- 4d 400	-	2,31 / 3,85		3,39 / 3,83	5,05 / 3,39	7,10 / 3,20	9,11 / 2,80	
		2,45 / 3,63					9,42 / 2,77	
		-					-	
		-					9,42 / 2,77	
T2- 1d 25- 19d 400	-	2,59 / 2,91		3,55 / 2,86	4,91 / 2,34	6,51 / 1,84	8,13 / 1,48	
		-					8,38 / 1,55	
		-					8,42 / 1,54	
		-					8,65 / 1,56	
T3- 1d 25- 32d 400	-	2,46 / 1,24		3,35 / 1,21	4,55 / 1,33	5,88 / 1,45	7,18 / 1,13	
		-					7,41 / 1,76	
		-					7,45 / 1,75	
		-					7,70 / 1,70	
S1- 1d 25- 19 d 400	-	0,64 / 2,37		0,81 / 3,55	0,96 / 15,12	1,24 / 5,04	1,48 / 5,61	
		-					1,50 / 5,54	
		-					1,50 / 5,54	
		-					1,52 / 5,85	

### A. 8.2 T1 60 und 105°C-Versuchsreihen

Tab. A. 74: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-60 u. 105°C.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$				$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
T1-60°C-1d 12,5-20d 400	1,30 / 22,45	1,71 / 14,06				2,27 / 9,00	3,03 / 6,29	3,95 / 4,65	5,13 / 3,83			
		-							5,40 / 3,71			
		-							5,45 / 3,75			
		-							5,78 / 4,06			
T1-105°C-1d 12,5-20d 400	1,27 / 18,49	1,80 / 16,93				2,45 / 17,12	3,26 / 16,56	4,19 / 16,22	5,35 / 15,34			
		-							5,64 / 15,06			
		-							5,71 / 15,07			
		-							6,05 / 14,80			

### A. 8.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

Tab. A. 75: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-LP.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$				$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]	
T1-DM-10% LP-1d 12,5-5d 400	1,26 / 13,90	1,86 / 8,62				2,79 / 6,38	4,07 / 5,15	5,66 / 4,49	7,36 / 4,11			
		-							7,59 / 4,11			
		-							7,63 / 4,08			
		-							7,63 / 4,08			
T1-DM-20% LP-1d 12,5-5d 400	0,86 / 16,28	1,28 / 12,11				1,94 / 8,10	2,88 / 5,38	4,15 / 4,39	5,67 / 3,39			
		-							5,86 / 3,69			
		-							5,89 / 3,67			
		-							5,89 / 3,67			

## A. 8.4 T1-DM-B300-Versuchsreihen

Tab. A. 76: Zusammenstellung der Setzungen  $s$  – T1-DM-B300

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]												
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$				$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]		$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 3 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 5 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 14 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 4 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung $s$ [mm] / V [%]
T1-DM-5% B300-1d 12,5-5d 400	1,24 / 18,17		1,62 / 24,29				2,27 / 23,07	3,45 / 16,94	5,08 / 11,41		6,97 / 7,84		
			-								7,33 / 8,20		
			-								7,99 / 8,21		
			-								7,99 / 8,21		
T1-DM-10% B300-1d 12,5-5d 400	0,95 / 22,57		1,18 / 29,93				1,66 / 26,26	2,56 / 18,89	3,95 / 12,53		5,71 / 8,73		
			-								5,98 / 9,45		
			-								6,01 / 9,60		
			-								6,01 / 9,60		
T1-DM-20% B300-1d 12,5-5d 400	0,24 / 31,12		0,34 / 34,01				0,51 / 29,63	0,78 / 23,74	1,26 / 15,33		2,34 / 7,26		
			-								2,45 / 7,34		
			-								2,46 / 7,31		
			-								2,46 / 7,31		
T1-DM-5% B300-3d 25-4d 400	-		2,20 / 11,19				2,62 / 16,79	3,38 / 15,93	4,88 / 10,81		6,82 / 6,07		
			2,32 / 13,73								7,16 / 6,26		
			-								-		
			-								7,16 / 6,26		
T1-DM-10% B300-3d 25-4d 400	-		1,99 / 11,55				2,29 / 14,71	2,94 / 12,76	4,27 / 9,06		6,09 / 6,08		
			2,04 / 13,43								6,35 / 6,36		
			-								-		
			-								6,35 / 6,36		
T1-DM-20% B300-3d 25-4d 400	-		1,38 / 8,17				1,49 / 6,43	1,70 / 6,36	2,20 / 7,64		3,39 / 7,83		
			1,39 / 7,51								3,51 / 7,81		
			-								-		
			-								3,51 / 7,81		



**A. 8.5 T1-DM-B500-Versuchsreihen**

Tab. A. 77: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-B500.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]												
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$				
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]	
T1-DM-5% B500-1d 12,5-5d 400	1,13 / 12,76	1,59 / 12,74			2,39 / 7,36	3,86 / 3,63	5,20 / 1,45	7,03 / 1,01			7,40 / 1,13	7,46 / 1,12	7,46 / 1,12
		-						-					
		-						-					
		-						-					
T1-DM-10% B500-1d 12,5-5d 400	1,02 / 13,01	1,28 / 17,63			1,75 / 17,72	2,66 / 13,60	4,12 / 8,30	5,91 / 5,08			6,20 / 5,40	6,22 / 5,51	6,22 / 5,51
		-						-					
		-						-					
		-						-					
T1-DM-20% B500-1d 12,5-5d 400	0,09 / 345,52	0,22 / 165,40			0,44 / 95,78	0,84 / 58,20	1,62 / 35,44	2,95 / 20,37			3,09 / 20,23	3,10 / 20,17	3,10 / 20,17
		-						-					
		-						-					
		-						-					
T1-DM-5% B500-3d 25-4d 400	-	2,29 / 7,91			2,90 / 8,70	3,85 / 6,96	5,42 / 5,02	7,35 / 3,88			7,74 / 4,06	-	7,74 / 4,06
		2,48 / 9,24						-					
		-						-					
		-						-					
T1-DM-10% B500-3d 25-4d 400	-	2,03 / 5,83			2,27 / 13,30	3,38 / 24,64	4,90 / 23,41	6,21 / 5,97			6,44 / 5,75	-	6,44 / 5,75
		2,04 / 11,35						-					
		-						-					
		-						-					
T1-DM-20% B500-3d 25-4d 400	-	1,27 / 14,61			1,28 / 16,88	1,51 / 15,50	2,02 / 13,59	3,25 / 9,42			3,41 / 9,44	-	3,41 / 9,44
		1,18 / 16,44						-					
		-						-					
		-						-					

## A. 8.6 T1-DM-BK-Versuchsreihen

Tab. A. 78: Zusammenstellung der Setzungen  $s$  – T1-DM-BK.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]												
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$				$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]		$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 3 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 5 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 14 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 1 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 4 [d] / V [%]	$s$ [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung $s$ [mm] / V [%]
T1-DM-5% BK-1d 12,5-5d 400	1,13 / 12,76		1,59 / 12,74				2,39 / 7,36	3,86 / 3,63	5,20 / 1,45		7,03 / 1,07		
			-								7,40 / 1,13		
			-								7,46 / 1,12		
			-								7,46 / 1,12		
T1-DM-10% BK-1d 12,5-5d 400	0,89 / 9,72		1,15 / 17,04				1,74 / 13,68	3,00 / 9,14	4,31 / 4,83		6,15 / 2,74		
			-								6,50 / 2,76		
			-								6,55 / 2,83		
			-								6,55 / 2,83		
T1-DM-20% BK-1d 12,5-5d 400	0,15 / 92,77		0,29 / 64,60				0,84 / 68,48	1,76 / 36,51	2,81 / 22,45		4,49 / 14,72		
			-								4,79 / 14,21		
			-								4,84 / 14,18		
			-								4,84 / 14,18		
T1-DM-5% BK-3d 25-4d 400	-		2,45 / 2,05				2,87 / 5,16	3,75 / 3,62	5,34 / 1,63		7,39 / 1,15		
			2,55 / 3,92								7,81 / 1,41		
			-								-		
			-								-		
T1-DM-10% BK-3d 25-4d 400	-		2,16 / 2,12				2,30 / 5,01	3,00 / 4,43	4,39 / 3,16		6,30 / 2,27		
			2,13 / 1,65								6,66 / 2,54		
			-								-		
			-								-		
T1-DM-20% BK-3d 25-4d 400	-		1,14 / 6,96				0,80 / 16,38	1,27 / 12,89	2,27 / 7,79		3,90 / 4,48		
			0,61 / 16,73								4,20 / 4,52		
			-								-		
			-								-		

**A. 8.7 T1-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 8.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 79: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]										
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$		
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]
T1-DM-5% CEM I-1d 12,5-28d 400	1,01 / 6,39	1,17 / 2,62			1,47 / 0,68	2,16 / 4,00	3,63 / 4,75	5,65 / 3,60			
		-						5,92 / 3,70			
		-						5,96 / 3,71			
		-						6,24 / 4,03			
T1-DM-10% CEM I-1d 12,5-28d 400	0,80 / 4,51	0,88 / 3,46			1,03 / 0,97	1,34 / 3,25	2,21 / 3,45	3,95 / 1,86			
		-						4,14 / 2,03			
		-						4,17 / 1,80			
		-						4,34 / 2,39			
T1-DM-20% CEM I-1d 12,5-28d 400	0,68 / 16,96	0,71 / 17,13			0,76 / 16,84	0,85 / 17,05	1,09 / 16,54	2,12 / 12,73			
		-						2,19 / 12,63			
		-						2,19 / 12,65			
		-						2,26 / 12,56			
T1-DM-5% CEM I-3d 25-4d 400	-	1,91 / 4,94			2,13 / 5,45	2,61 / 4,89	3,85 / 3,00	5,89 / 1,77			
		1,97 / 5,49						6,16 / 1,91			
		-						-			
		-						6,16 / 1,91			
T1-DM-10% CEM I-3d 25-4d 400	-	1,66 / 4,22			1,73 / 5,81	1,90 / 8,21	2,46 / 11,62	4,01 / 10,41			
		1,68 / 4,76						4,19 / 10,40			
		-						-			
		-						4,19 / 10,40			
T1-DM-20% CEM I-3d 25-4d 400	-	1,48 / 3,33			1,51 / 4,27	1,56 / 5,09	1,66 / 5,81	1,98 / 8,17			
		1,49 / 3,70						2,02 / 8,00			
		-						-			
		-						2,02 / 8,00			

Tab. A. 80: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-DM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]								
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$		$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$		
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]
T1-DM-5% CEM I-5d 25-9d 400	-	1,87 / 6,30	2,02 / 7,15	2,39 / 7,84	3,49 / 7,60	5,52 / 5,88	5,83 / 5,66	5,87 / 5,72	5,96 / 5,70
		1,92 / 6,61							
		1,92 / 6,69							
		-							
T1-DM-10% CEM I-5d 25-9d 400	-	1,60 / 4,72	1,66 / 5,96	1,77 / 6,63	2,14 / 7,09	3,46 / 5,38	3,65 / 5,18	3,67 / 5,15	3,74 / 5,01
		1,62 / 5,04							
		1,62 / 5,38							
		-							
T1-DM-20% CEM I-5d 25-9d 400	-	1,29 / 1,62	1,30 / 2,04	1,34 / 3,10	1,43 / 3,58	1,67 / 3,30	1,65 / 3,23	1,70 / 2,95	1,72 / 2,63
		1,29 / 1,62							
		1,29 / 1,34							
		-							
T1-DM 20% CEM I-7d 25-170d 400	-	1,16 / 14,91	1,17 / 14,32	1,21 / 14,19	1,30 / 13,28	1,52 / 10,34	1,57 / 10,40	1,57 / 10,14	1,66 / 9,66
		1,16 / 14,40							
		1,16 / 14,40							
		1,16 / 14,40							
T1-DM-5% CEM I-14d 25-54d 400	-	2,00 / 4,92	2,13 / 6,35	2,36 / 6,98	3,31 / 5,03	5,28 / 3,62	5,52 / 3,64	5,56 / 3,79	5,93 / 3,38
		2,05 / 4,75							
		2,06 / 5,20							
		2,07 / 5,59							
T1-DM-20% CEM I-14d 25-54d 400	-	1,31 / 3,53	1,31 / 3,33	1,33 / 4,70	1,40 / 5,85	1,58 / 7,78	1,60 / 8,02	1,61 / 7,63	1,67 / 7,74
		1,31 / 3,53							
		1,31 / 3,53							
		1,31 / 3,53							
T1-DM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	-	0,40 / 18,58	0,42 / 8,25	0,55 / 5,45	0,77 / 6,64	1,28 / 6,68	1,34 / 6,38	-	1,34 / 6,38
		-							
		-							
		-							

**A. 8.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 81: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-WM-CEM I-1 von 2.**

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]										
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$		
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]
T1-WM-5% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	-	0,66 / 24,37			0,98 / 15,57	1,76 / 9,27	3,31 / 4,65	5,54 / 2,80			
		-						5,78 / 2,69			
		-						-			
		-						5,78 / 2,69			
T1-WM-10% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	-	0,67 / 7,90			0,85 / 8,24	1,24 / 6,50	2,39 / 4,22	4,53 / 2,56			
		-						4,75 / 2,88			
		-						-			
		-						4,75 / 2,88			
T1-WM-20% CEM I-2d 0-1d 25-4d 400	-	0,40 / 31,32			0,50 / 28,75	0,73 / 24,24	1,36 / 17,97	3,17 / 8,96			
		-						3,30 / 8,61			
		-						-			
		-						3,30 / 8,61			
T1-WM-5% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	-	0,97 / 23,53			1,17 / 20,34	1,81 / 10,94	3,41 / 4,54	5,64 / 2,40			
		1,00 / 23,78						5,83 / 1,84			
		1,03 / 23,32						5,89 / 2,38			
		-						6,13 / 2,45			
T1-WM-10% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	-	0,74 / 14,13			0,84 / 13,33	1,13 / 11,98	2,04 / 6,97	3,95 / 3,21			
		0,75 / 13,94						4,10 / 3,07			
		0,76 / 14,23						4,13 / 3,04			
		-						4,32 / 2,90			
T1-WM-20% CEM I-2d 0-5d 25-22d 400	-	0,35 / 37,36			0,39 / 33,86	0,51 / 32,28	0,81 / 24,46	1,88 / 10,11			
		0,35 / 35,39						1,95 / 9,61			
		0,36 / 36,32						1,96 / 9,26			
		-						2,03 / 9,30			

Tab. A. 82: Zusammenstellung der Setzungen s – T1-WM-CEM I-2 von 2.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]						
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$		$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%] s [mm] nach 5 [d] / V [%] s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%] s [mm] nach 4 [d] / V [%] s [mm] nach 5 [d] / V [%] Endsetzung s [mm] / V [%]
T1-WM-20% CEM I-10d 0-1d 25-4d 400	-	0,44 / 25,23		0,58 / 24,30	0,72 / 10,38	1,31 / 11,10	2,97 / 3,88
		-					3,08 / 3,74
		-					-
		-					3,08 / 3,74
T1-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	-	0,57 / 12,28		0,64 / 11,46	0,86 / 15,12	1,36 / 14,42	2,98 / 8,63
		0,58 / 11,80					3,07 / 8,75
		0,59 / 11,60					3,09 / 8,60
		0,59 / 11,60					3,10 / 8,74
T1-WM 0,5-20 % CEM-3d 0-1d 25-12d 400	-	0,68 / 15,49		0,82 / 13,85	1,03 / 11,93	1,35 / 10,03	2,15 / 4,21
		-					2,25 / 4,14
		-					2,27 / 4,10
		-					2,33 / 3,97

**A. 8.8 T2-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 8.8.1 T2-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 83: Zusammenstellung der Setzungen s – T2-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
T2-DM-5% CEM I-1d 25-5d 400	-	1,64 / 4,00	-	-	-	1,74 / 4,07	1,95 / 3,36	2,51 / 2,40	3,70 / 1,28	3,89 / 1,21	3,93 / 1,31	3,93 / 1,31
T2-DM-10% CEM I-1d 25-5d 400	-	1,62 / 12,89	-	-	-	1,67 / 12,57	1,75 / 12,23	1,92 / 11,36	2,40 / 9,90	2,48 / 9,98	2,50 / 9,90	2,50 / 9,90
T2-DM-20% CEM I-1d 25-5d 400	-	1,27 / 4,35	-	-	-	1,31 / 5,07	1,37 / 5,27	1,47 / 5,93	1,65 / 6,41	1,68 / 6,30	1,69 / 6,61	1,69 / 6,61
T2-DM-20% CEM I-7d 25-170d 400	-	0,98 / 2,70	0,98 / 2,56	0,98 / 2,56	0,98 / 2,56	1,01 / 2,62	1,07 / 2,71	1,17 / 2,96	1,40 / 1,79	1,45 / 2,43	1,45 / 2,07	1,55 / 2,33
T2-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	-	0,28 / 38,41	-	-	-	0,45 / 35,56	0,60 / 32,43	0,73 / 11,21	1,05 / 3,81	1,22 / 17,35	-	1,22 / 17,35

## A. 8.8.2 T2-WM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 84: Zusammenstellung der Setzungen s – T2-WM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]									
	$\sigma=12,5$	$\sigma=25,0$		$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 7 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
T2-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-4d 400	-	0,39 / 28,49		0,51 / 27,30	0,75 / 24,69	1,33 / 15,38	2,67 / 7,74		2,77 / 7,46	
		-					-			
		-					-			
		-					2,77 / 7,46			
T2-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	-	0,55 / 4,55		0,66 / 4,65	0,87 / 3,31	1,38 / 4,11	2,67 / 3,57		2,75 / 3,69	
		0,57 / 4,64					2,76 / 3,84			
		0,58 / 4,56					2,78 / 3,79			
		0,58 / 4,56								
T2-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	-	0,45 / 18,37		0,60 / 16,68	0,77 / 11,30	0,99 / 6,85	1,42 / 4,68		1,48 / 4,73	
		-					1,49 / 4,70			
		-								
		-					1,53 / 4,44			



**A. 8.9 T3-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 8.9.1 T3-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**Tab. A. 85: Zusammenstellung der Setzungen s – T3-DM-CEM I.**

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
T2-DM-5% CEM I-1d 25-4d 400	-	1,22 / 7,94			1,41 / 6,06	1,78 / 3,68	2,54 / 2,19	3,69 / 2,50				
		-						3,89 / 2,45				
		-						-				
		-						3,89 / 2,45				
T2-DM-10% CEM I-1d 25-4d 400	-	0,90 / 10,29			1,01 / 10,34	1,18 / 10,58	1,58 / 8,00	2,37 / 3,22				
		-						2,49 / 3,12				
		-						-				
		-						2,49 / 3,12				
T2-DM-20% CEM I-1d 25-4d 400	-	0,83 / 4,85			0,90 / 5,50	1,00 / 6,24	1,17 / 6,84	1,54 / 5,90				
		-						1,58 / 5,89				
		-						-				
		-						1,58 / 5,89				
T3-DM 20% CEM I-7d 25-170d 400	-	0,85 / 23,21			0,88 / 21,92	0,93 / 20,28	1,06 / 17,80	1,42 / 16,03				
		0,86 / 22,94						1,47 / 16,15				
		0,86 / 22,94						1,48 / 16,04				
		0,86 / 22,94						1,57 / 16,40				
T3-DM-20% CEM I-3d 0-1d 25-5d 400	-	0,35 / 31,05			0,44 / 25,61	0,61 / 25,61	0,88 / 19,72	1,43 / 11,47				
		-						1,49 / 10,65				
		-						1,49 / 10,51				
		-						1,49 / 10,51				

## A. 8.9.2 T3-WM-CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 86: Zusammenstellung der Setzungen s – T3-WM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 7 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
T3-WM-20% CEM I-3d 0-1d 25-5d 400	-	0,35 / 31,05			1,21 / 11,22	2,09 / 6,98	3,38 / 4,11	4,97 / 2,47				
		-						5,07 / 2,42				
		-						5,08 / 2,46				
		-						5,08 / 2,46				
T3-WM-20% CEM I-3d 0-7d 25-6d 400	-	0,83 / 22,46			0,98 / 18,09	1,50 / 11,31	2,61 / 7,18	4,11 / 5,17				
		0,86 / 21,18						4,18 / 4,94				
		0,87 / 21,10						4,20 / 5,06				
		0,88 / 20,86						4,21 / 5,04				
T3-WM 0,5-20% CEM I-3d 0-1d 25-12d 400	-	0,44 / 17,16			0,57 / 15,04	0,80 / 11,16	1,22 / 9,05	2,08 / 5,70				
		-						2,15 / 5,38				
		-						2,17 / 5,19				
		-						2,21 / 5,10				

### A. 8.10 S1-DM CEM I-Versuchsreihen

Tab. A. 87: Zusammenstellung der Setzungen s – S1-DM-CEM I.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ in [kN/m <sup>2</sup> ]											
	$\sigma=12,5$		$\sigma=25,0$			$\sigma=50,0$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=400$			
	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 3 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	s [mm] nach 14 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 1 [d] / V [%]	s [mm] nach 4 [d] / V [%]	s [mm] nach 5 [d] / V [%]	Endsetzung s [mm] / V [%]
S1-DM-5% CEM I-1d 25-19d 400	-	0,27 / 27,46			0,29 / 31,27	0,33 / 24,93	0,37 / 21,45	0,42 / 19,49			0,43 / 20,67	
		-						0,43 / 20,67				
		-						0,43 / 20,67				
		-						0,43 / 20,67				
S1-DM-20% CEM I-1d 25-19d 400	-	0,16 / 40,98			0,18 / 36,43	0,21 / 36,32	0,24 / 34,95	0,28 / 22,08			0,31 / 29,41	
		-						0,31 / 29,41				
		-						0,31 / 29,41				
		-						0,31 / 29,41				



## **A. 9 Zusammenstellung der graphischen Darstellungen der Oedometerversuchsreihen**

Die graphischen Darstellungen der Oedometerversuche umfassen die Zeit-Setzungslinien der bez. ges. Setzung  $s'_{ges}$  und der bez. ink. Setzung  $s'_{ink}$  [-] ( $\log t$ - $s'_{ges}$ - bzw.  $-s'_{ink}$ -Linien) der Versuchsreihen innerhalb der beobachteten Laststufen ( $\sigma=12,5/25,0, 50,0, 100, 200$  und  $400 \text{ kN/m}^2$ ) in halblogarithmischer Darstellung. Die Länge der Zeitachse wurde in den Laststufen  $\sigma=12,5, 25,0$  und  $400 \text{ kN/m}^2$  in Abhängigkeit von der Dauer des am längsten beobachteten und dargestellten Versuchs gewählt. In den Zwischenlaststufe  $\sigma=25,0, 50,0, 100$  und  $200 \text{ kN/m}^2$  hat die Zeitachse entsprechend den Zwischenlaststufen aller Versuche eine Länge von 1 d.

## A. 9.1 Unbehandelte Versuchsreihen T1, T2, T3 und S1

### A. 9.1.1 log t-s<sub>ges</sub>-Linien

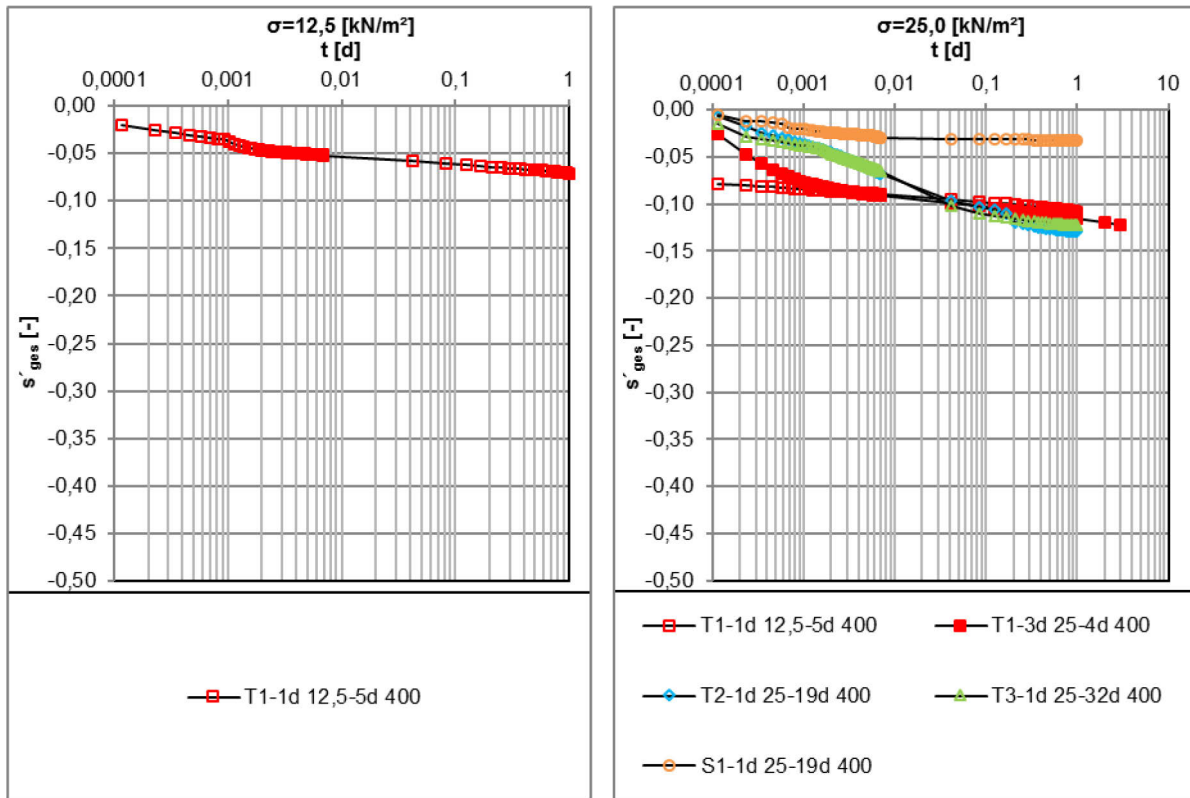


Abb. A. 1: Unbehandelte Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(12,5)</sub>, r.: log t/s<sub>ges(25,0)</sub>.

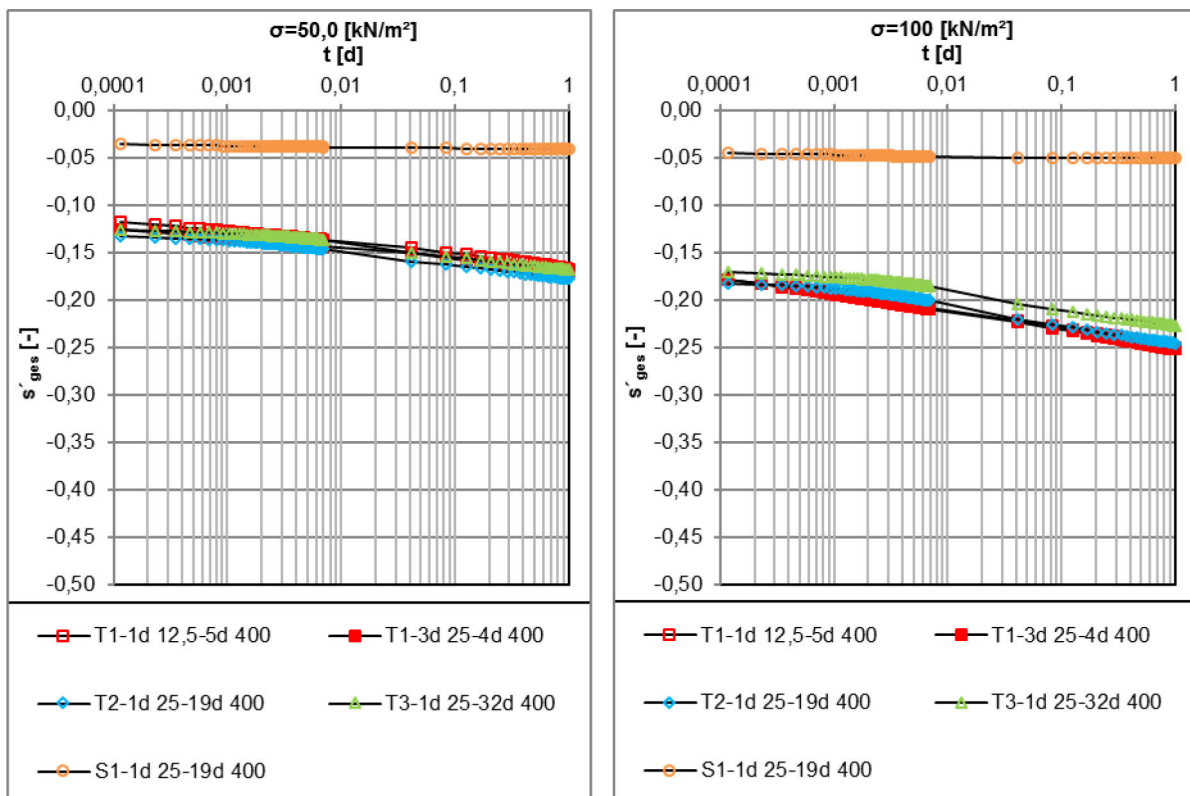


Abb. A. 2: Unbehandelte Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(50,0)</sub>, r.: log t-s<sub>ges(100)</sub>.

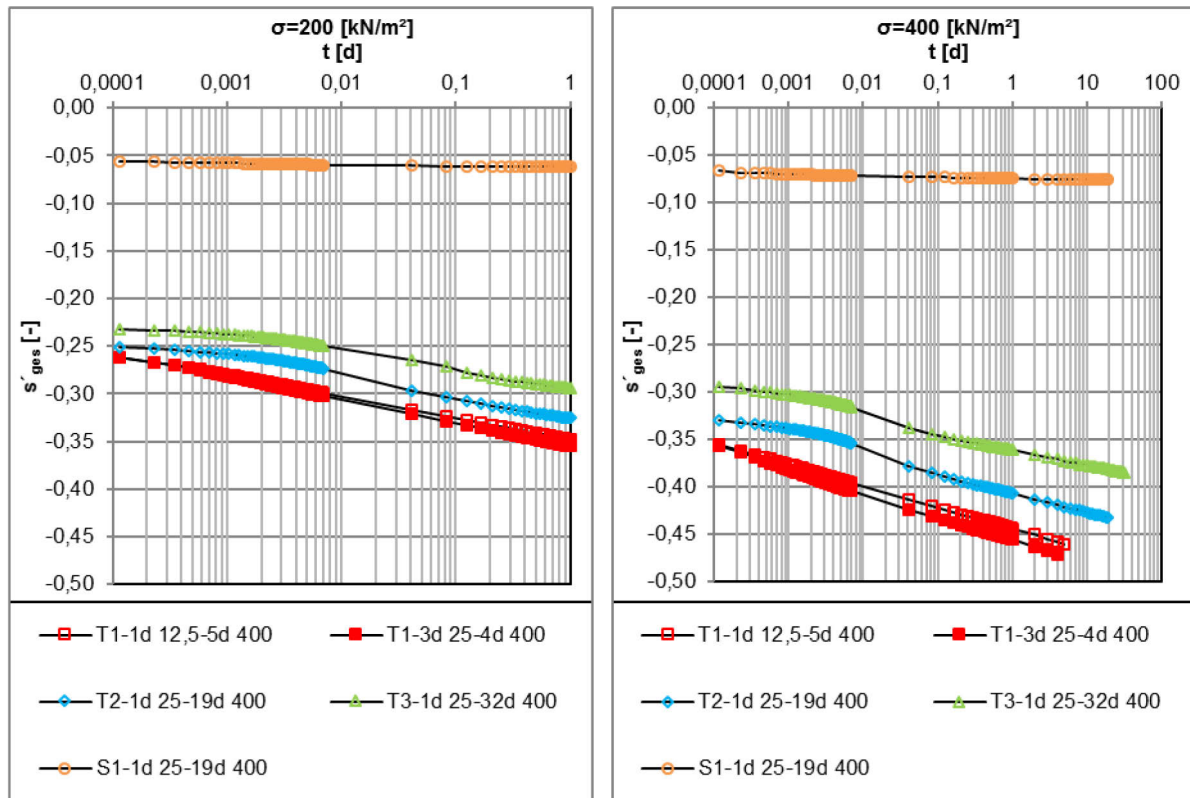


Abb. A. 3 : Unbehandelte Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.1.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

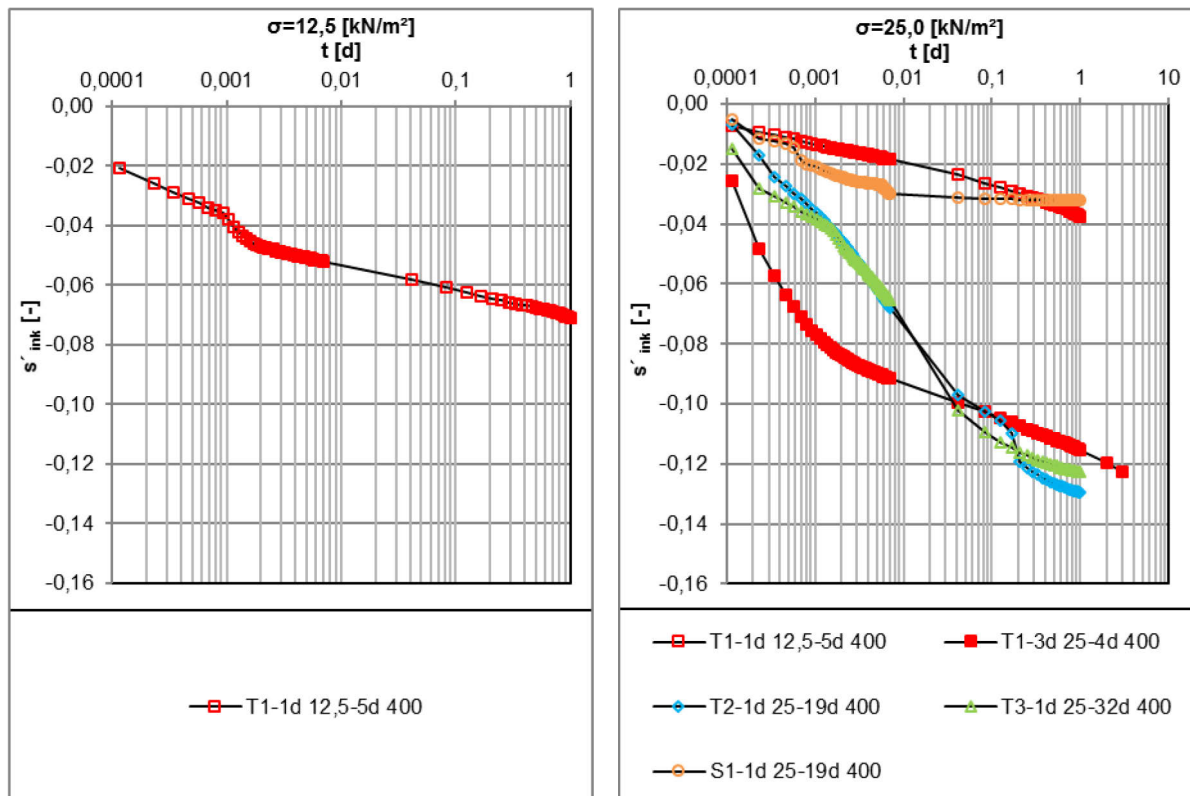


Abb. A. 4 : Unbehandelte Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.:  $\log t/s'_{ink(25,0)}$ .

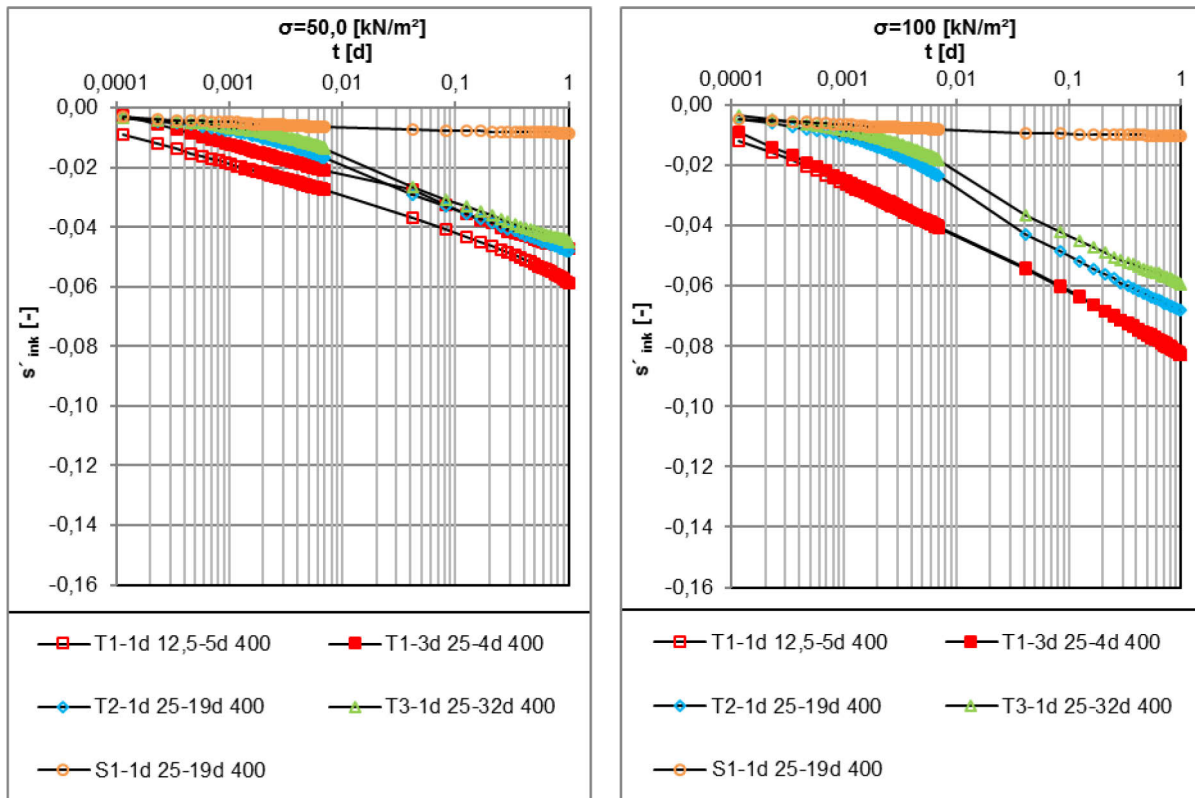


Abb. A. 5 : Unbehandelte Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(100)}$ .

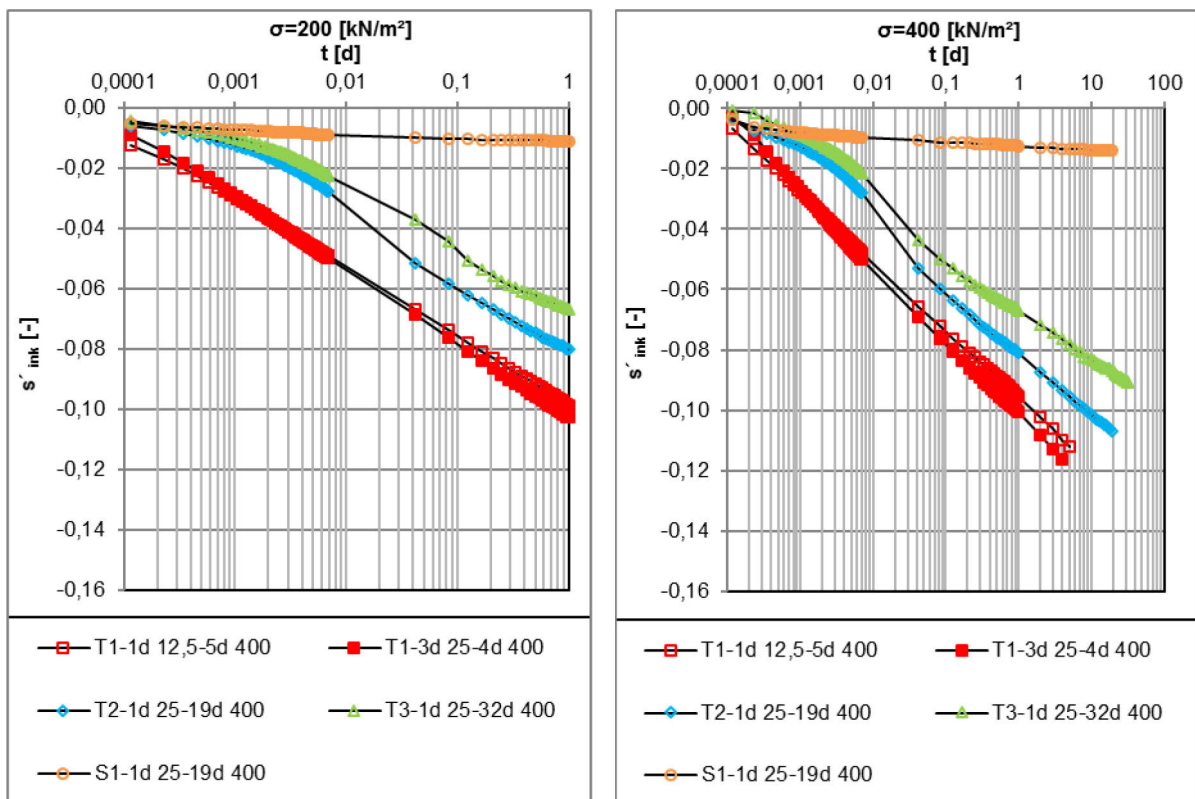


Abb. A. 6 : Unbehandelte Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(400)}$ .



## A. 9.2 T1-60 und 105 °C-Versuchsreihen

### A. 9.2.1 log t-s<sub>ges</sub>'-Linien

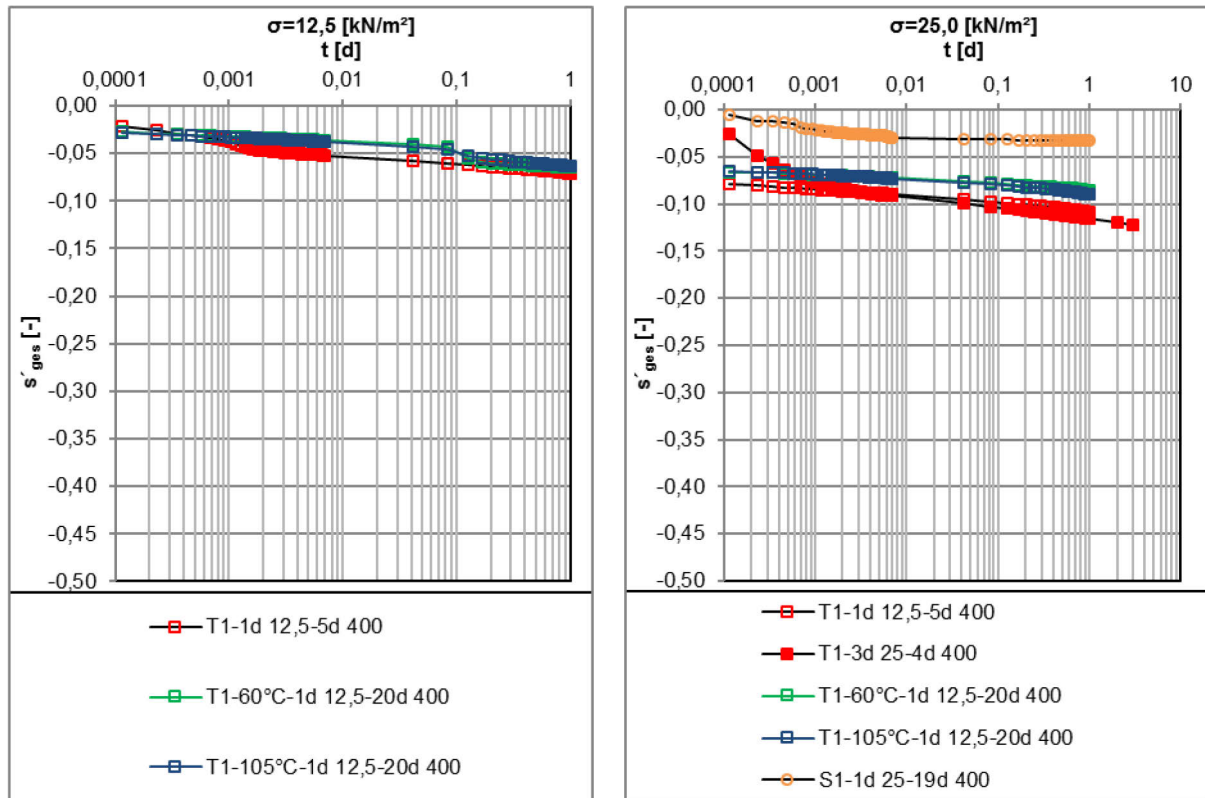


Abb. A. 7: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(12,5), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(25,0).

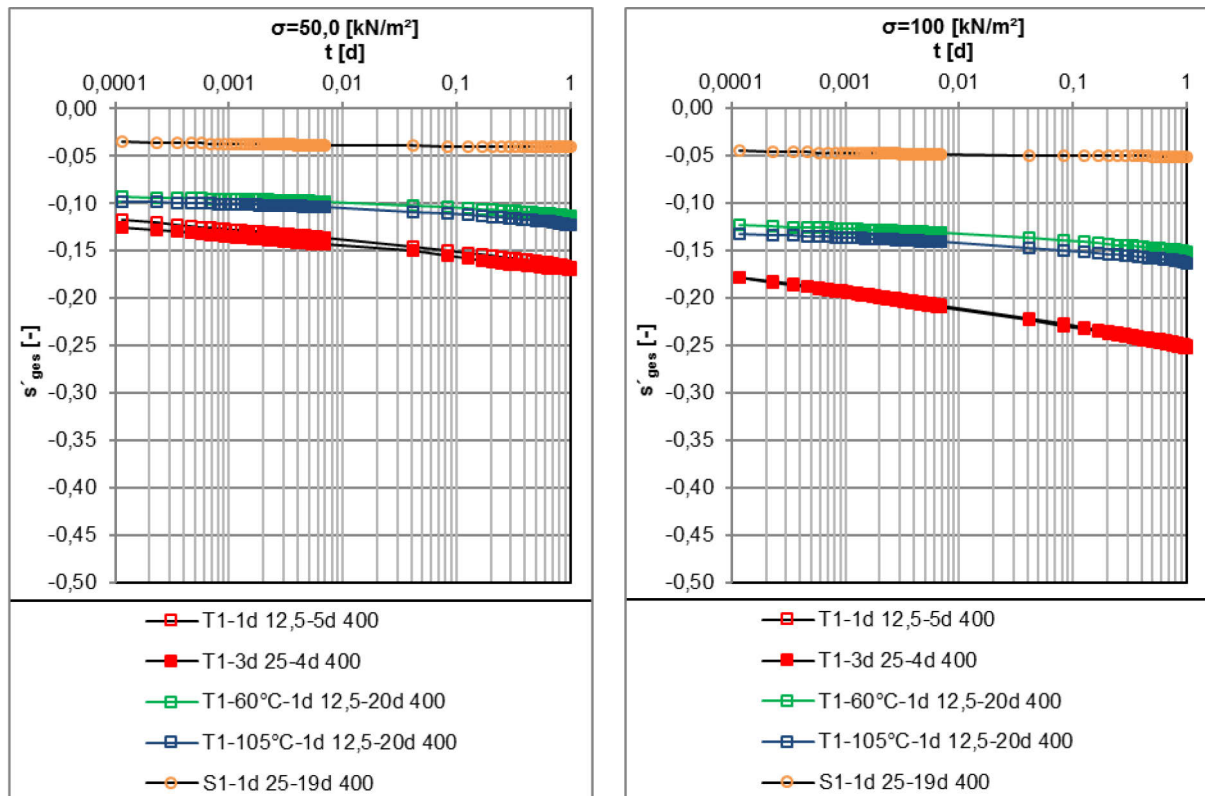


Abb. A. 8: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(50,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(100).

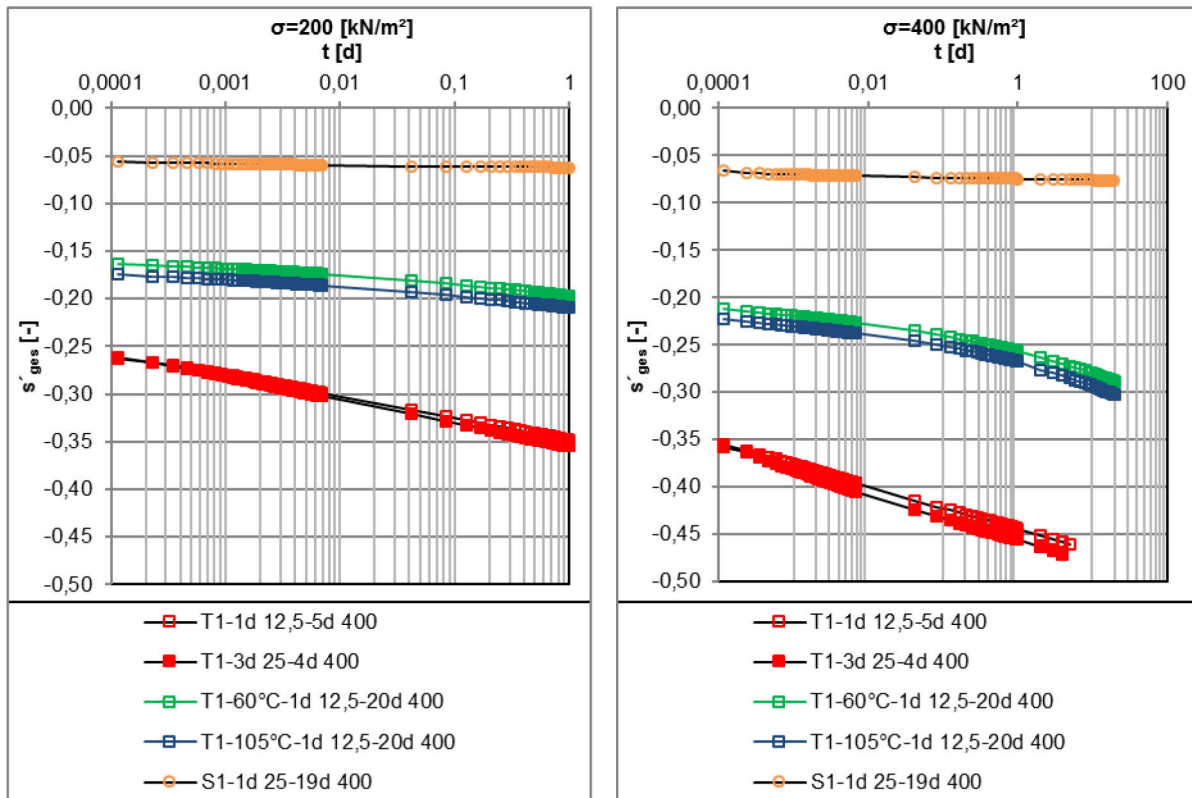


Abb. A. 9: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\log t\text{-}s'_{ges(200)}$ , r.:  $\log t\text{-}s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.2.2 $\log t\text{-}s'_{ink}$ -Linien

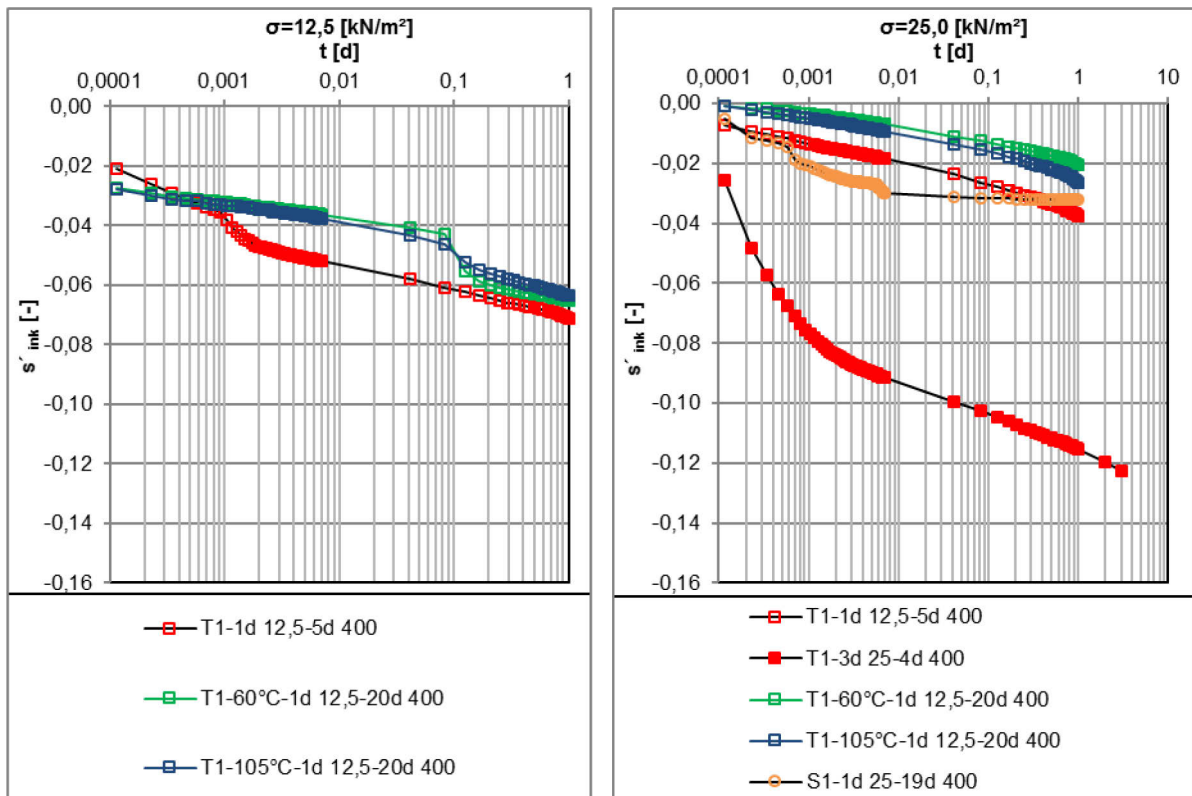


Abb. A. 10: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\log t\text{-}s'_{ink(12,5)}$ , r.:  $\log t\text{-}s'_{ink(25,0)}$ .

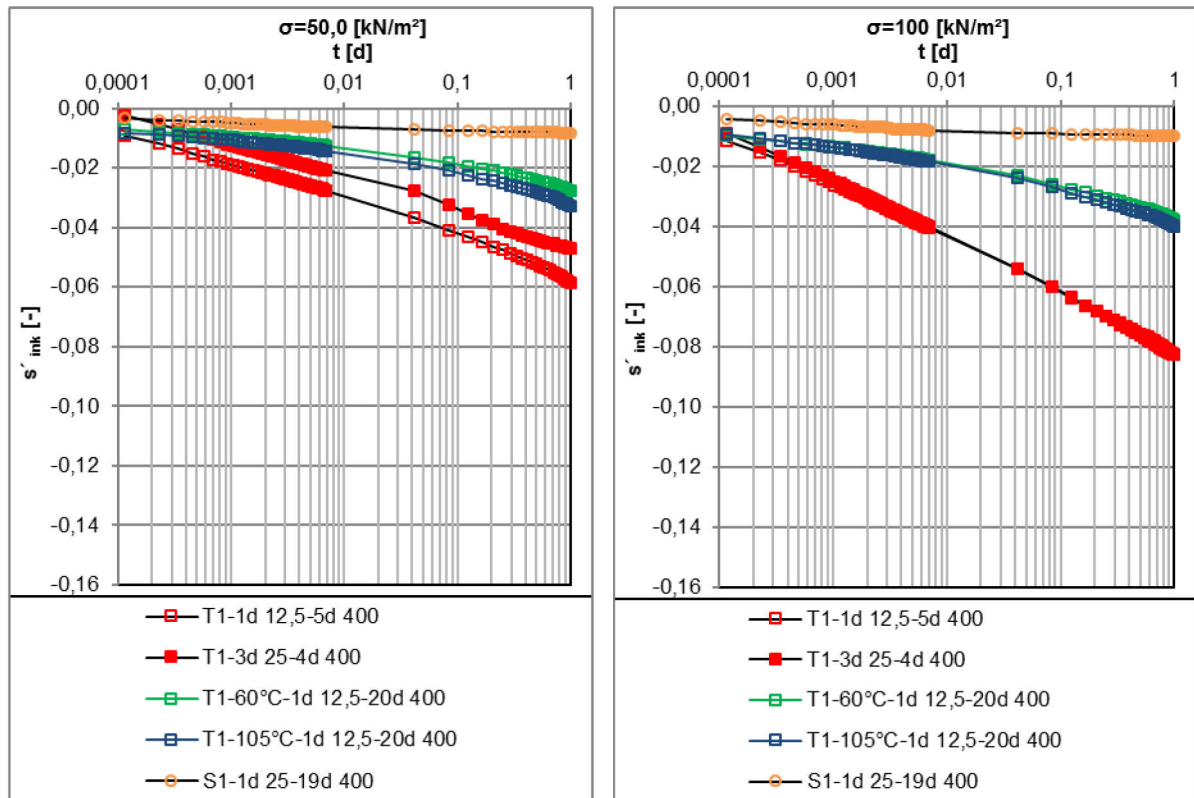


Abb. A. 11: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(100)}$ .

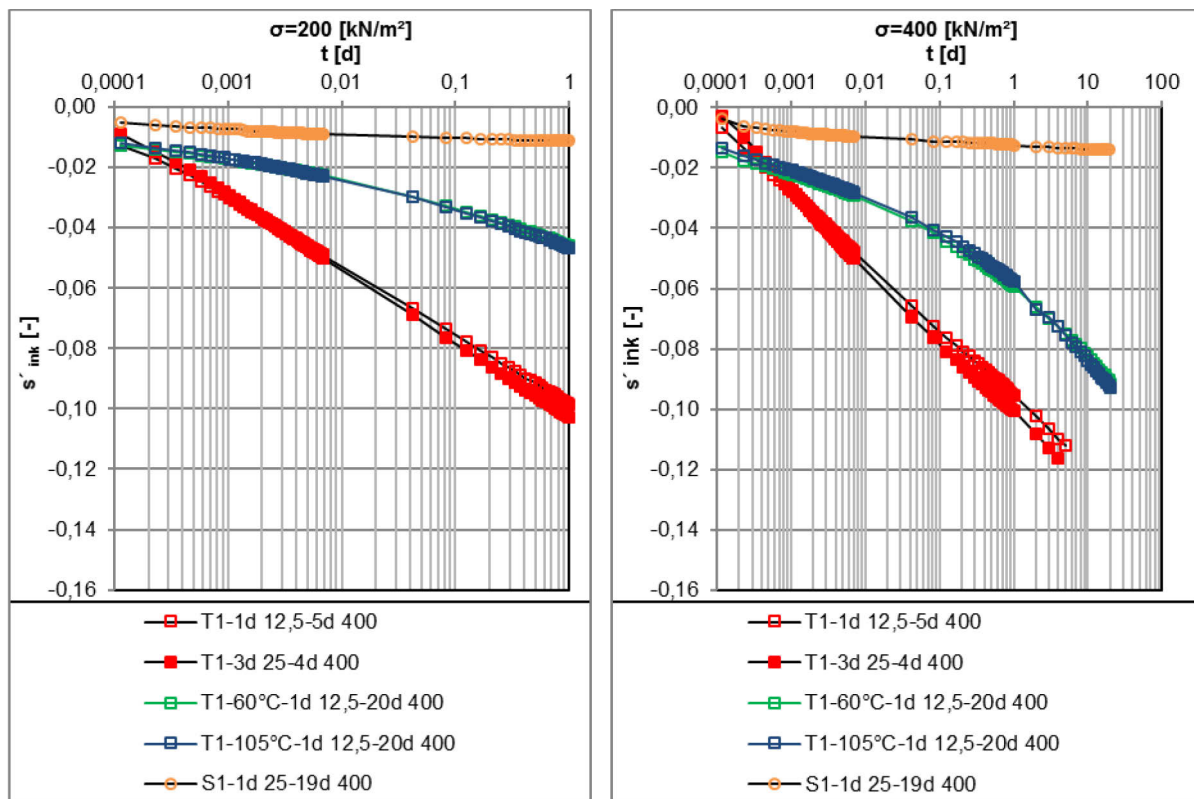


Abb. A. 12: T1-60 u. 105 °C-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(400)}$ .

### A. 9.3 T1-DM-LP-Versuchsreihen

#### A. 9.3.1 log t-s<sub>ges</sub>-Linien

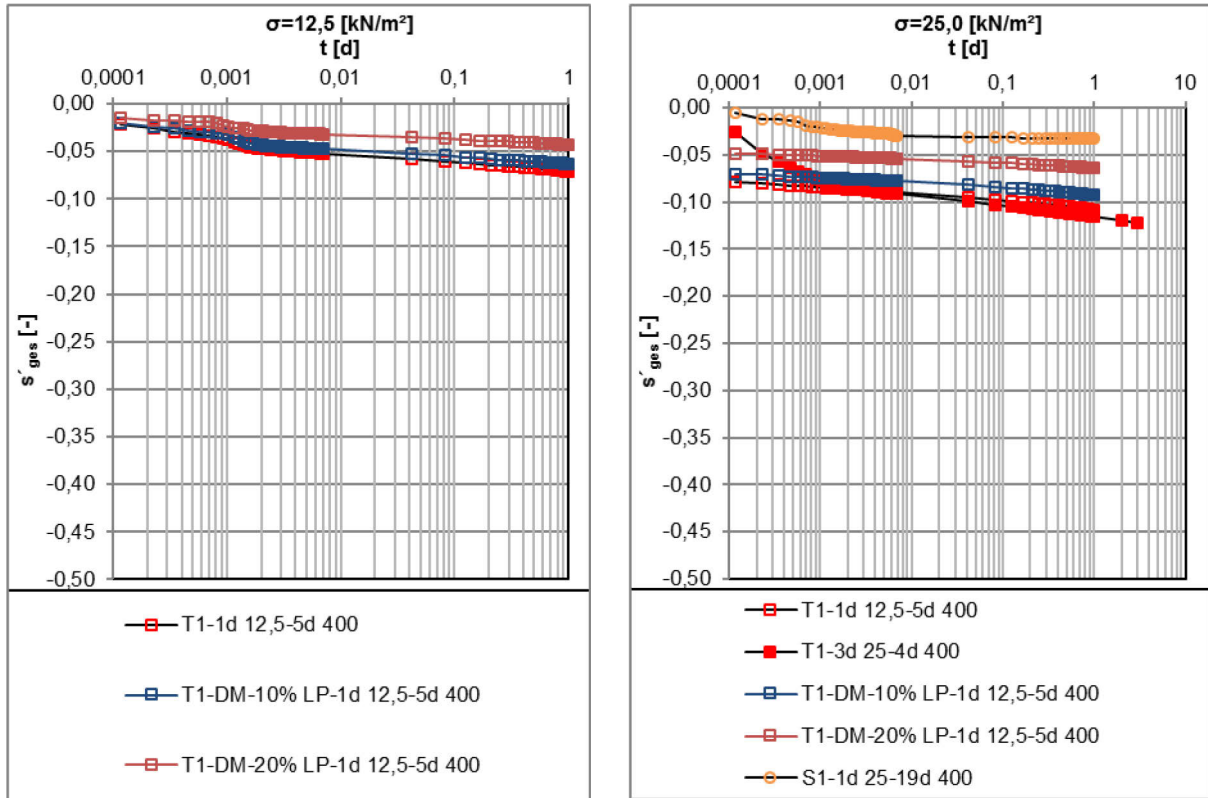


Abb. A. 13: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>(12,5), r.: log t-s<sub>ges</sub>(25,0).

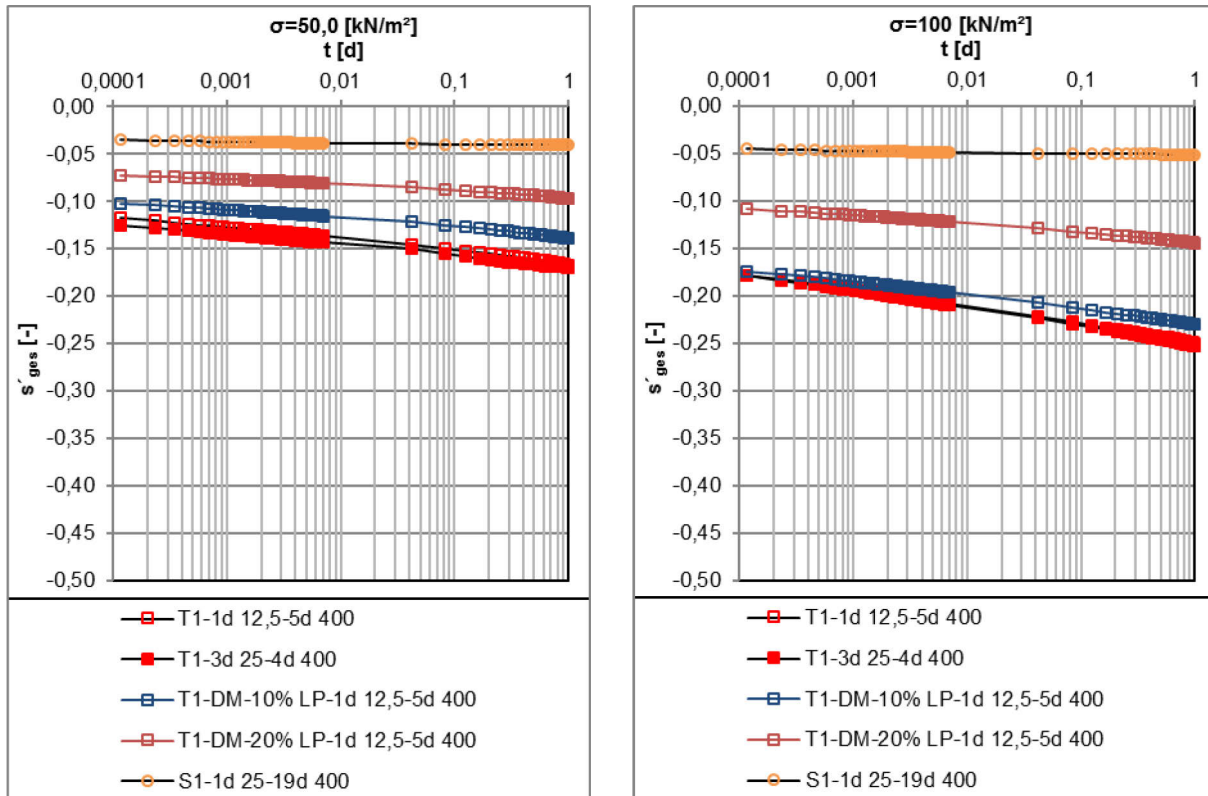


Abb. A. 14: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>(50,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>(100).

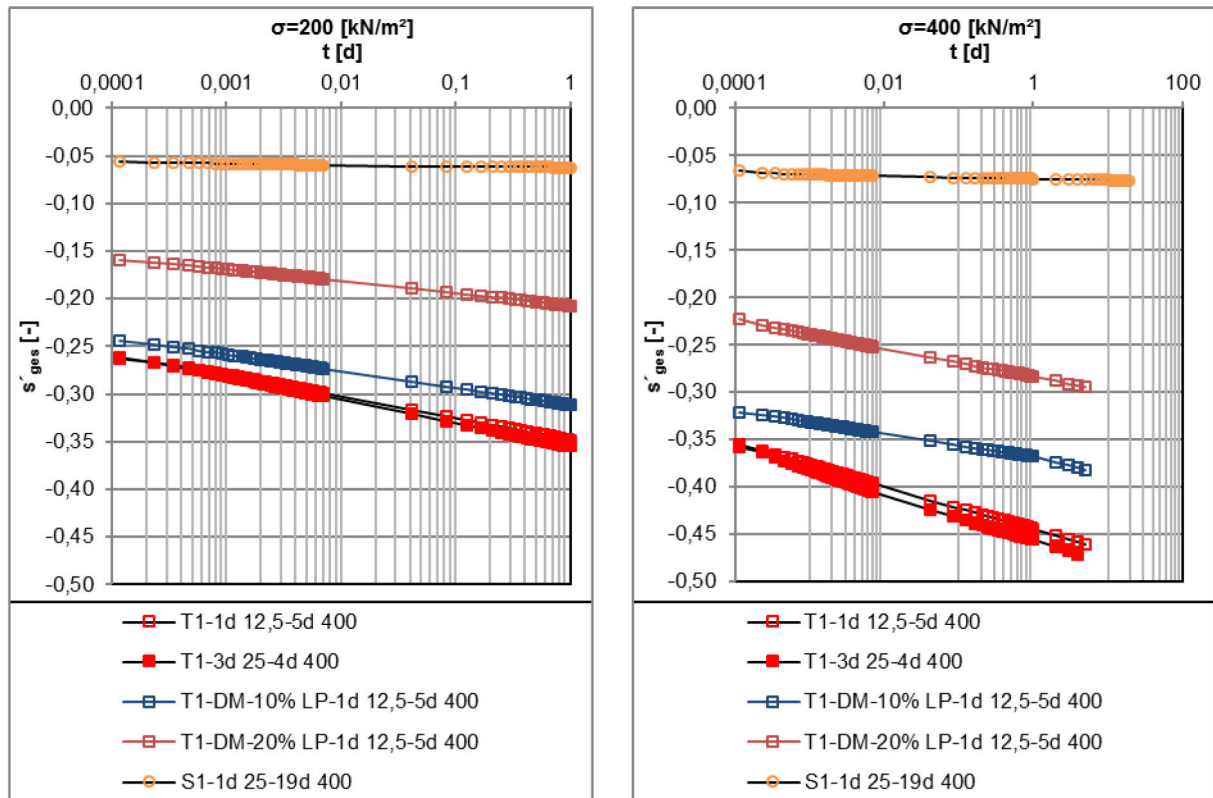


Abb. A. 15: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\log t\text{-}s'_{\text{ges}(200)}$ , r.:  $\log t\text{-}s'_{\text{ges}(400)}$ .

### A. 9.3.2 $\log t\text{-}s'_{\text{ink}}$ -Linien

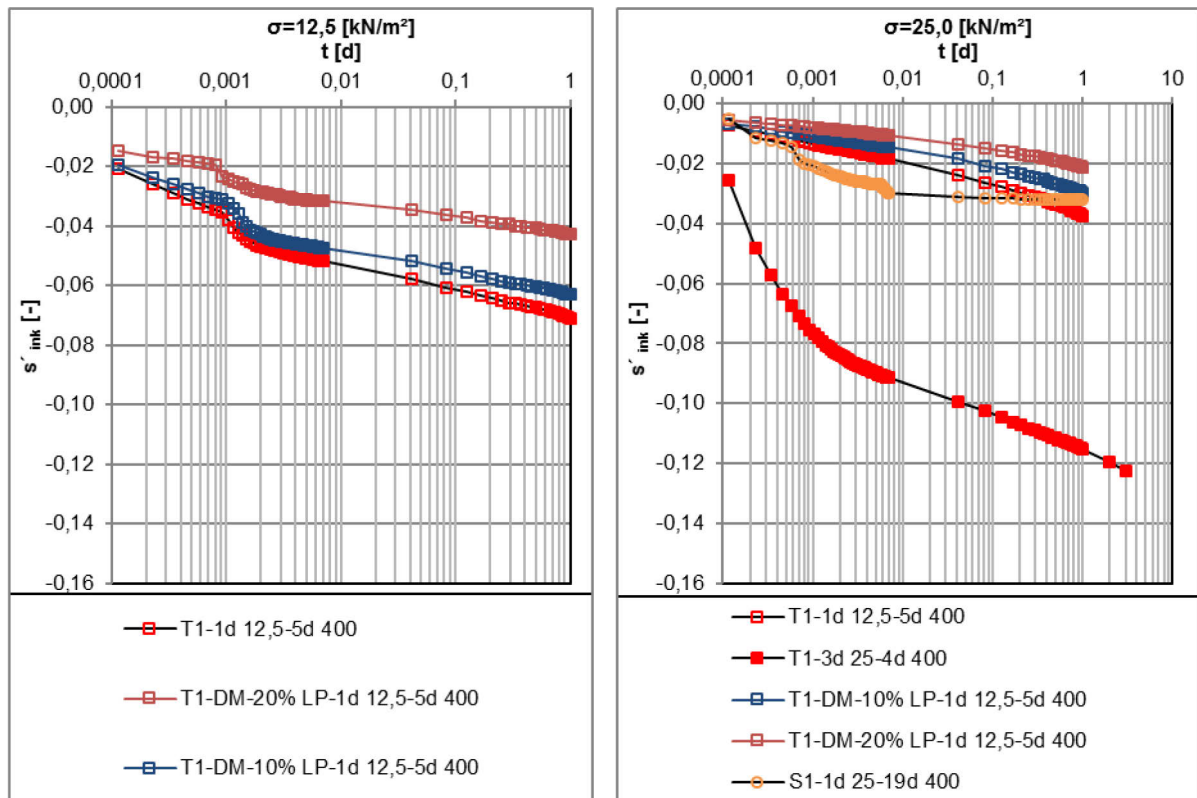


Abb. A. 16: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\log t\text{-}s'_{\text{ink}(12,5)}$ , r.:  $\log t\text{-}s'_{\text{ink}(25,0)}$ .



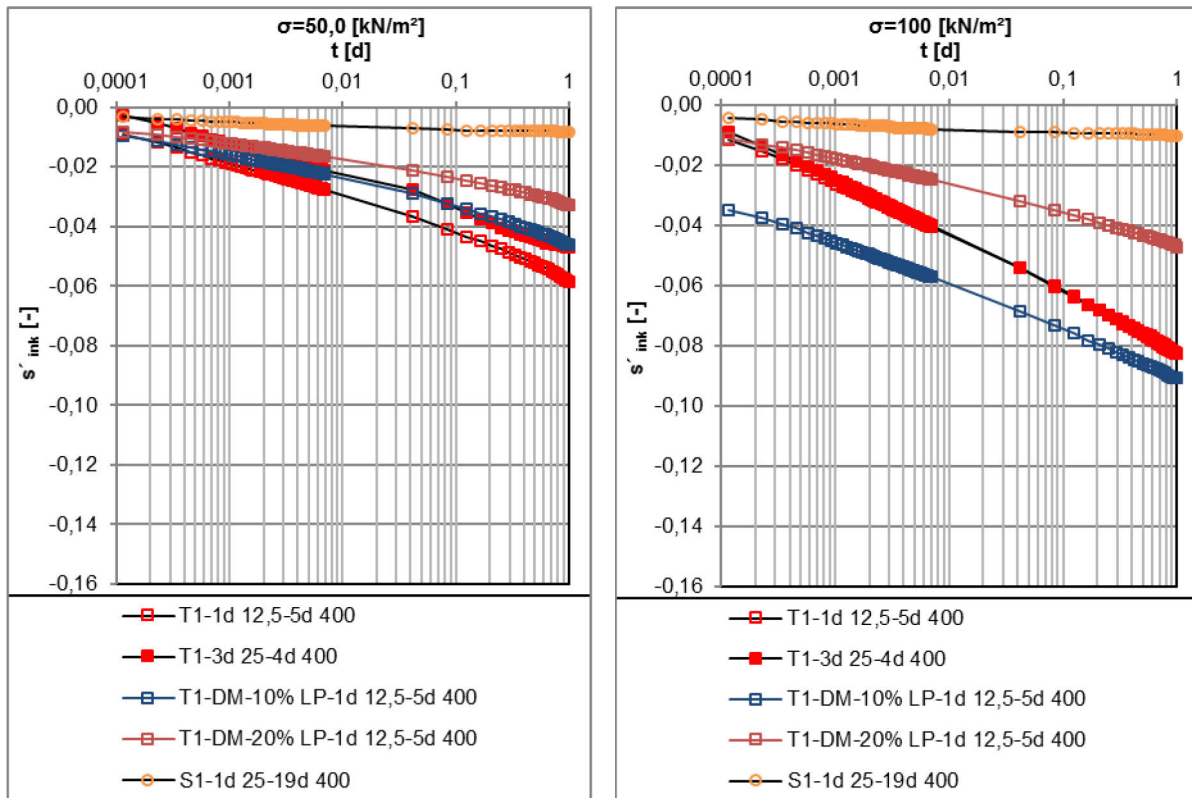


Abb. A. 17: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(100)}$ .

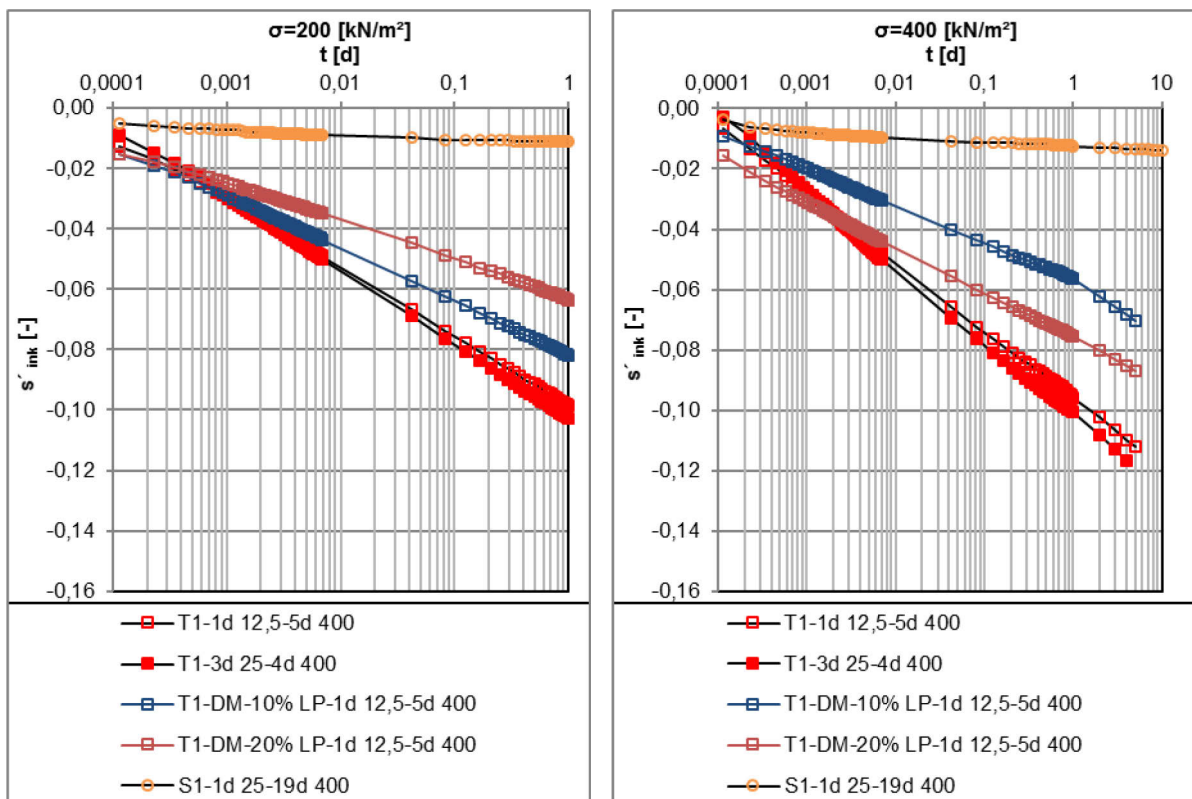


Abb. A. 18: T1-DM-LP-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(400)}$ .

## A. 9.4 T1-DM-B500-Versuchsreihen

### A. 9.4.1 log t-s<sub>ges</sub>-Linien

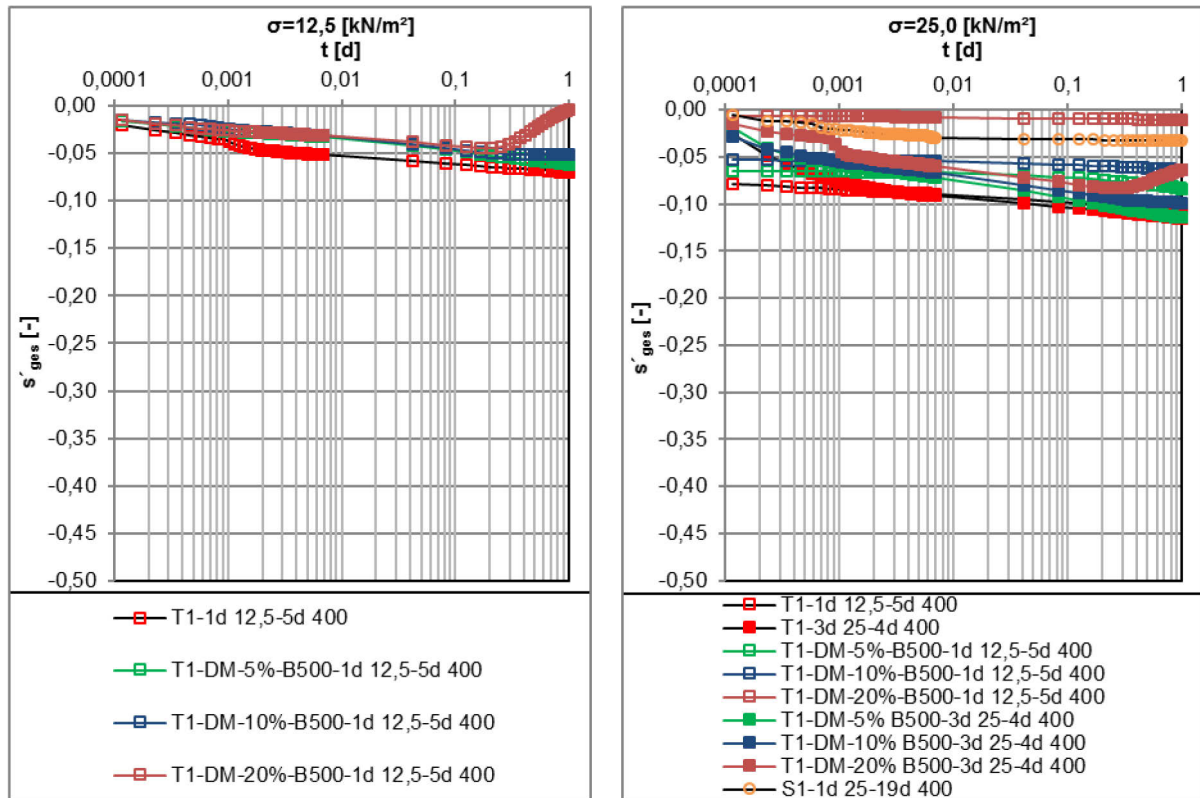


Abb. A. 19: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>(12,5), r.: log t-s<sub>ges</sub>(25,0).

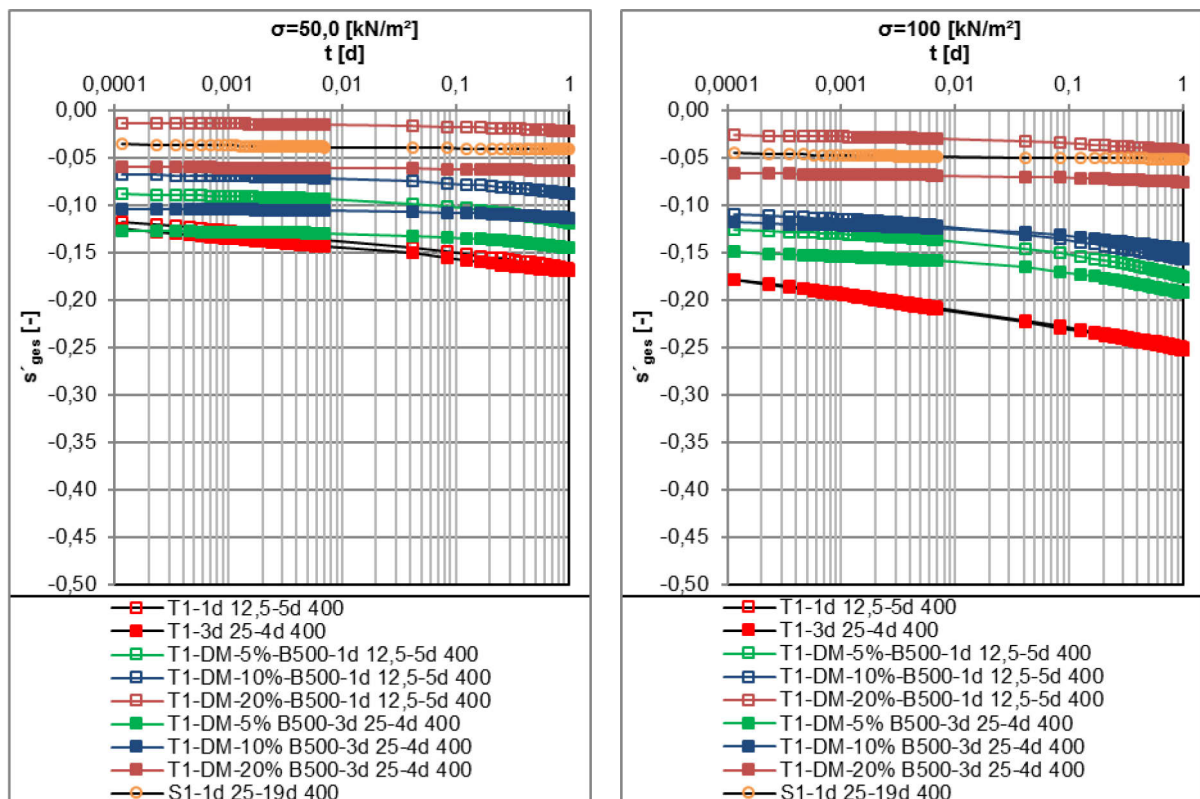


Abb. A. 20: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>(50,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>(100).

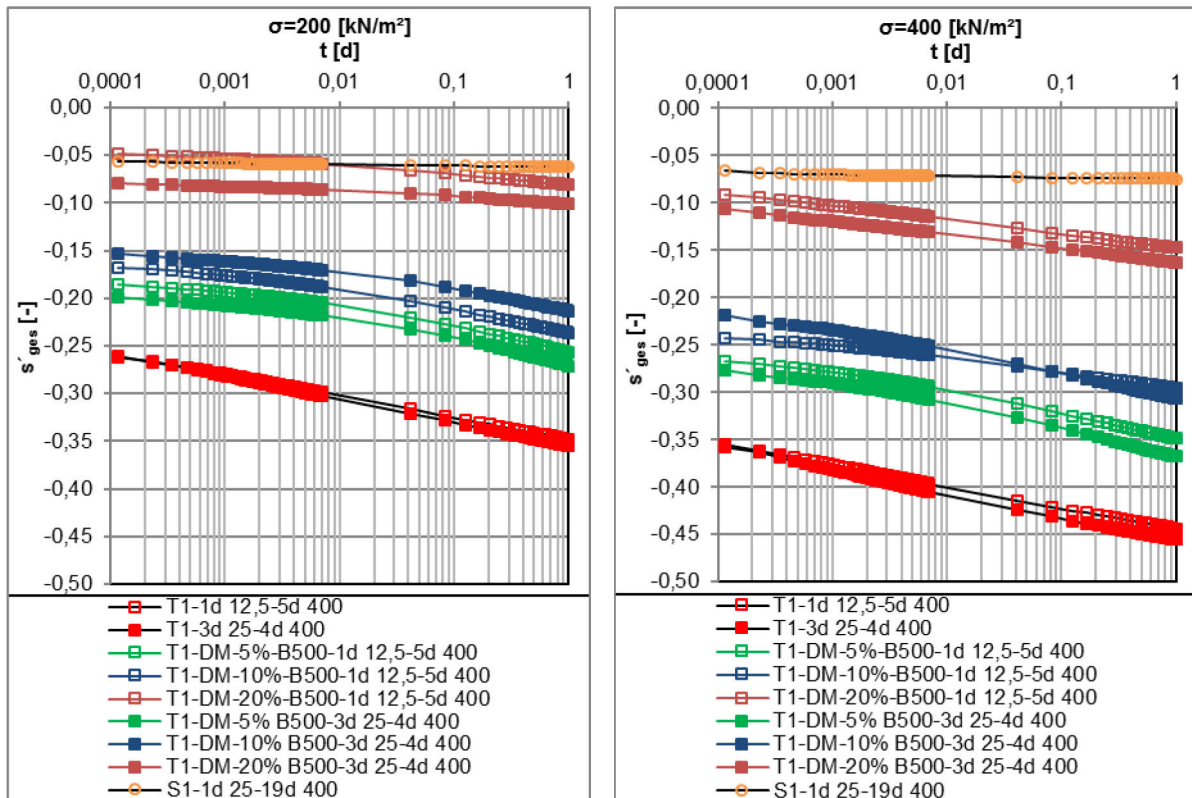


Abb. A. 21: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

#### A. 9.4.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

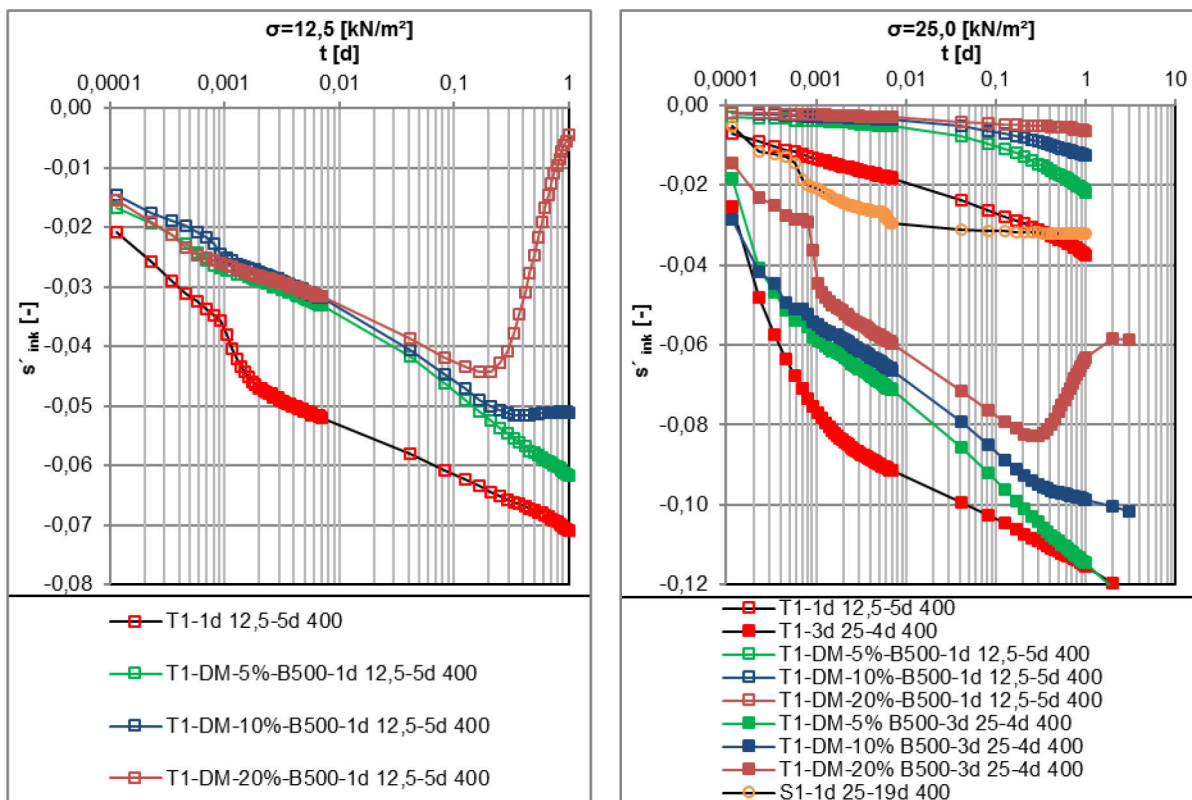


Abb. A. 22: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .



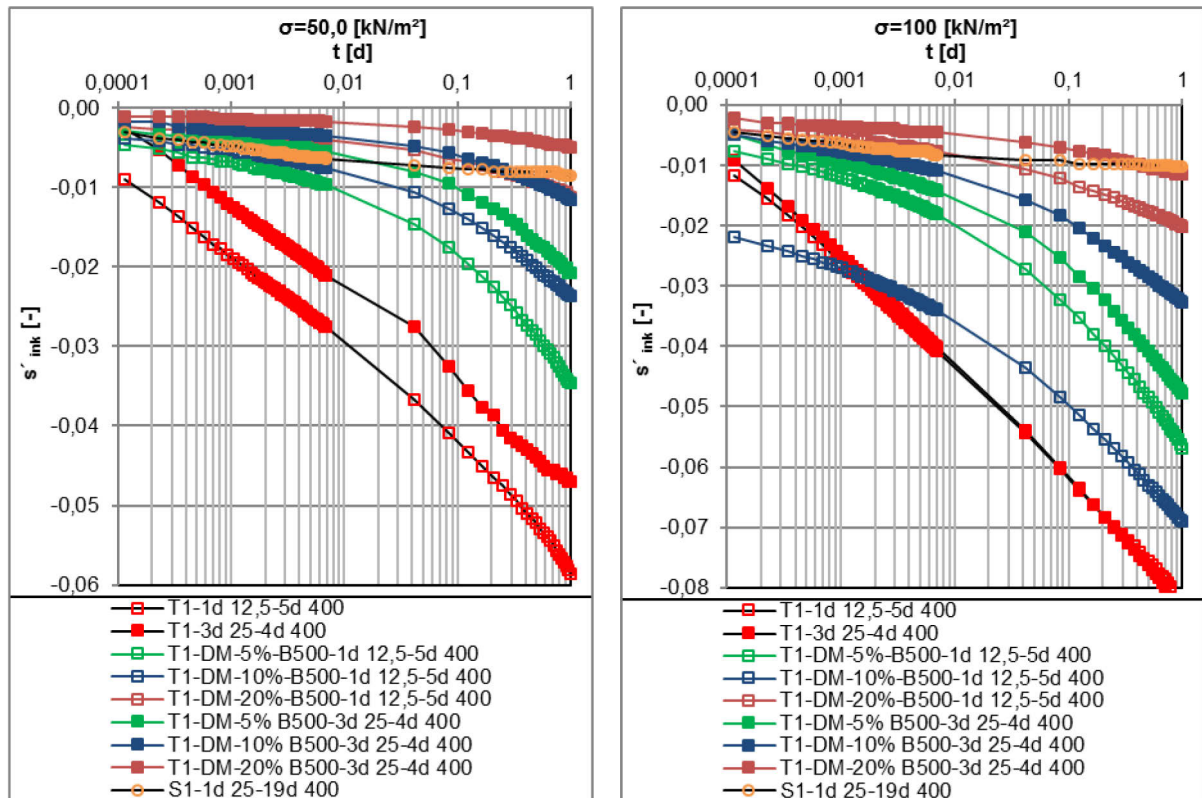


Abb. A. 23: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(100)}$ .

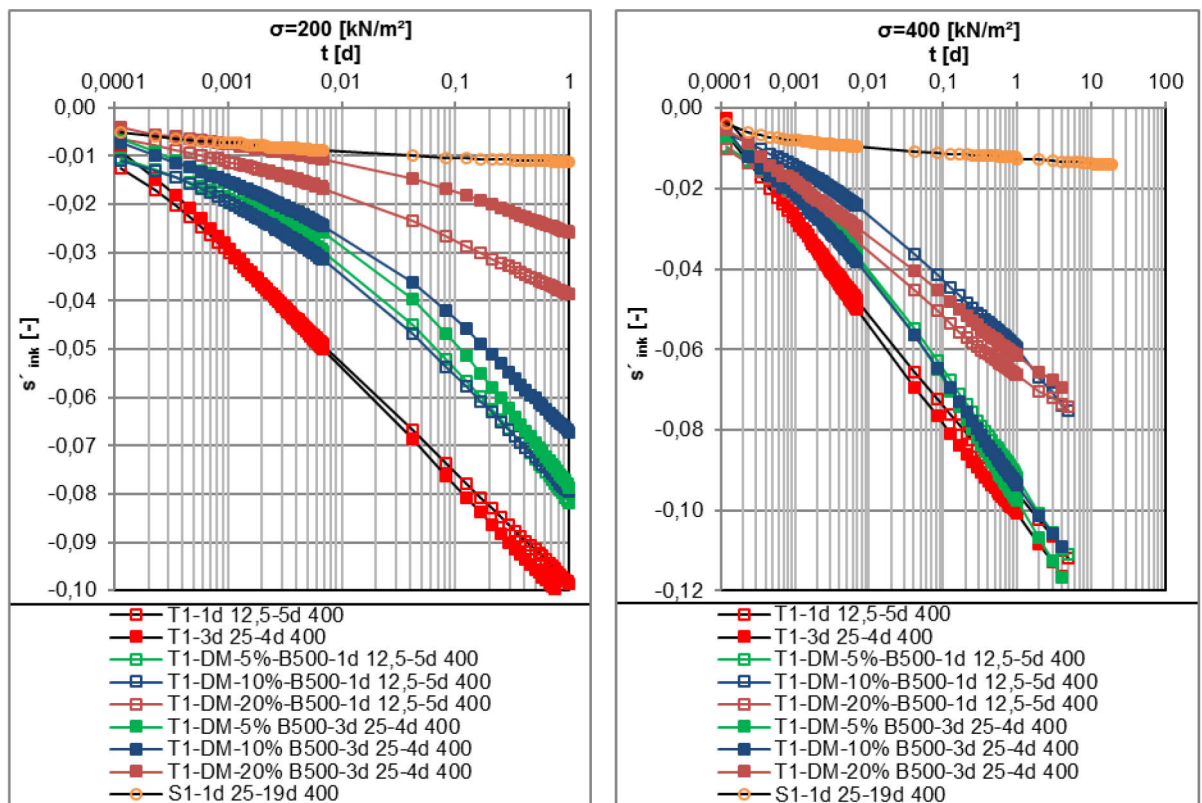


Abb. A. 24: T1-DM-B500-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(400)}$ .

### A. 9.5 T1-DM-B300-Versuchsreihen

#### A. 9.5.1 log t-s'ges-Linien

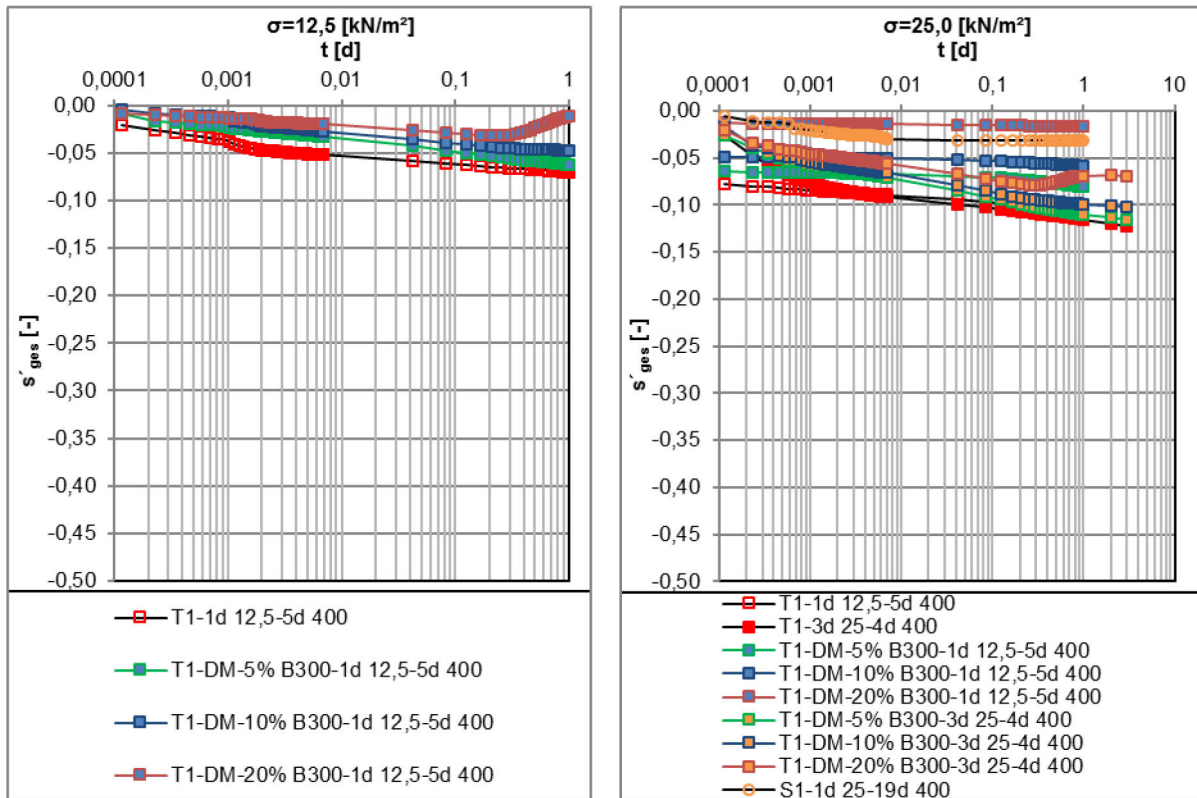


Abb. A. 25: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: log t-s'ges(12,5), r.: log t-s'ges(25,0).

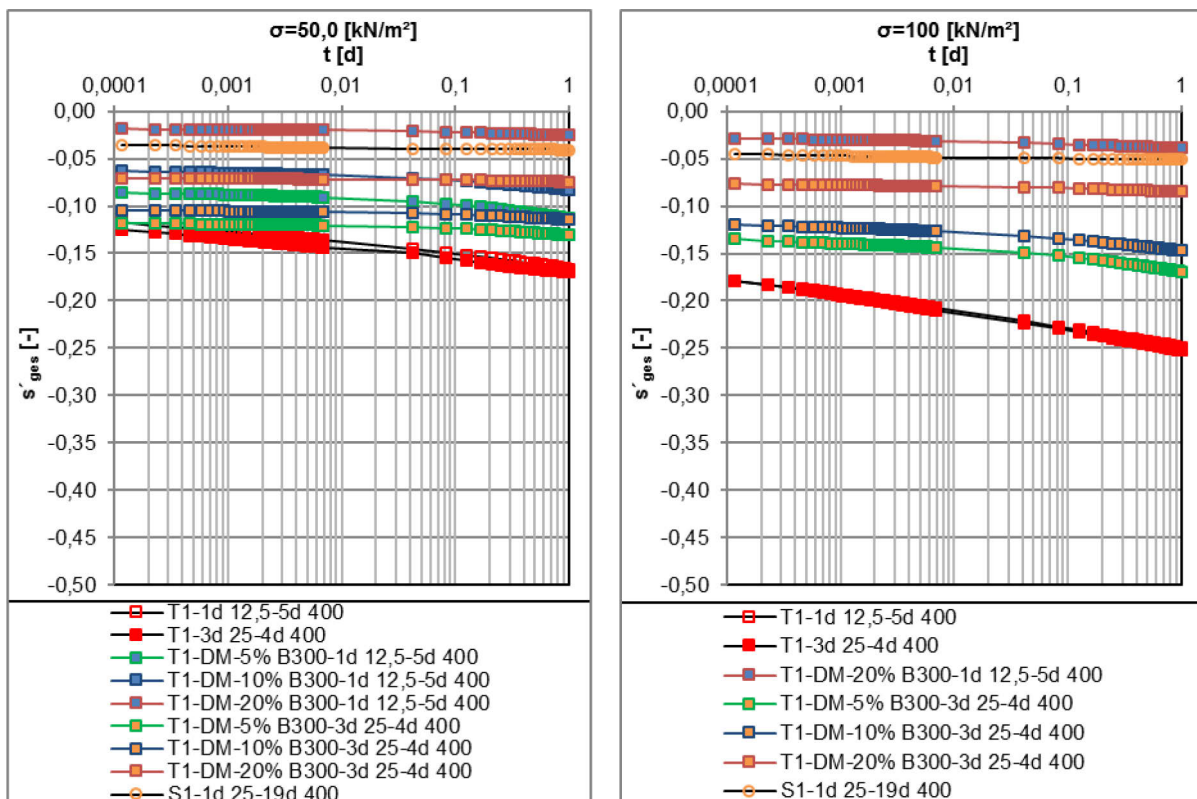


Abb. A. 26: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.: log t-s'ges(50,0), r.: log t-s'ges(100).

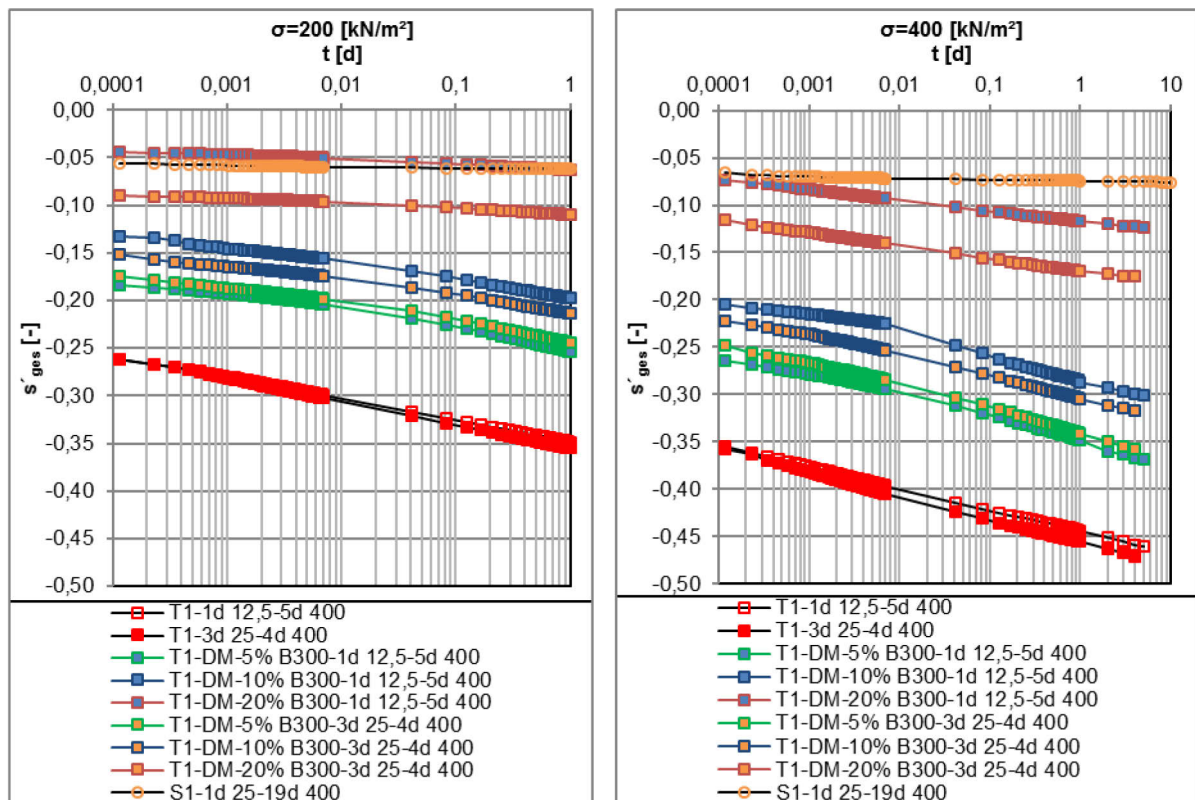


Abb. A. 27: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.5.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

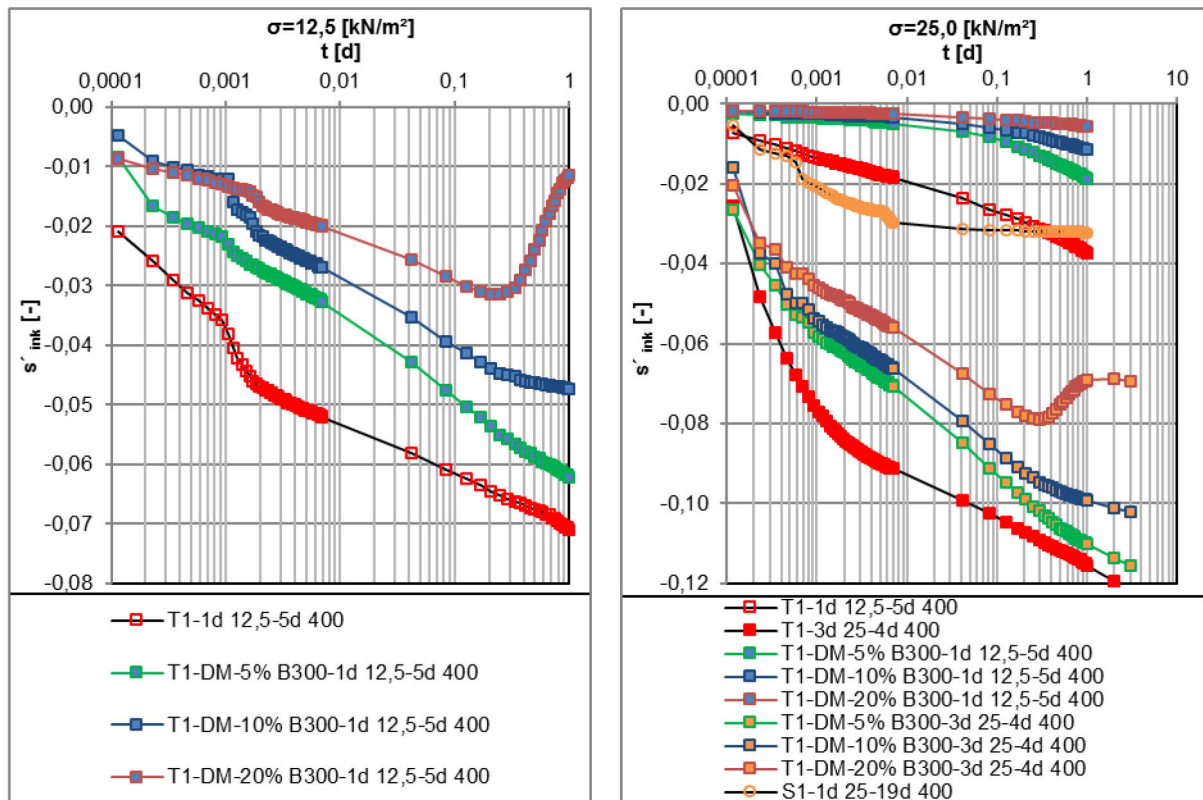


Abb. A. 28: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .



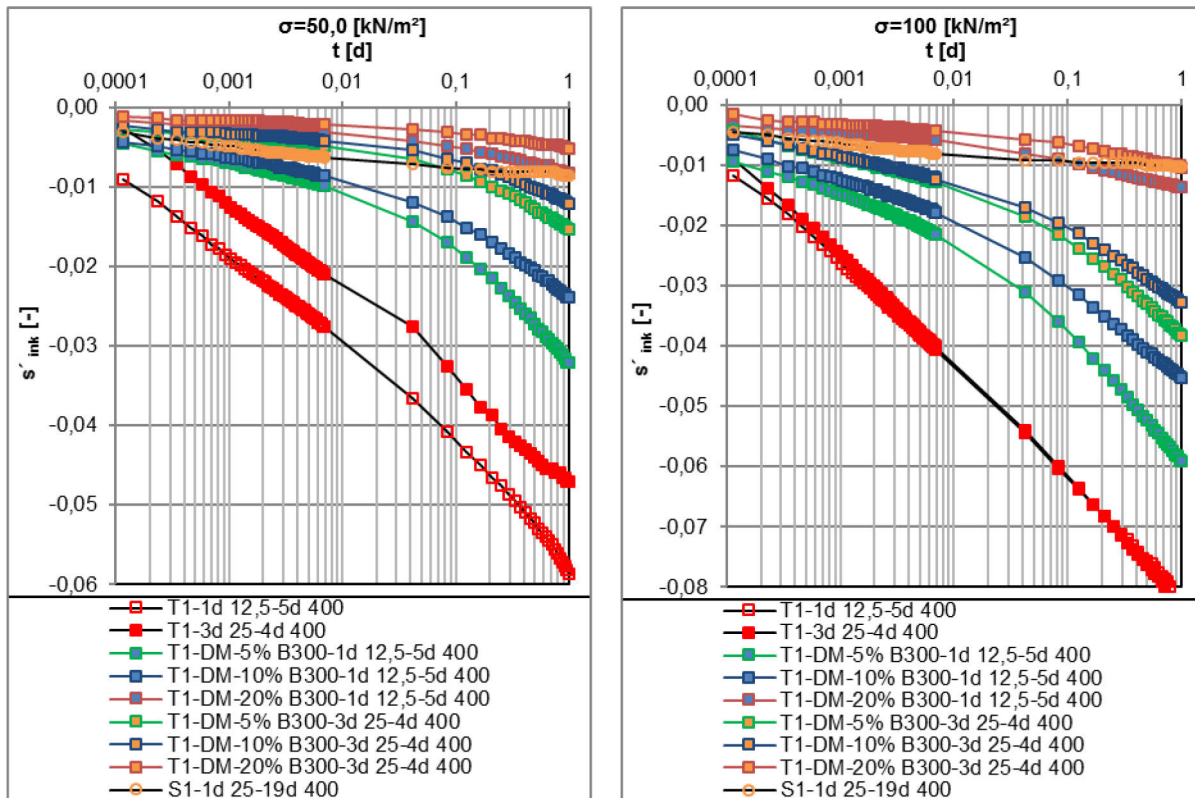


Abb. A. 29: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(100)}$ .

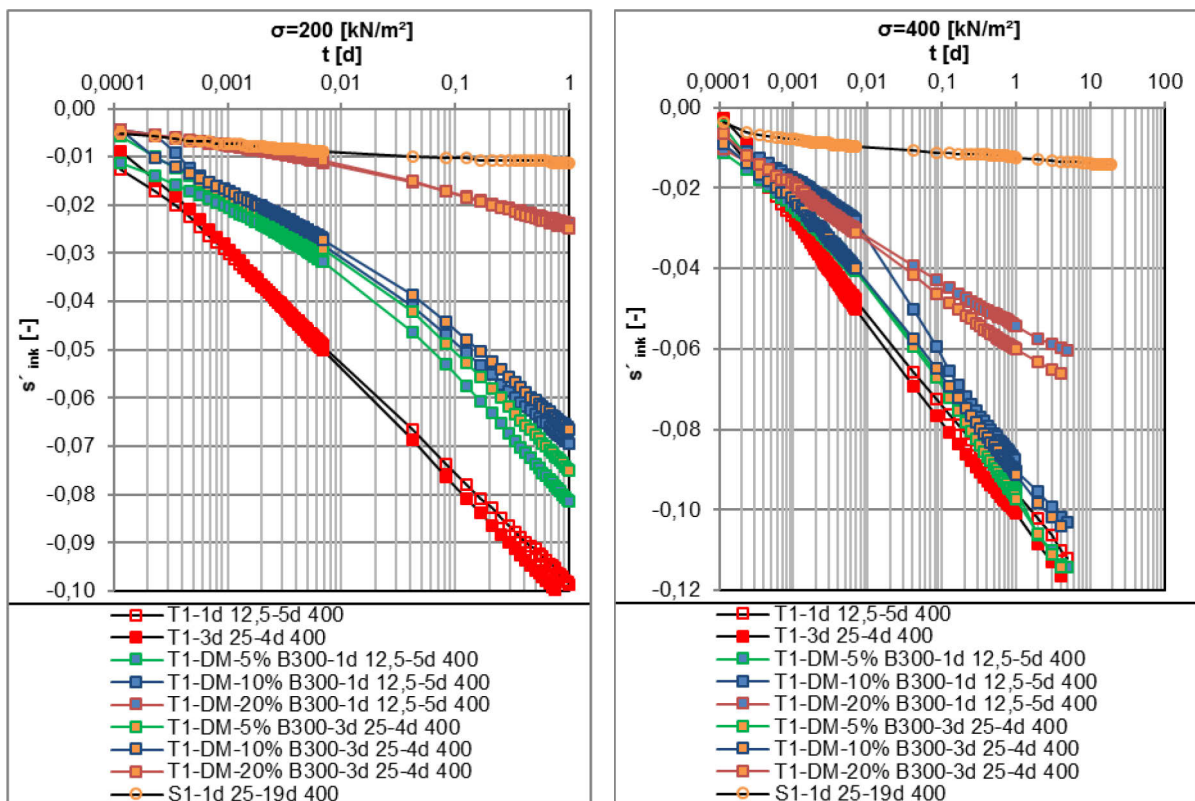


Abb. A. 30: T1-DM-B300-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(400)}$ .

## A. 9.6 T1-DM-BK-Versuchreihen

### A. 9.6.1 log t-s<sub>ges</sub>'-Linien

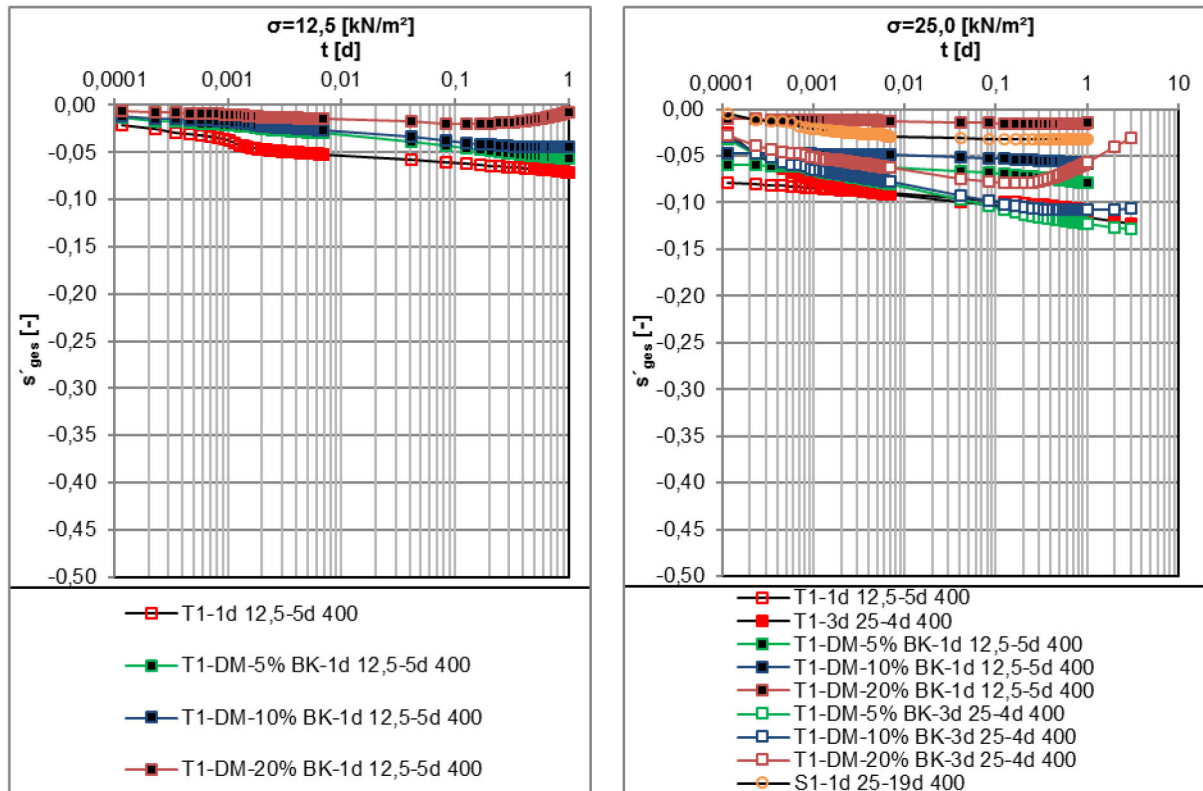


Abb. A. 31: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(12,5), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(25,0).

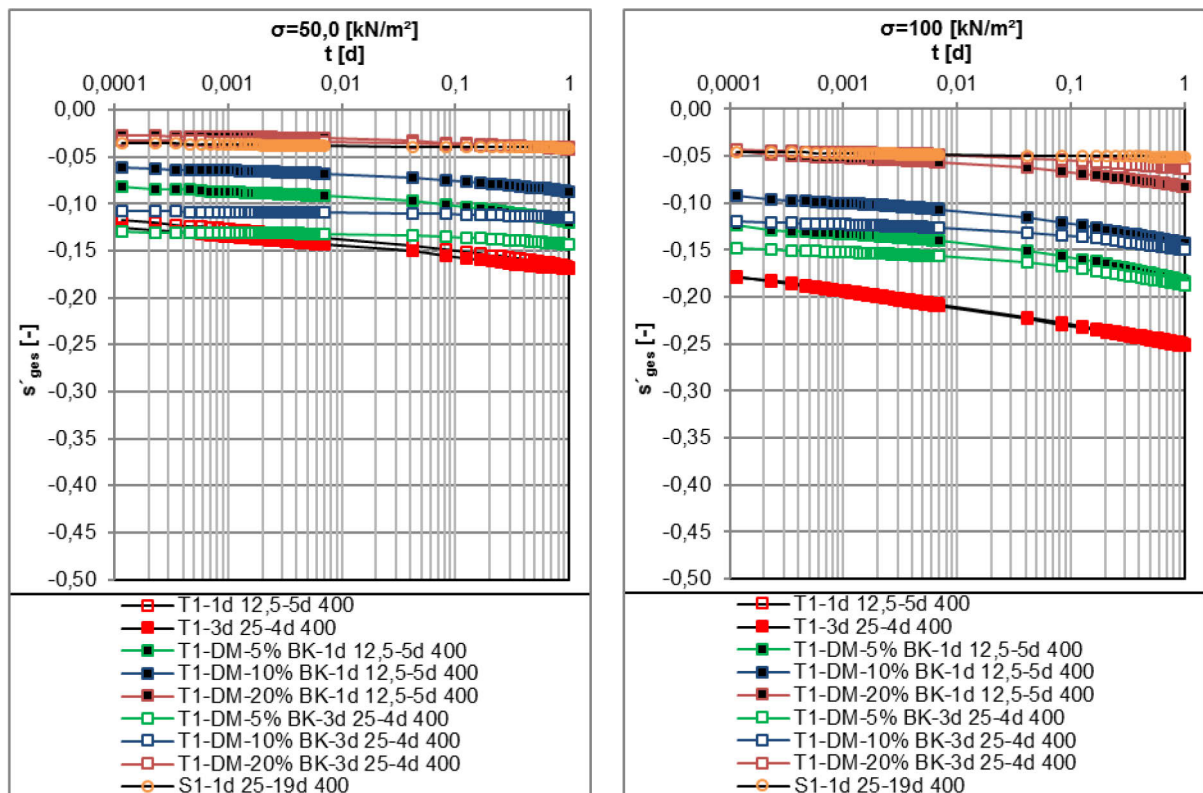


Abb. A. 32: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(50,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(100).

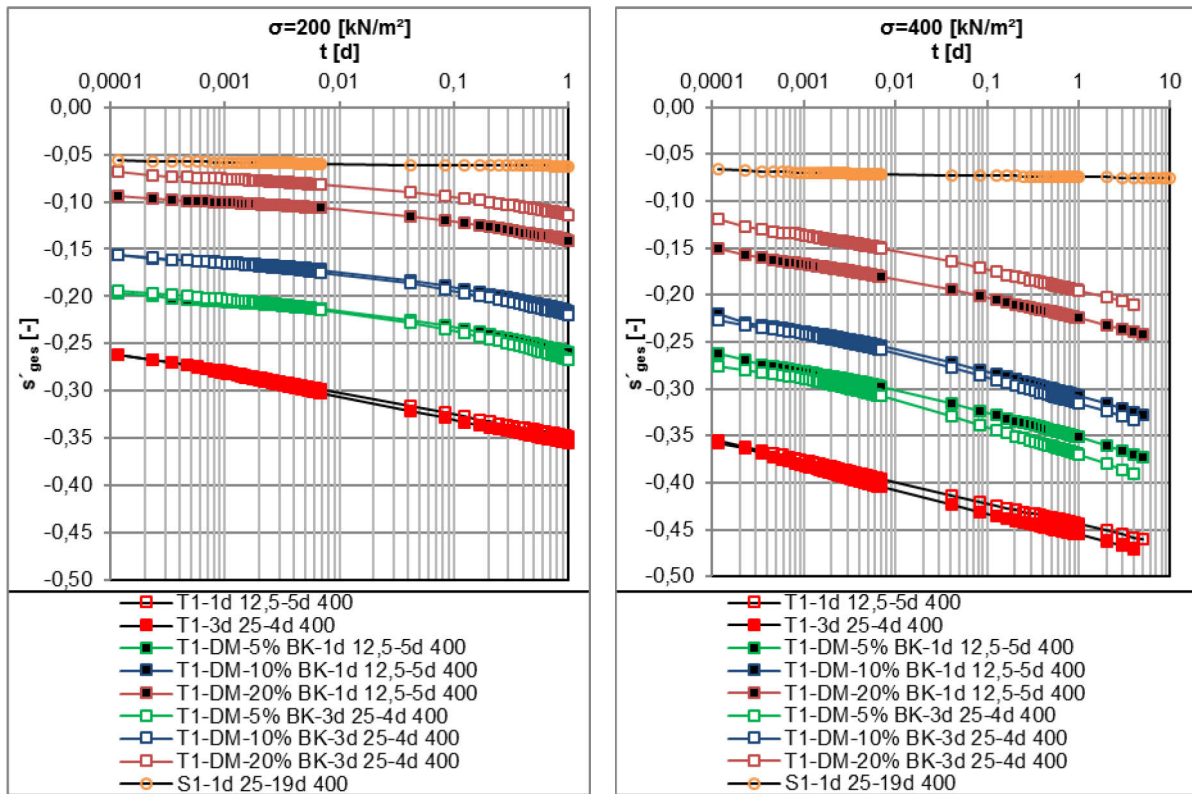


Abb. A. 33: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{\text{ges}(200)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{\text{ges}(400)}$ .

### A. 9.6.2 $\log t \cdot s'_{\text{ink}}$ -Linien

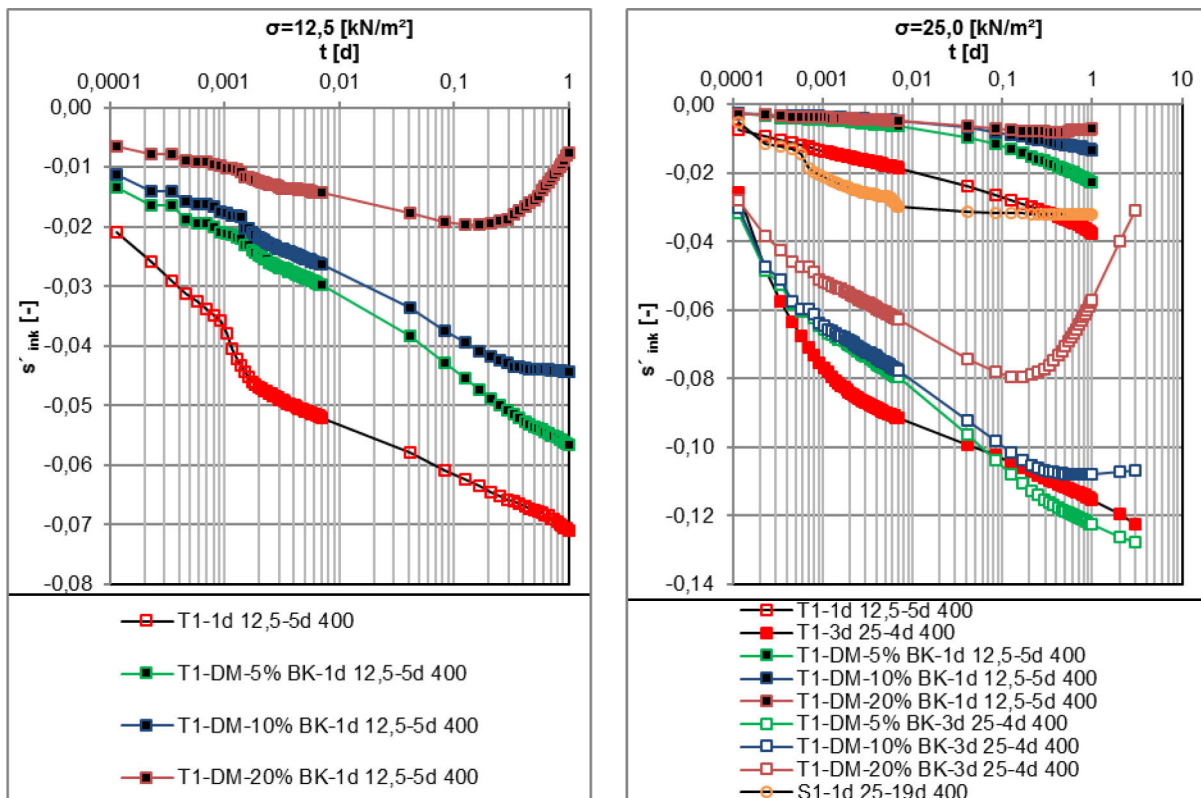


Abb. A. 34: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{\text{ink}(12,5)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{\text{ink}(25,0)}$ .



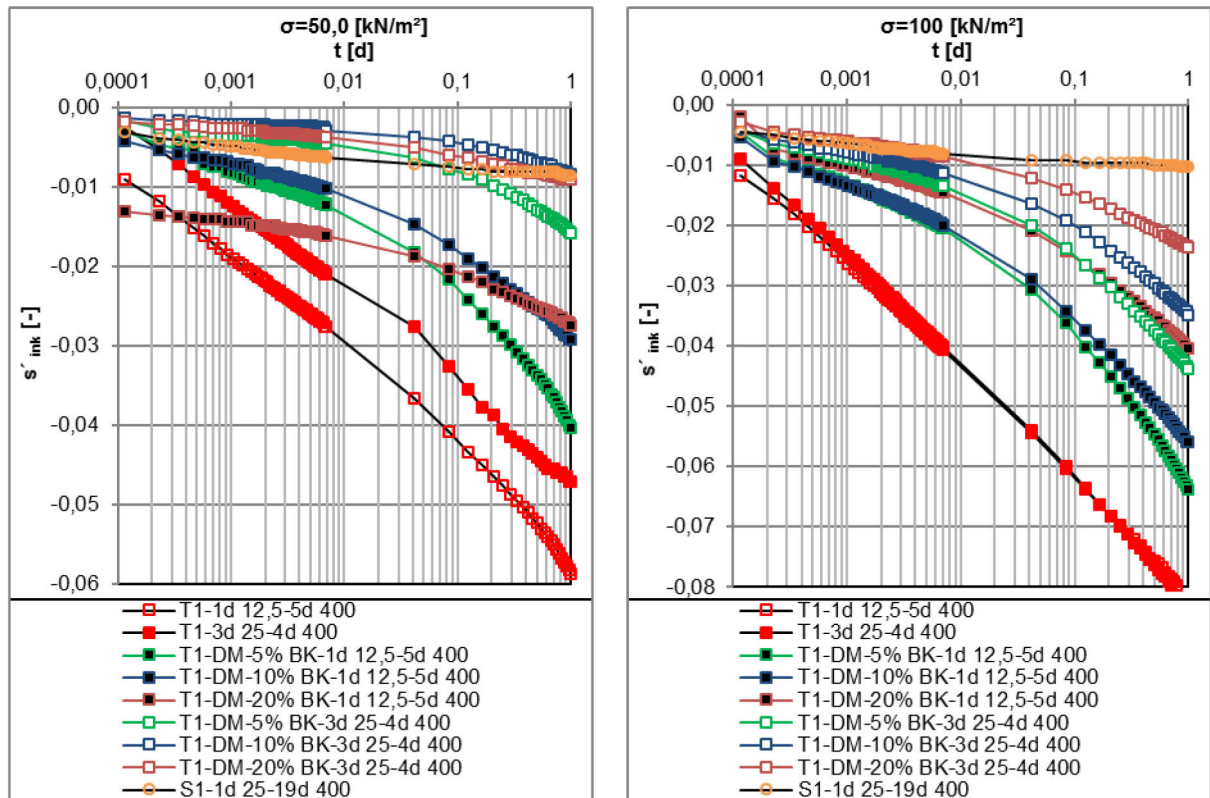


Abb. A. 35: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(100,0)}$ .

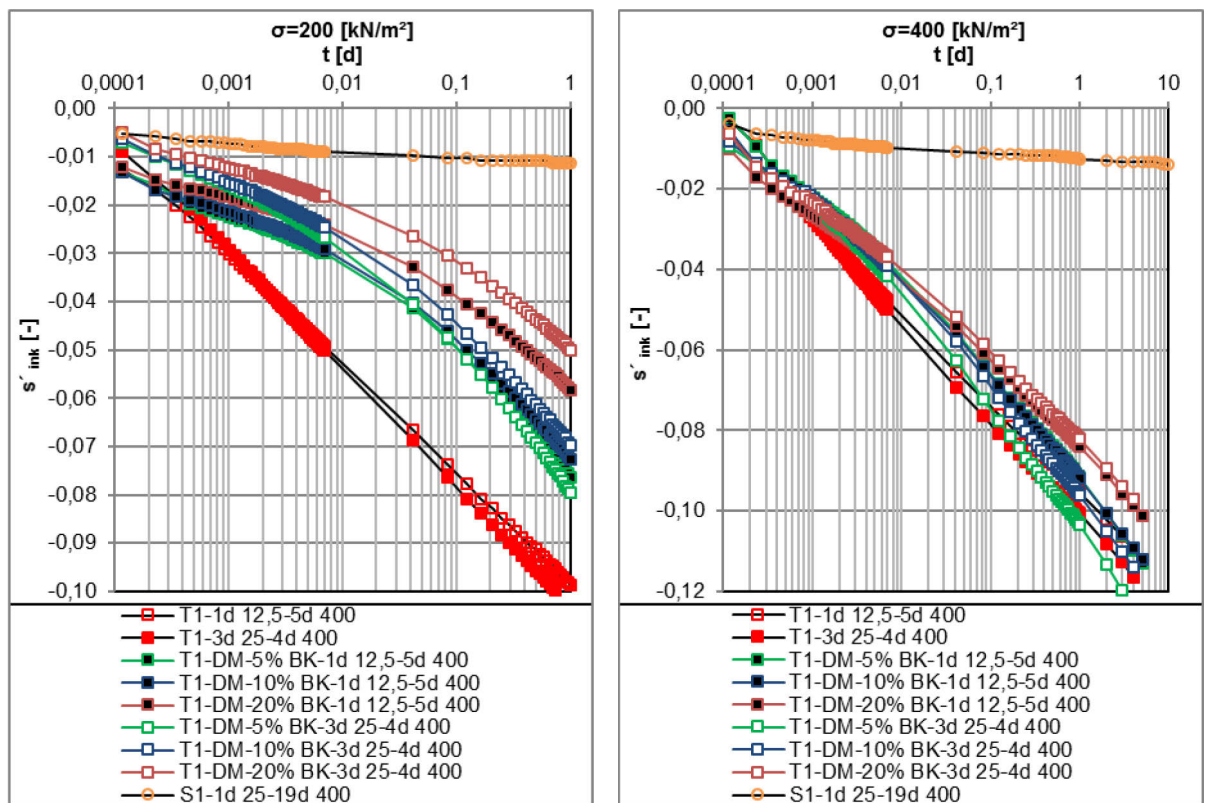
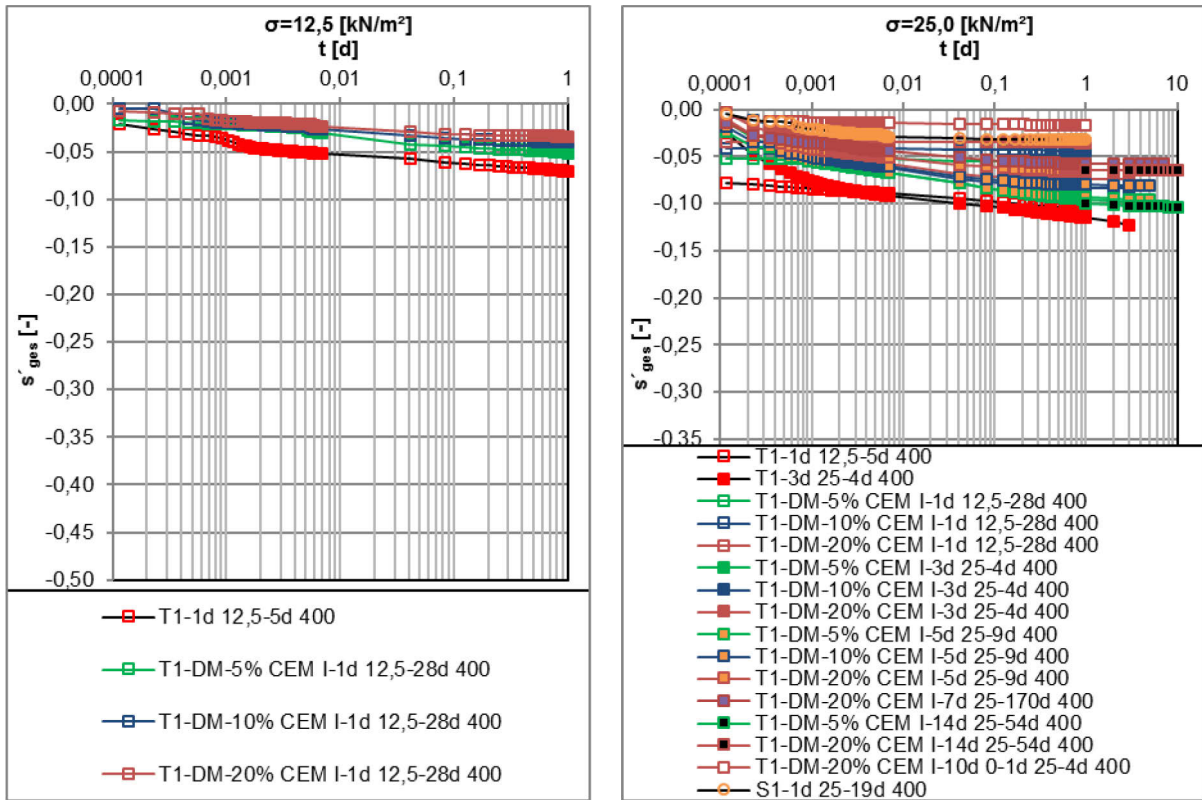


Abb. A. 36: T1-DM-BK-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(400)}$ .

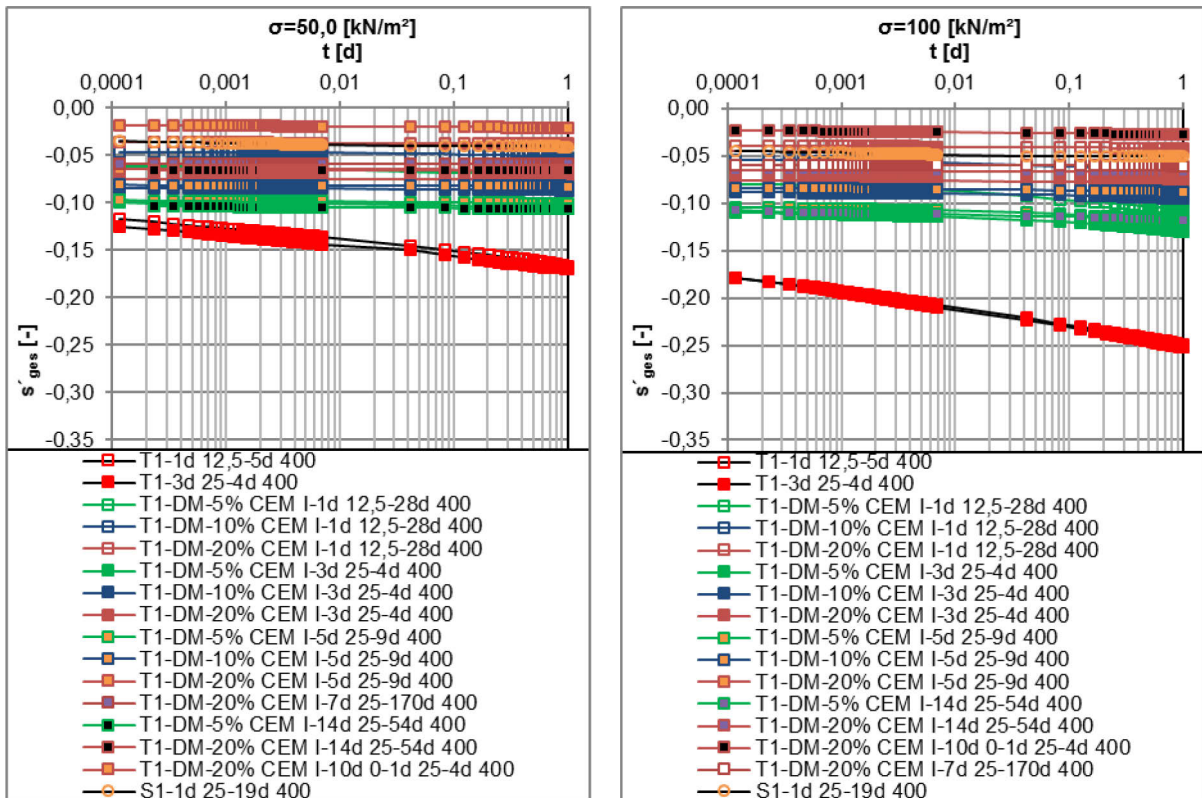
**A. 9.7 T1-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 9.7.1 T1-DM-CEM I-Versuchsreihen**

**A. 9.7.1.1 log t-s<sub>ges</sub>'-Linien**



**Abb. A. 37:** T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(12,5), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(25,0).



**Abb. A. 38:** T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(50,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(100).



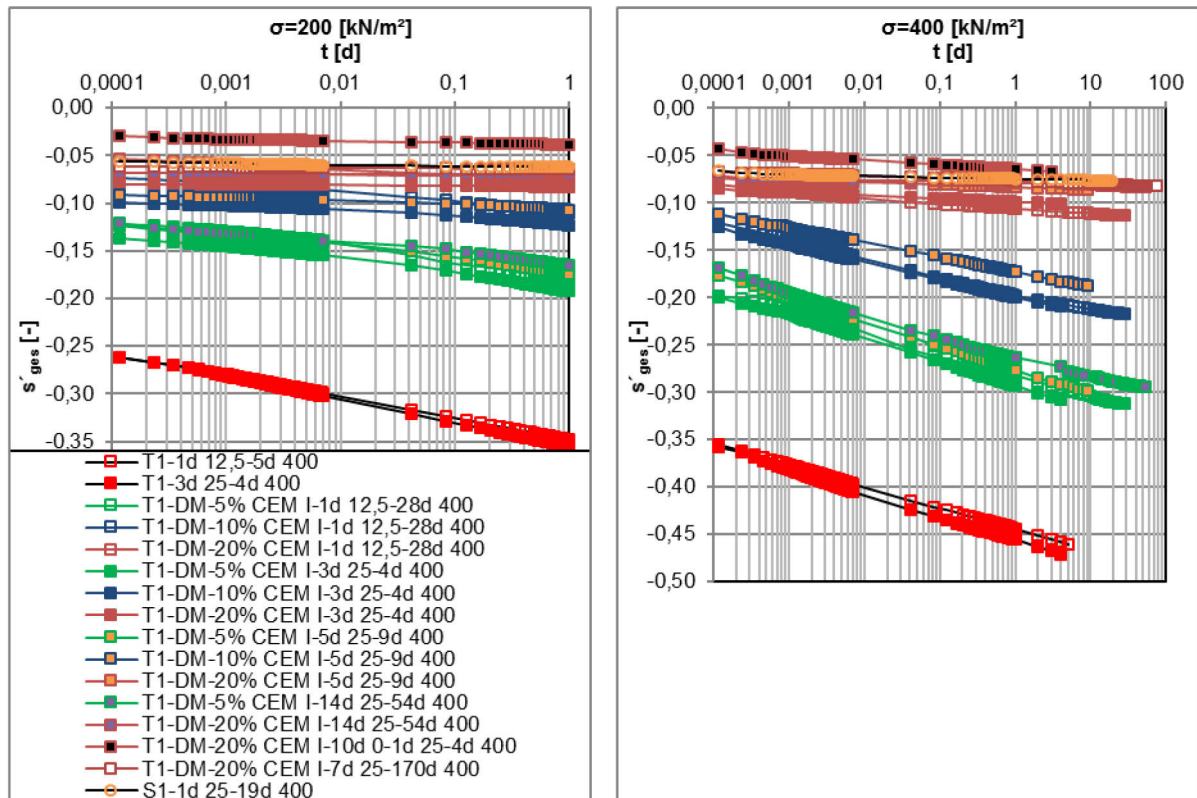


Abb. A. 39: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(200)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.7.1.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

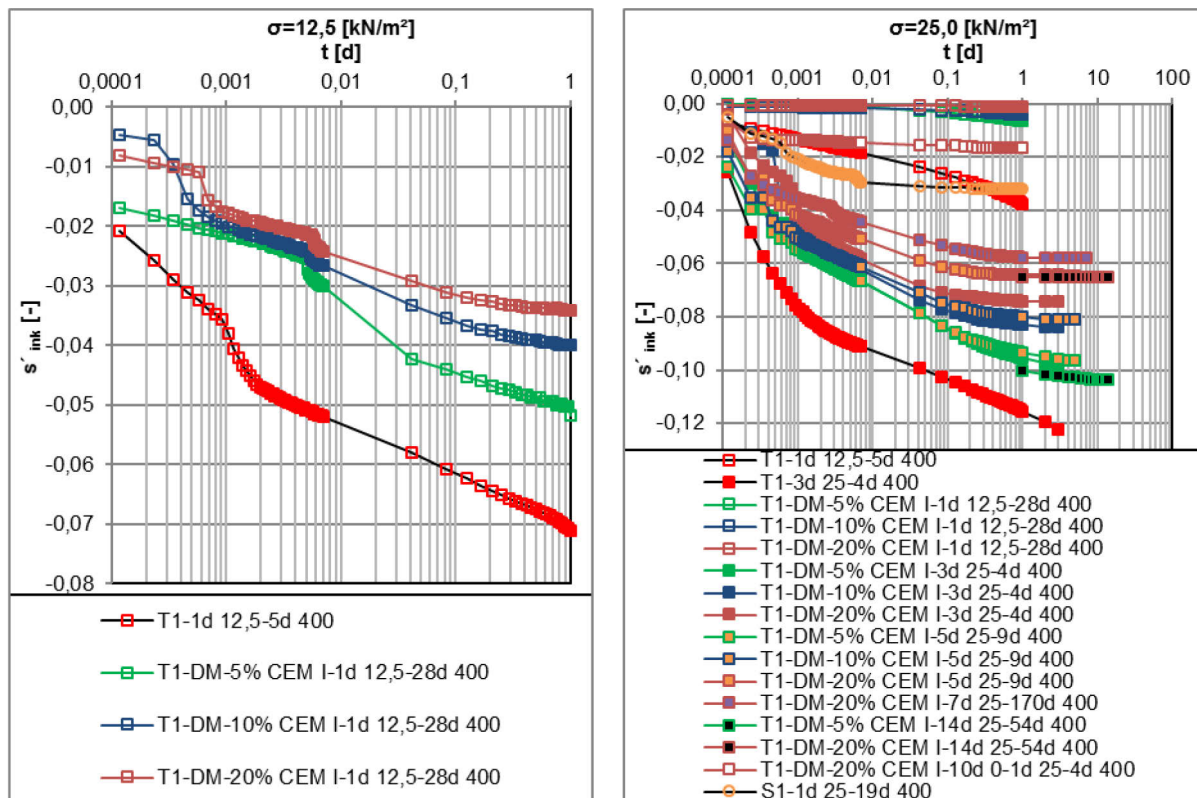


Abb. A. 40: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(12,5)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ .

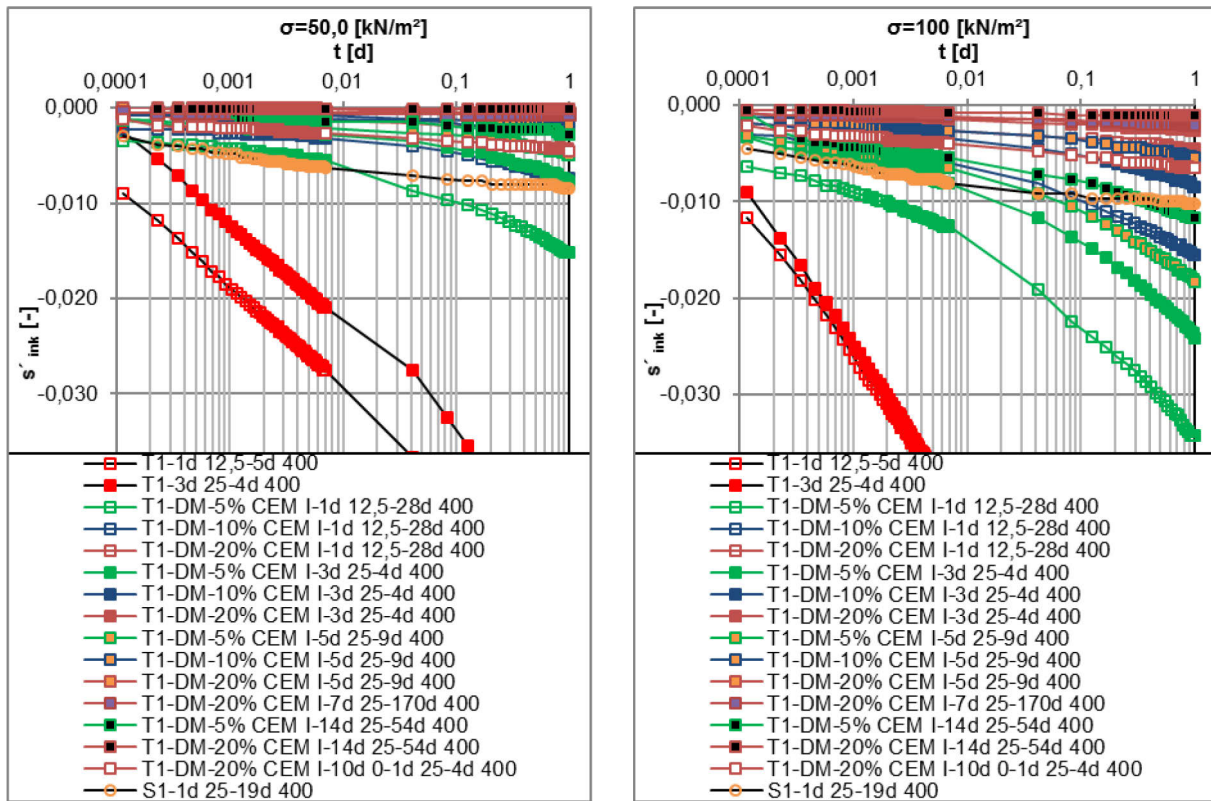


Abb. A. 41: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(50,0)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(100)}$ .

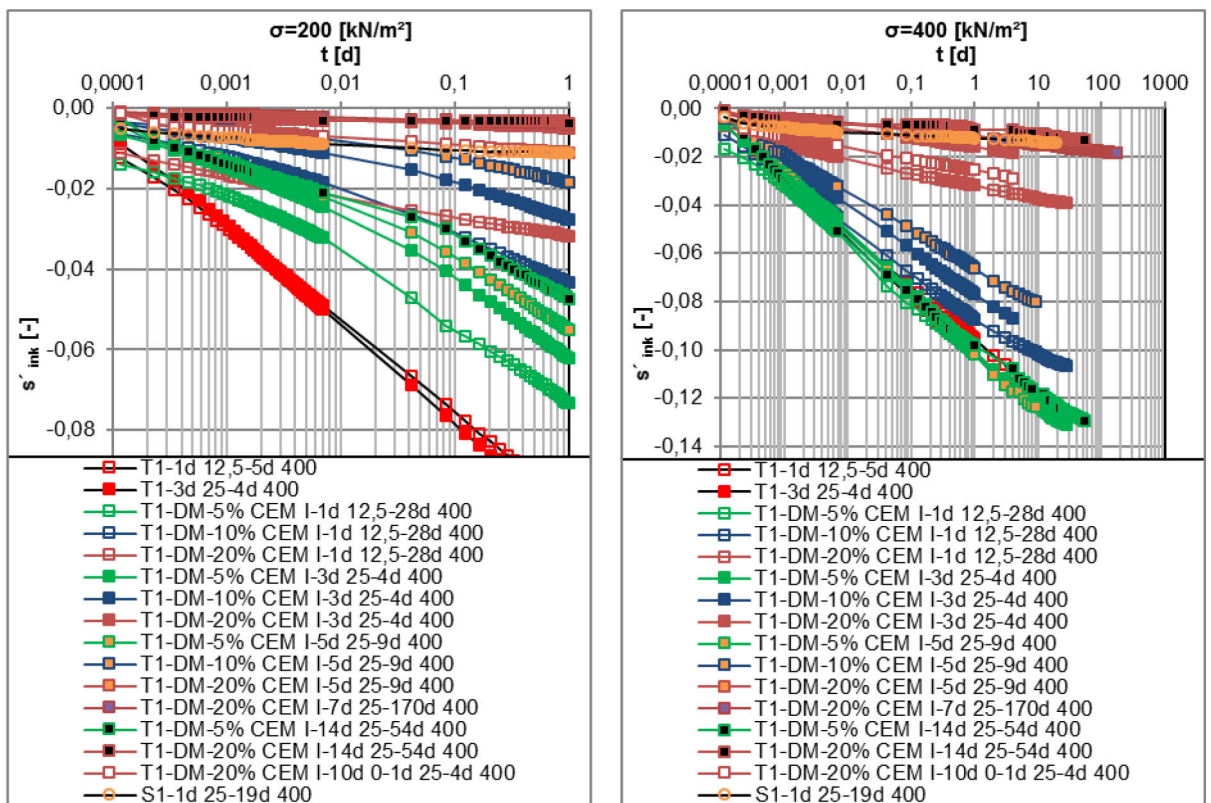


Abb. A. 42: T1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(200)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(400)}$ .

### A. 9.7.2 T1-WM-CEM I-Versuchsreihen

#### A. 9.7.2.1 $\log t-s'_{ges}$ -Linien

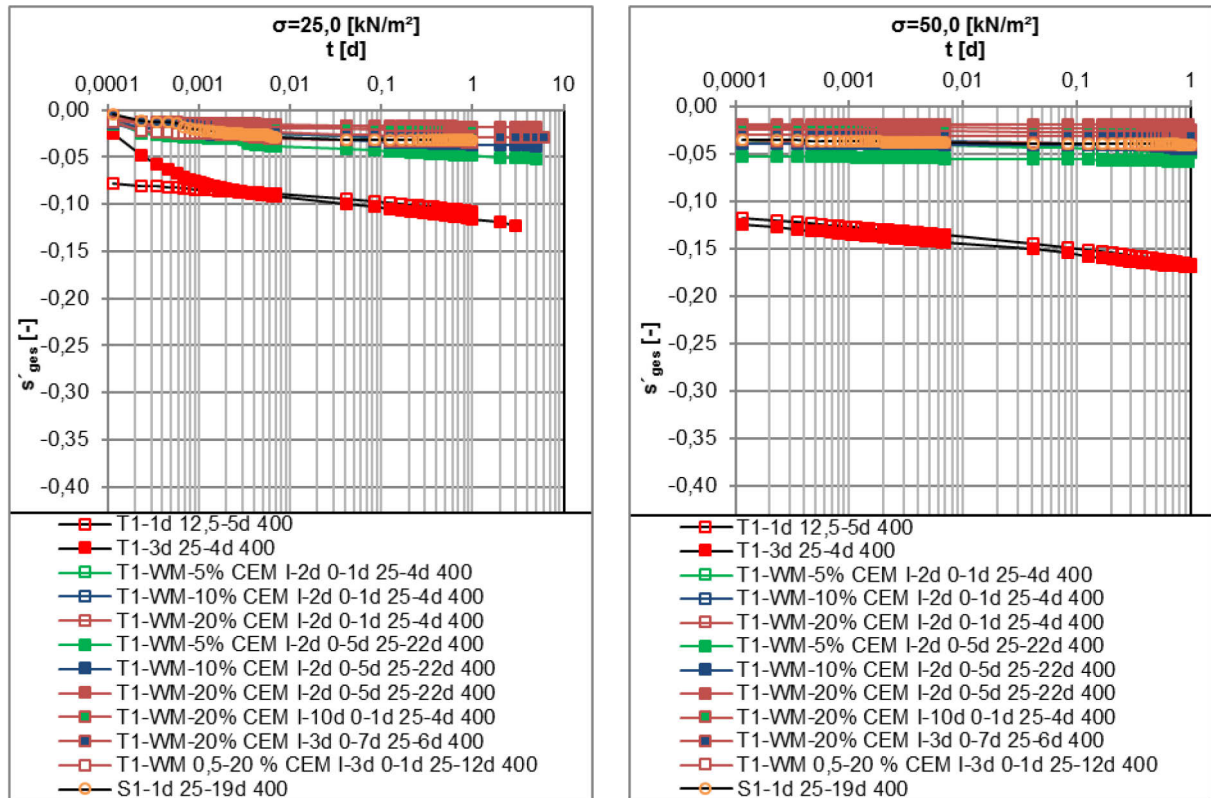


Abb. A. 43: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(25,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(50,0)}$ .

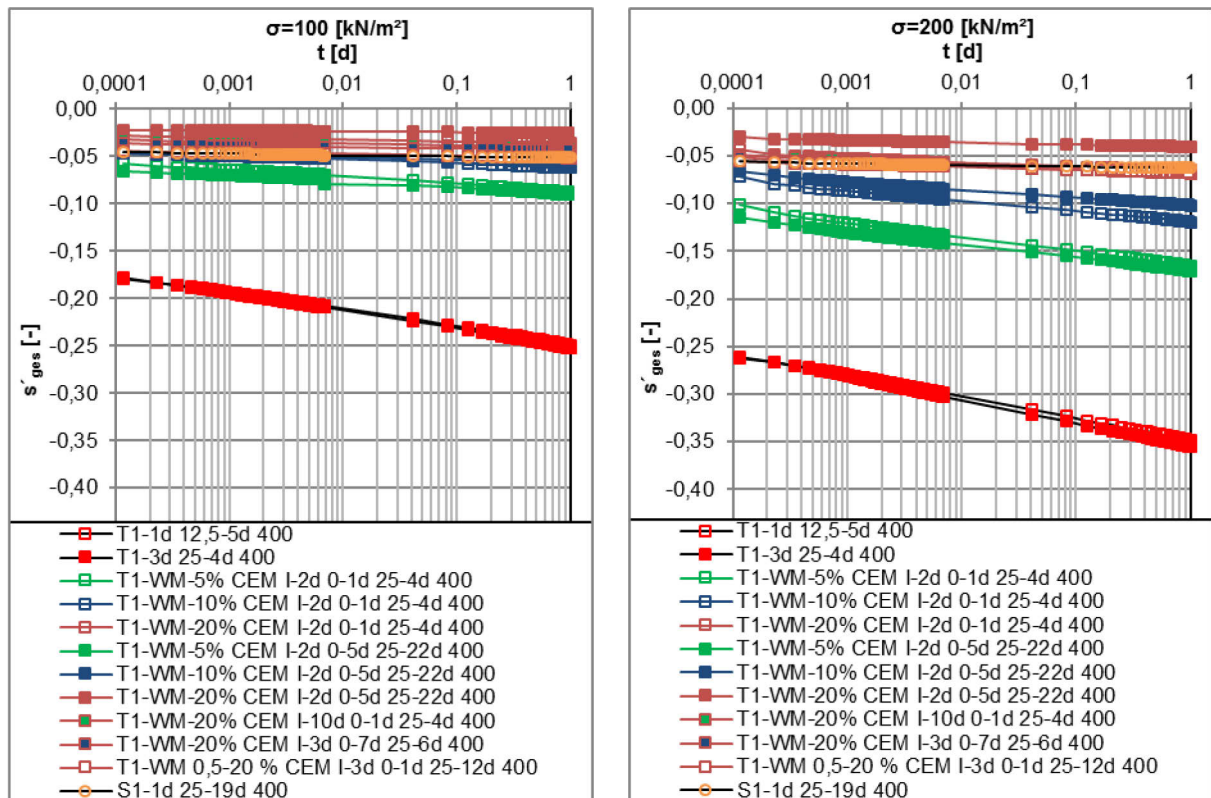


Abb. A. 44: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(100)}$ , r.:  $\log t-s'_{ges(200)}$ .



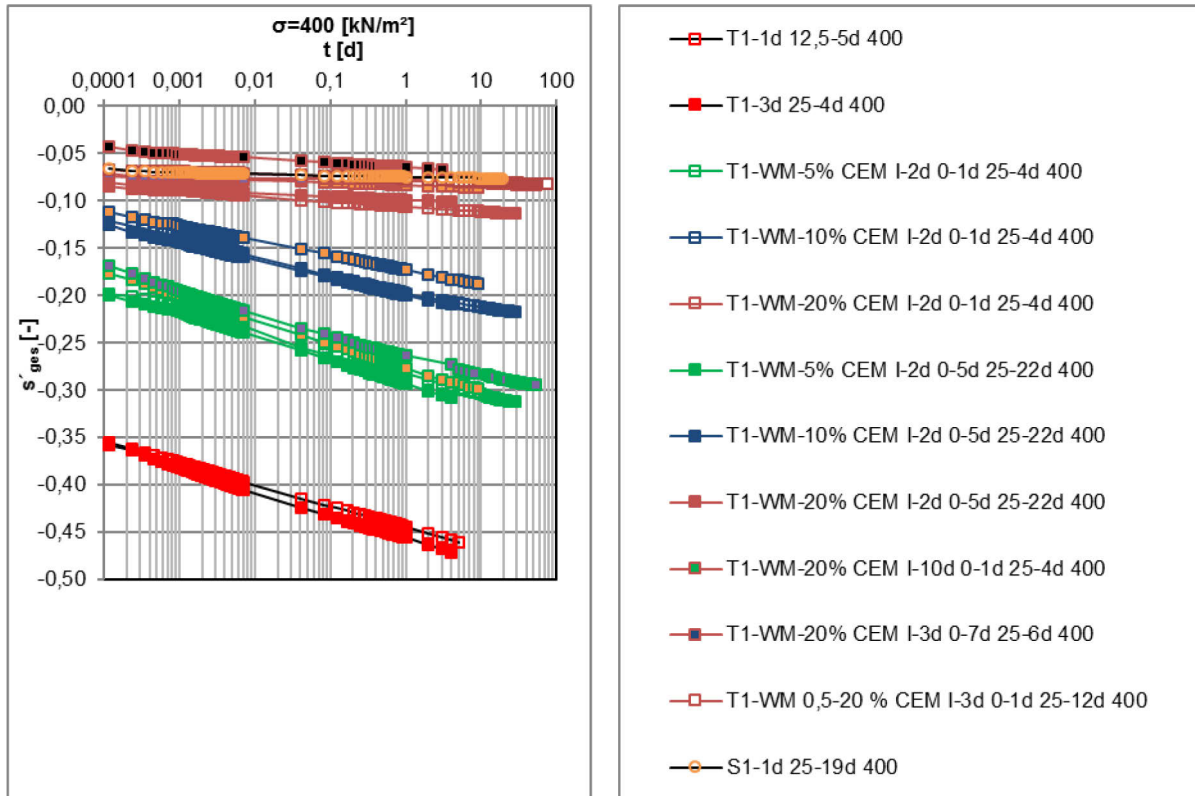


Abb. A. 45: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – log t-s'<sub>ges</sub>(400).

A. 9.7.2.2 log t-s'<sub>ink</sub>-Linien

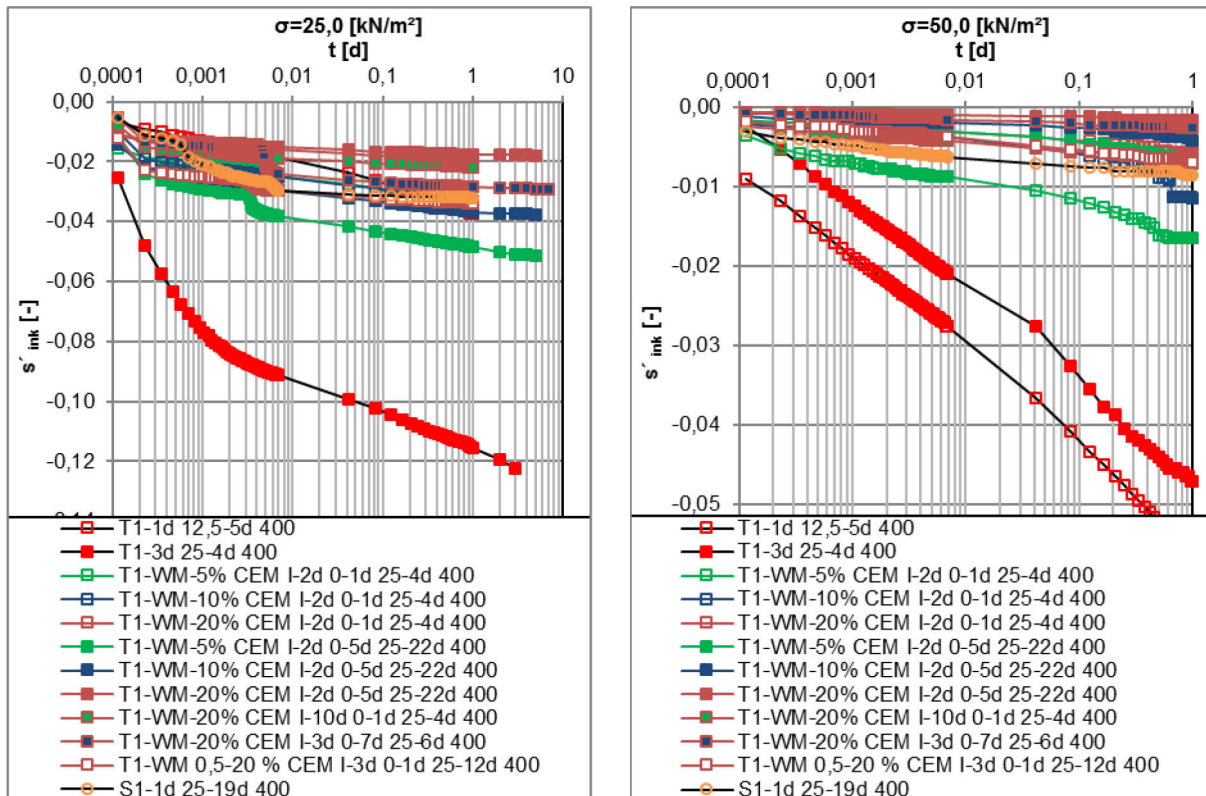


Abb. A. 46: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s'<sub>ink</sub>(25,0), r.: log t-s'<sub>ink</sub>(50,0).

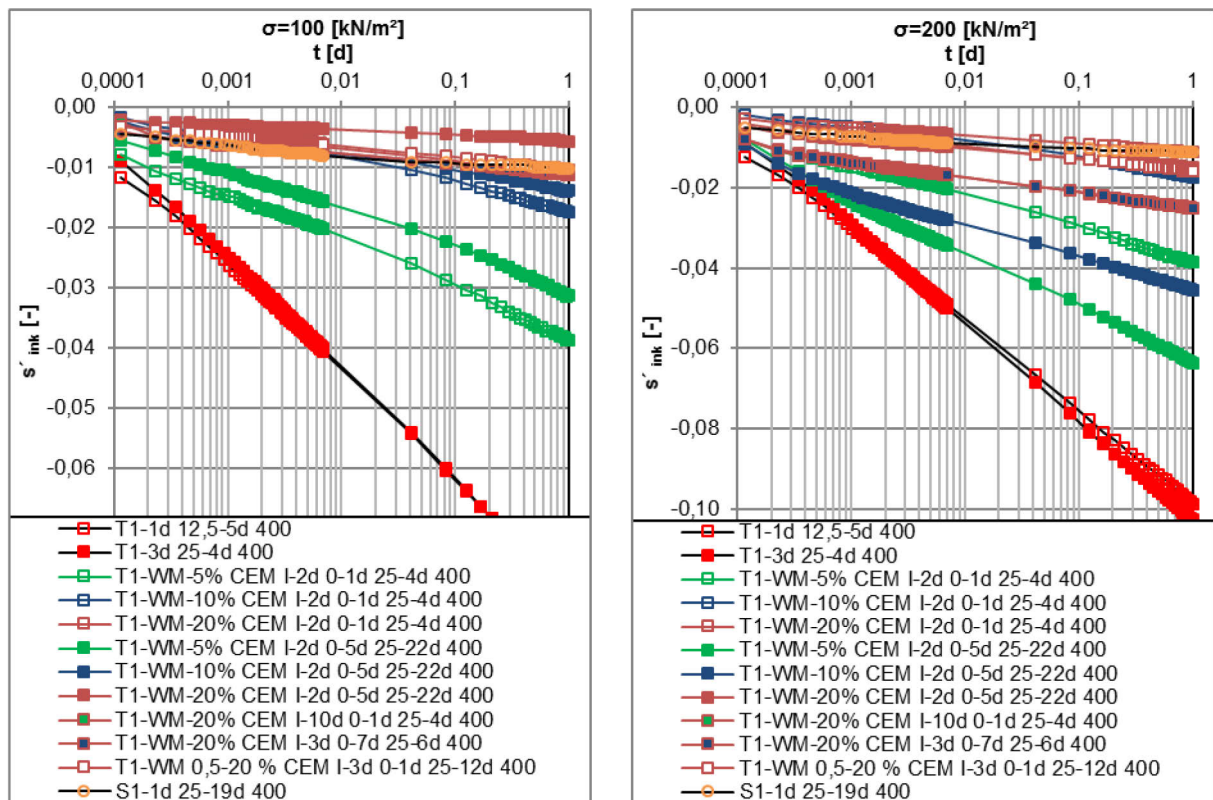


Abb. A. 47: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(100)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(200)}$ .

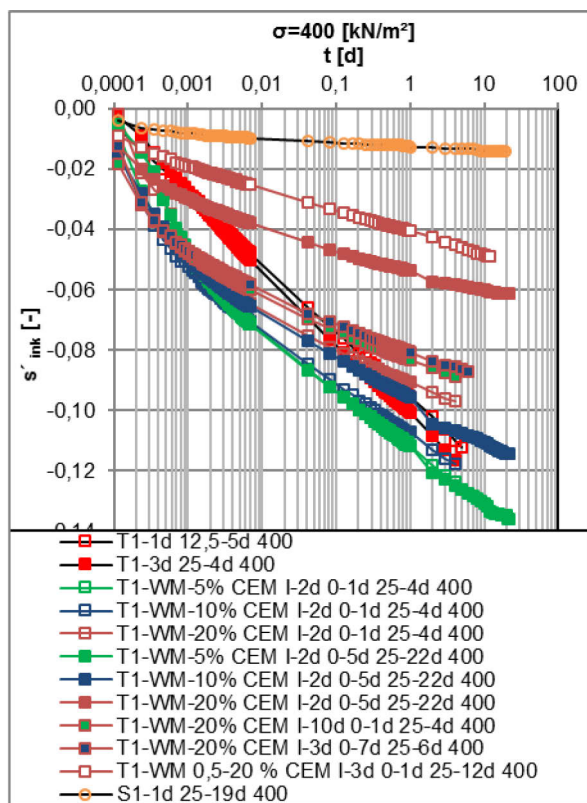


Abb. A. 48: T1-WM-CEM I-Versuchsreihen –  $\log t \cdot s'_{ink(400)}$ .

### A. 9.8 T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen

#### A. 9.8.1.1 log t-s<sub>ges</sub>-Linien

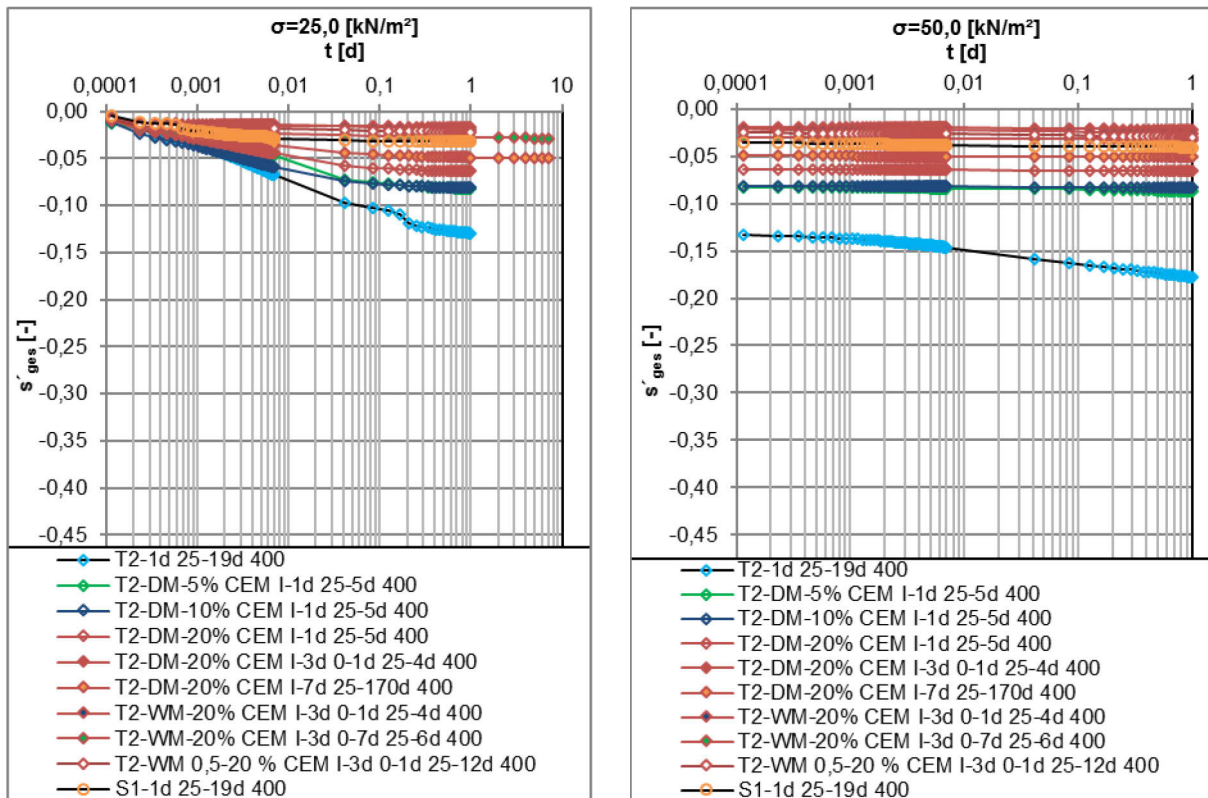


Abb. A. 49: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(25,0)</sub>, r.: log t-s<sub>ges(50,0)</sub>.

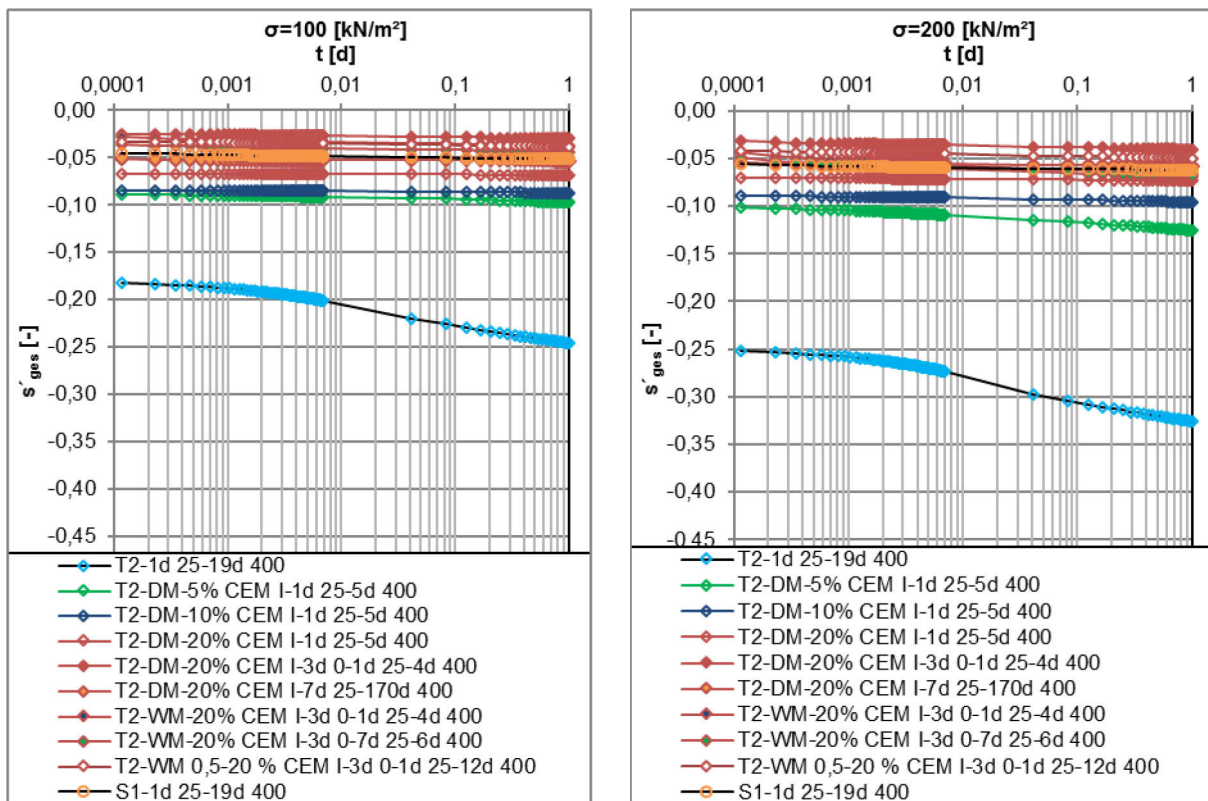


Abb. A. 50: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(100)</sub>, r.: log t-s<sub>ges(200)</sub>.



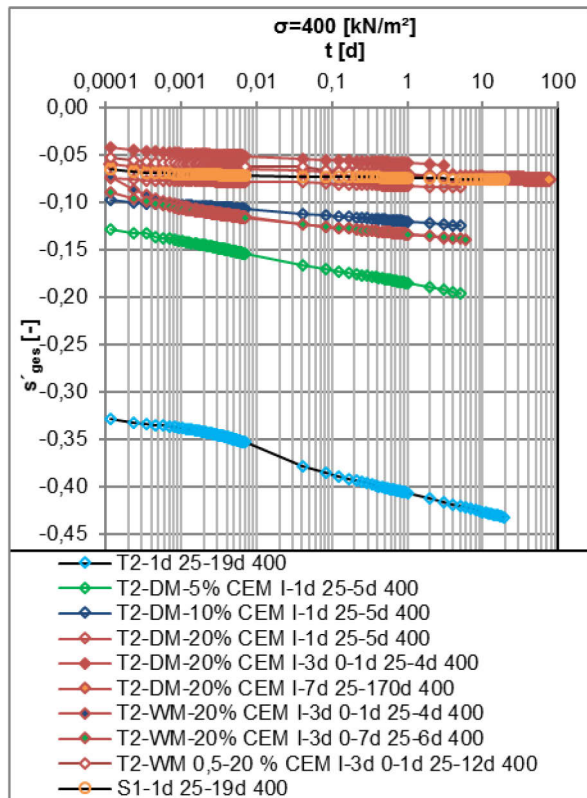


Abb. A. 51: T2-DM/WM -CEM I-Versuchsreihen –  $\log t\text{-}s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.8.1.2 $\log t\text{-}s'_{ink}$ -Linien

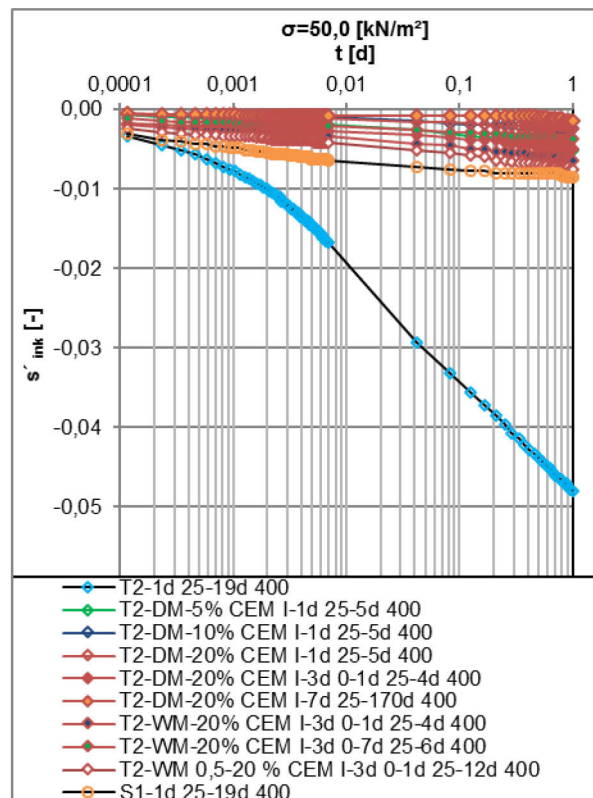
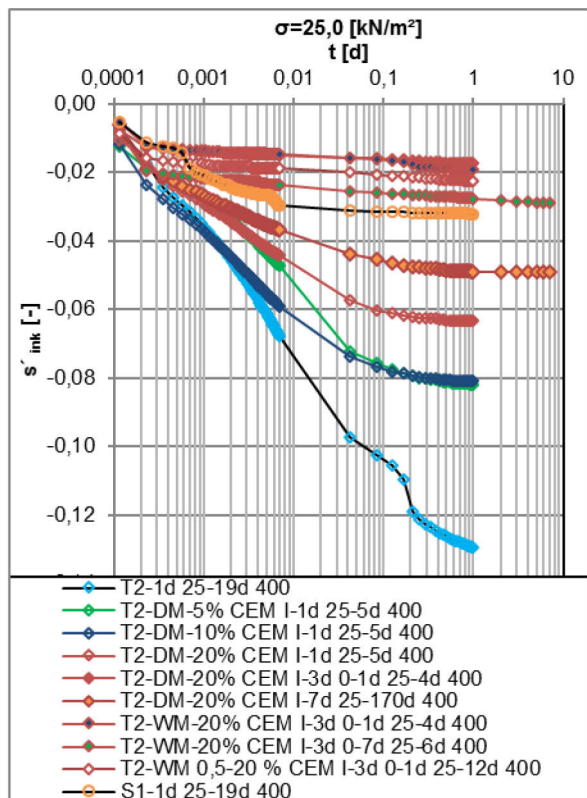


Abb. A. 52: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t\text{-}s'_{ink(25,0)}$ , r.:  $\log t\text{-}s'_{ges(50,0)}$ .

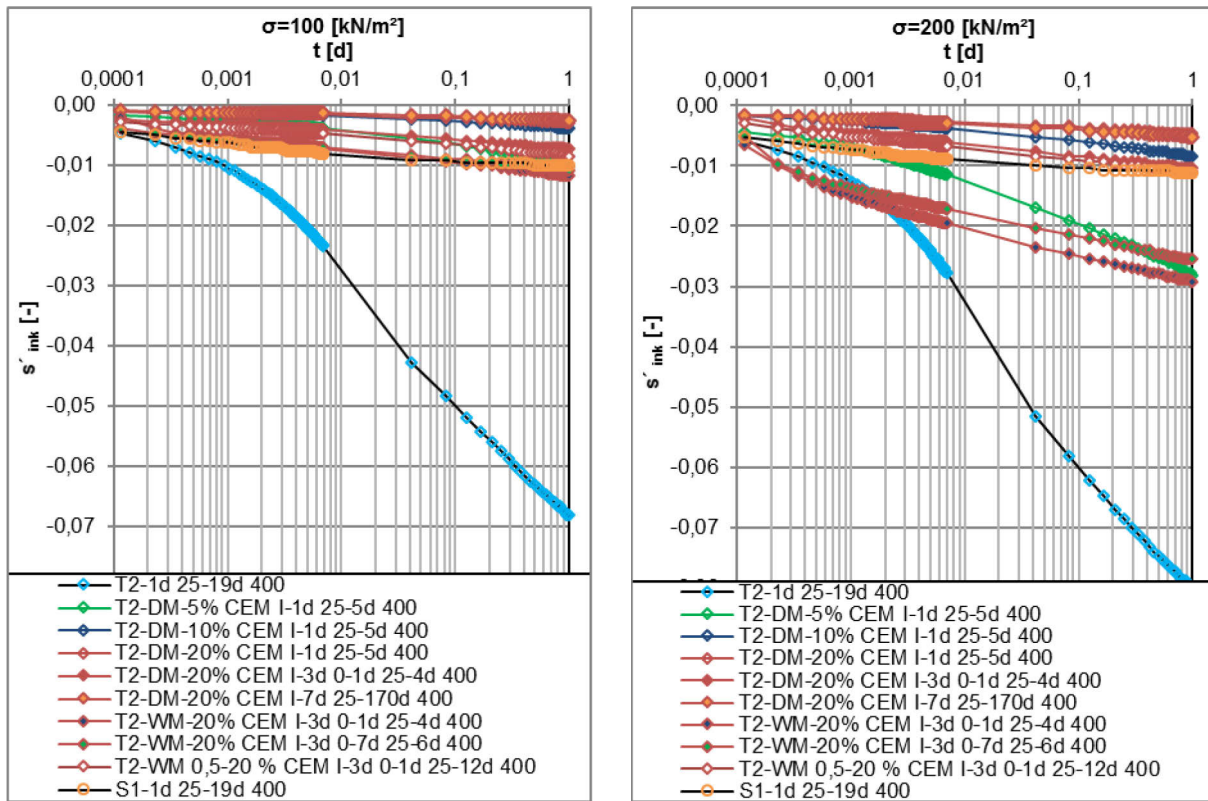


Abb. A. 53: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s'<sub>ink(100)</sub>, r.: log t-s'<sub>ges(200)</sub>.

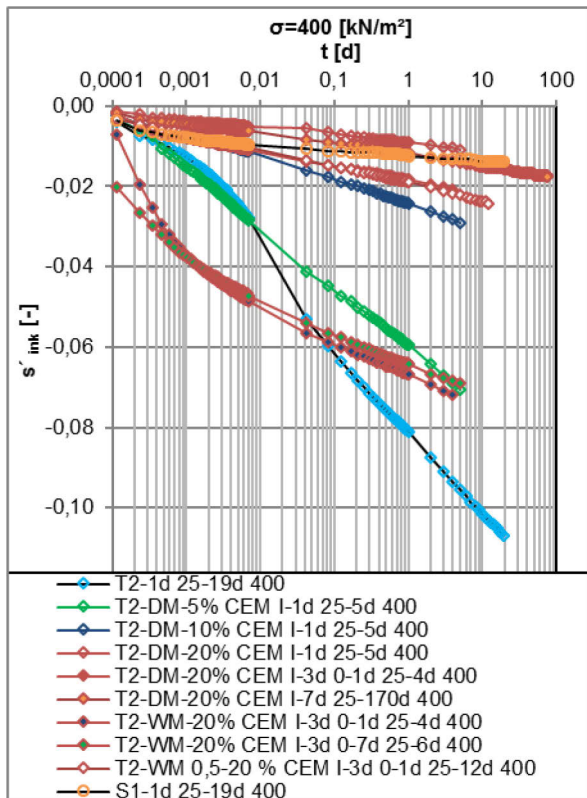


Abb. A. 54: T2-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – log t-s'<sub>ink(400)</sub>.



## A. 9.9 T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen

### A. 9.9.1.1 log t-s<sub>ges</sub>-Linien

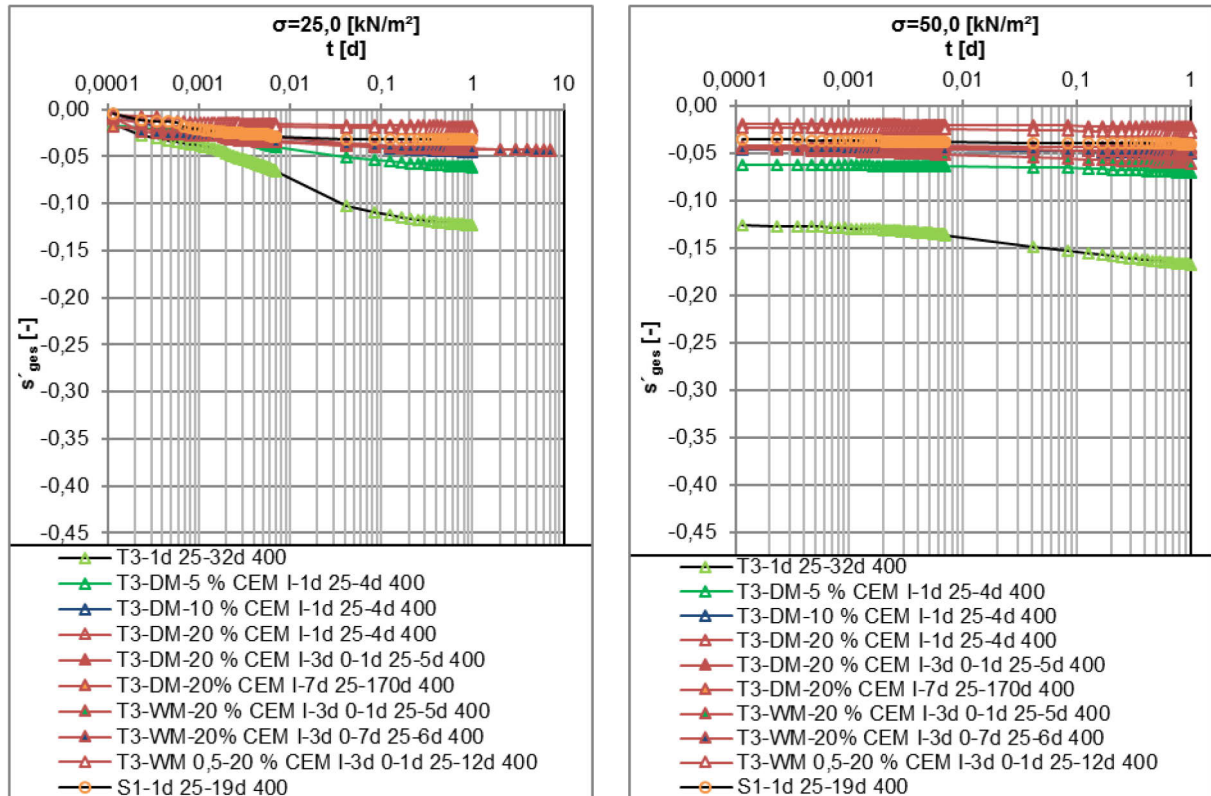


Abb. A. 55: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(25,0)</sub>, r.: log t-s<sub>ges(50,0)</sub>.

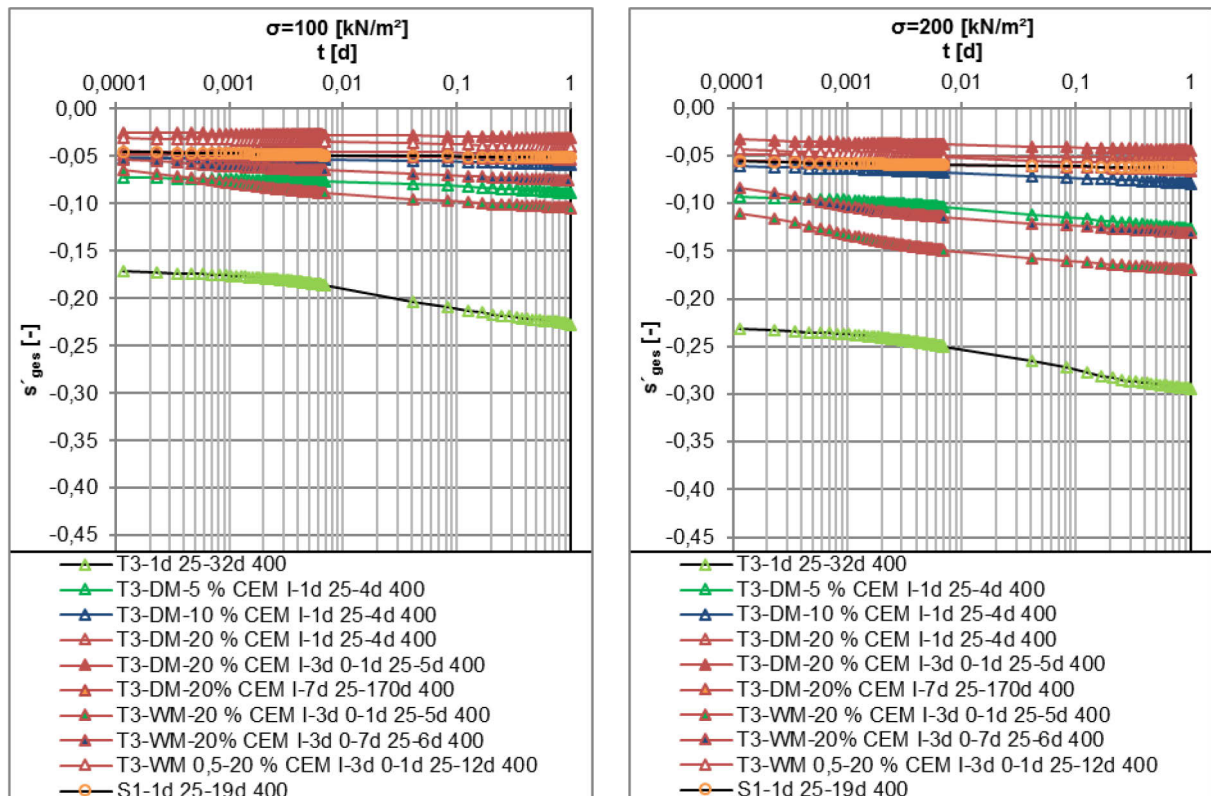


Abb. A. 56: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges(100)</sub>, r.: log t-s<sub>ges(200)</sub>.

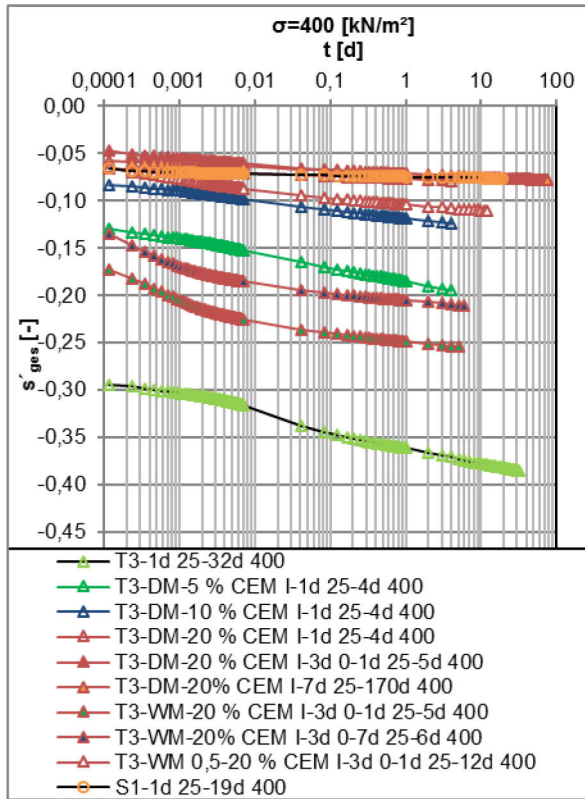


Abb. A. 57: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen –  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.9.1.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

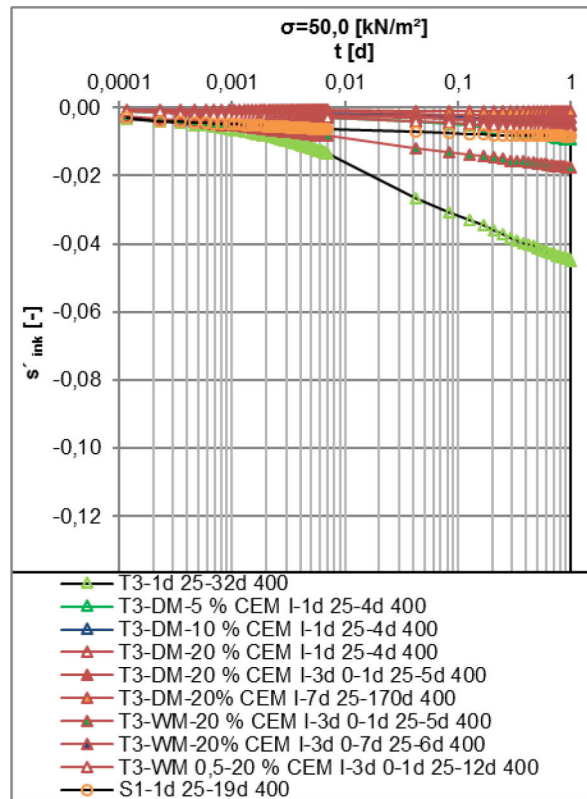
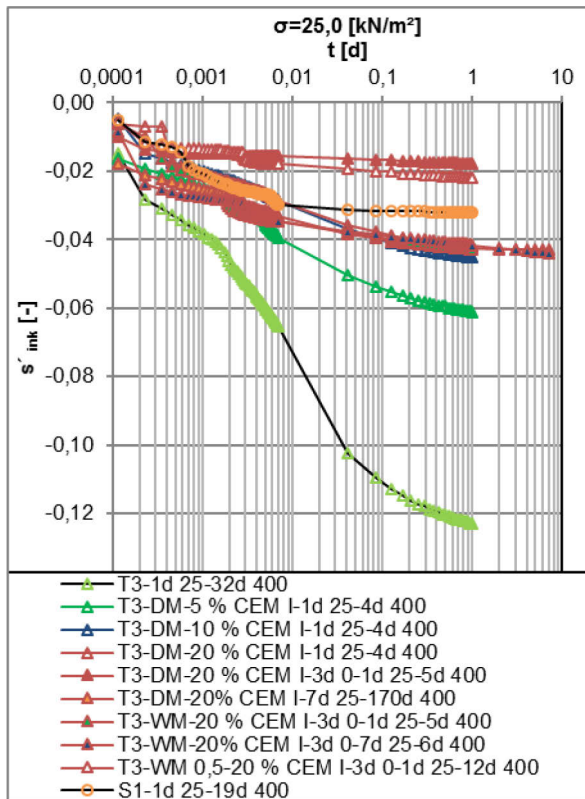


Abb. A. 58: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ .

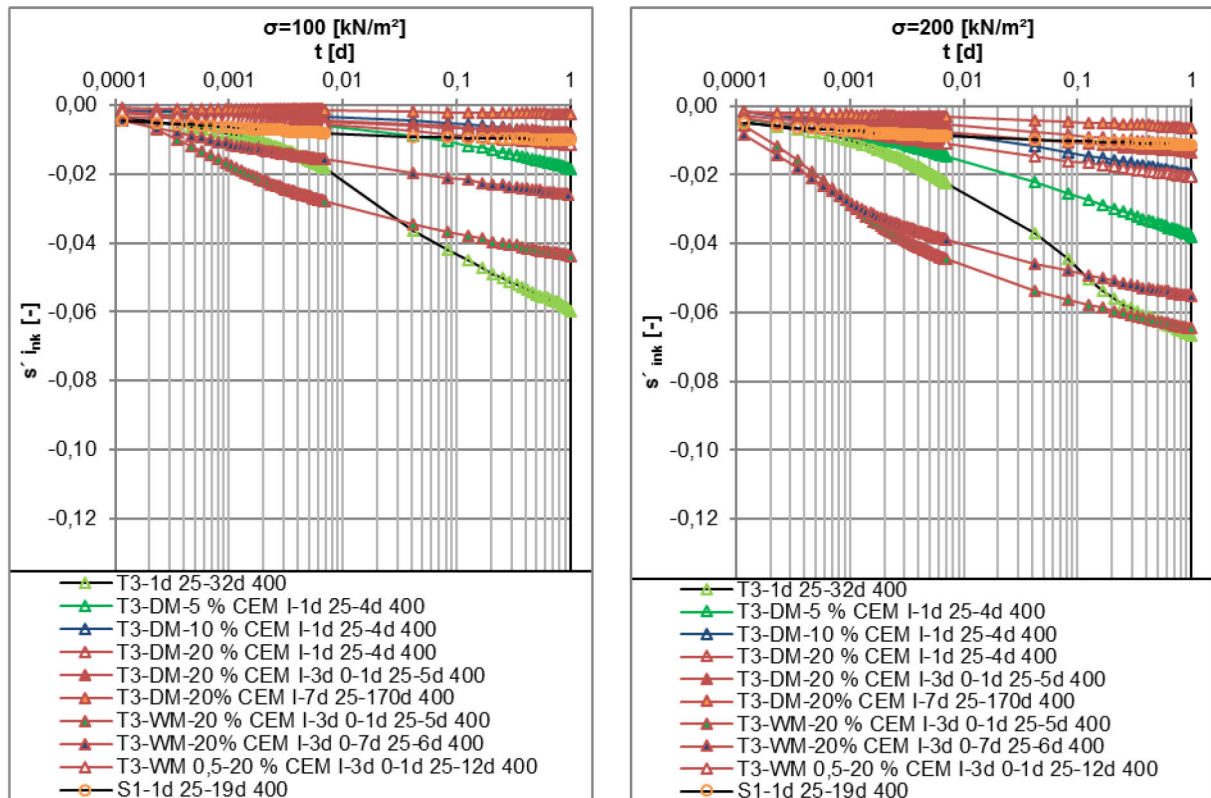


Abb. A. 59: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s'<sub>ink(100)</sub>, r.: log t-s'<sub>ink(200)</sub>.

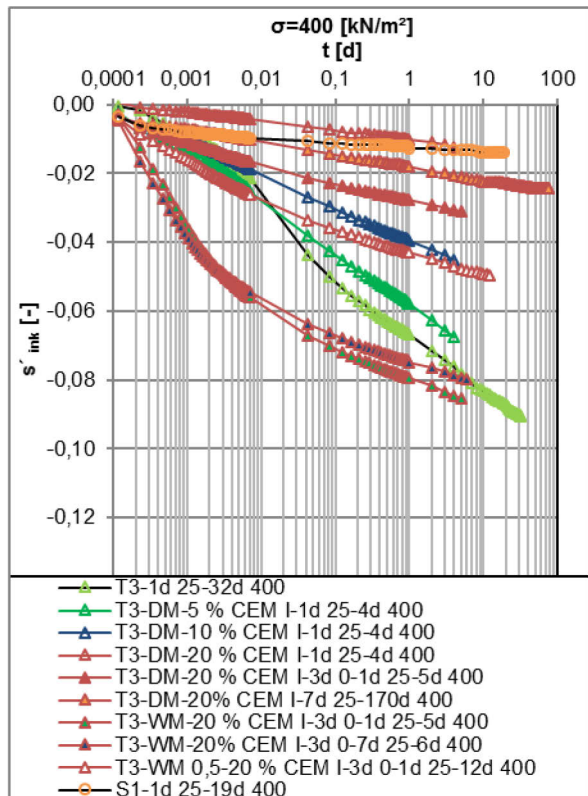


Abb. A. 60: T3-DM/WM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s'<sub>ink(400)</sub>.

### A. 9.10 S1-DM-CEM I-Versuchsreihen

#### A. 9.10.1 log t-s<sub>ges</sub>'-Linien

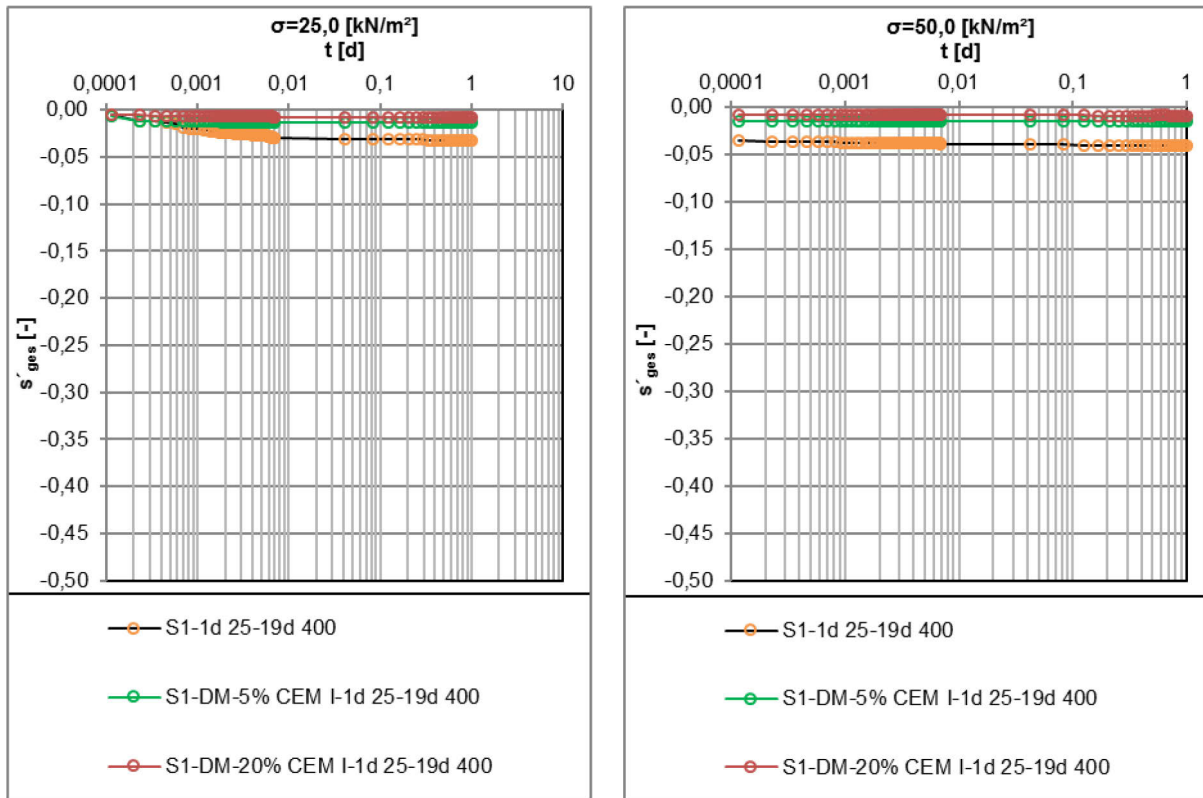


Abb. A. 61: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(25,0), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(50,0).

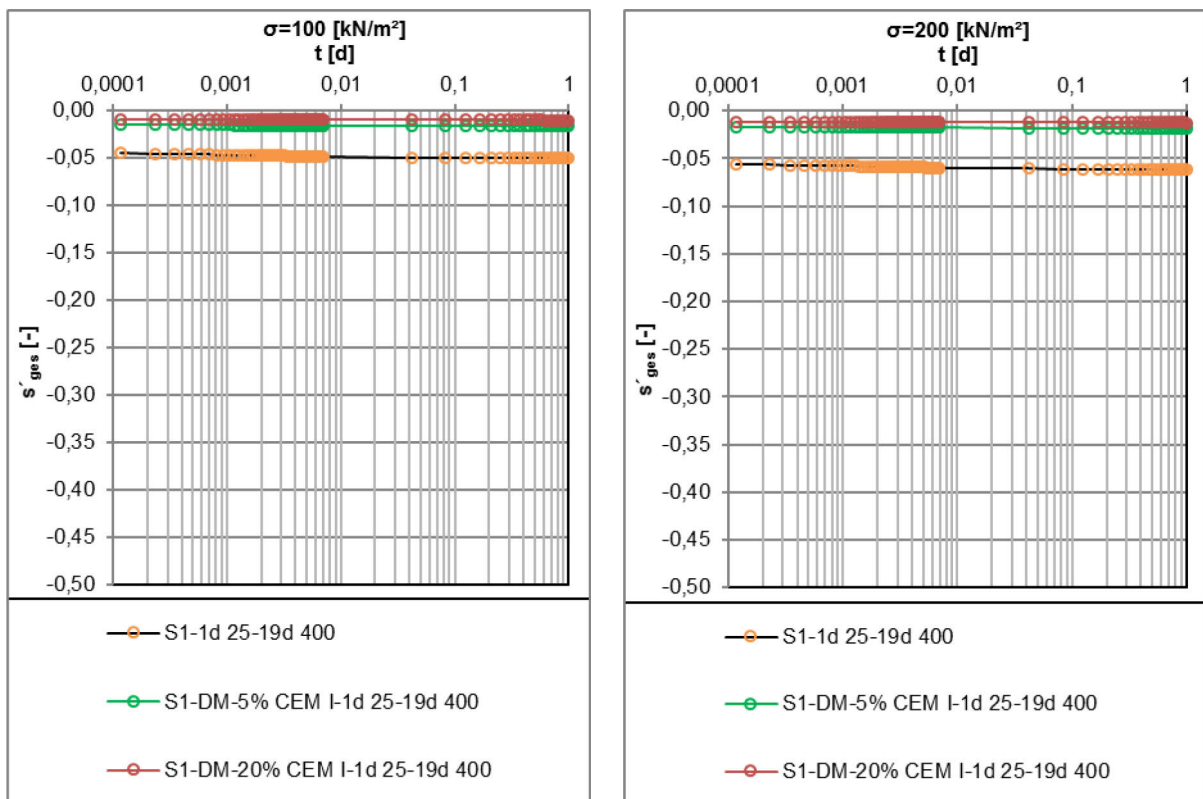


Abb. A. 62: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.: log t-s<sub>ges</sub>'(100), r.: log t-s<sub>ges</sub>'(200).



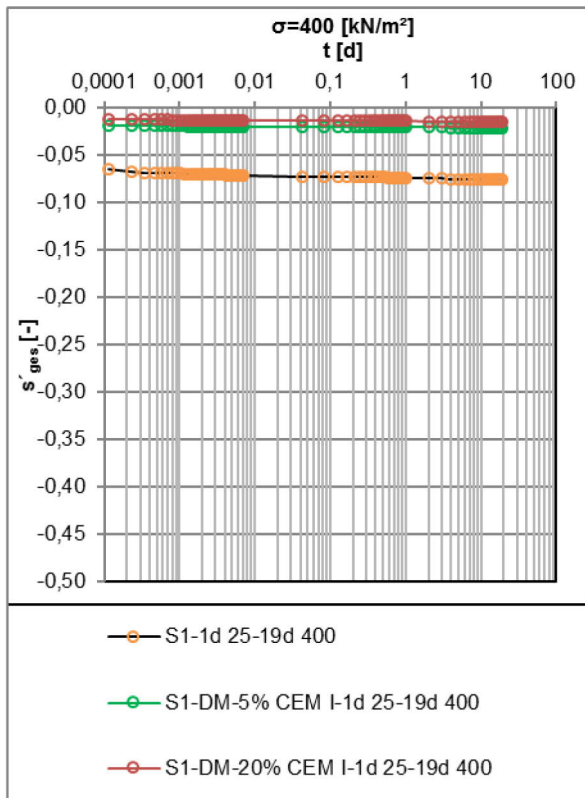


Abb. A. 63: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ges(400)}$ .

### A. 9.10.2 $\log t-s'_{ink}$ -Linien

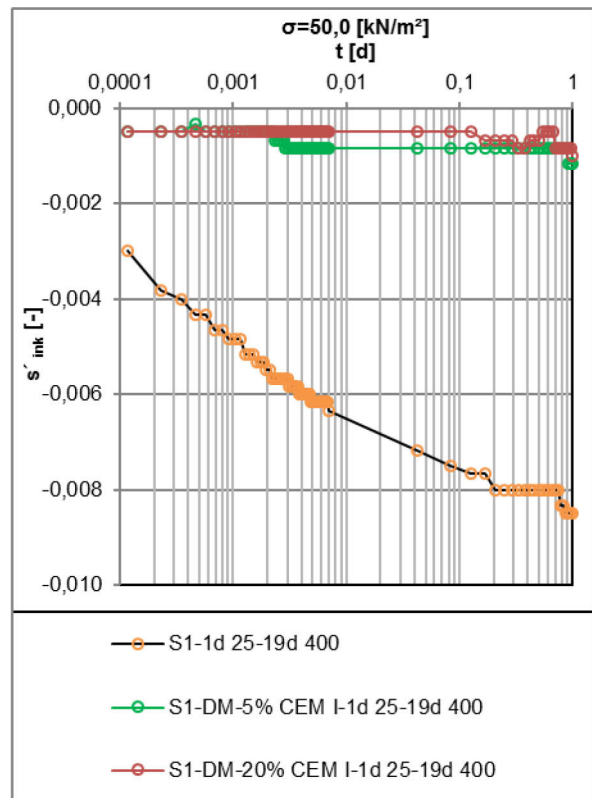
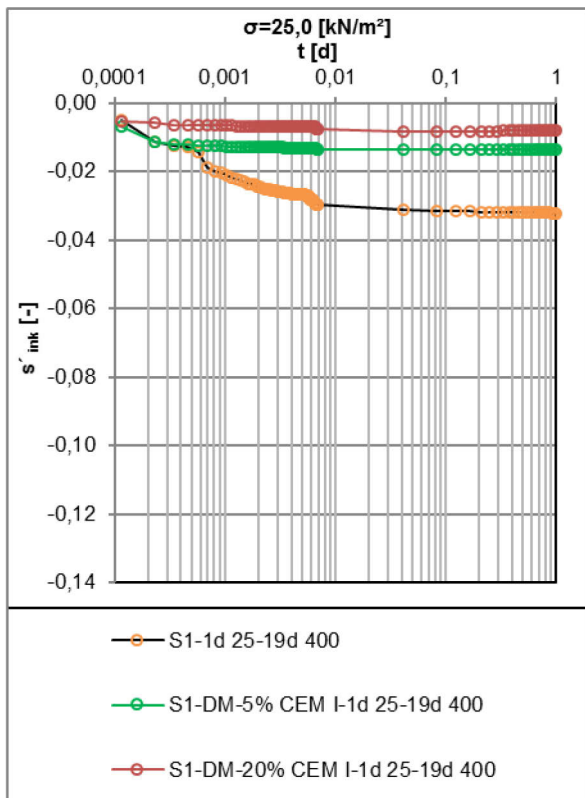


Abb. A. 64: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t-s'_{ink(25,0)}$ , r.:  $\log t-s'_{ink(50,0)}$ .

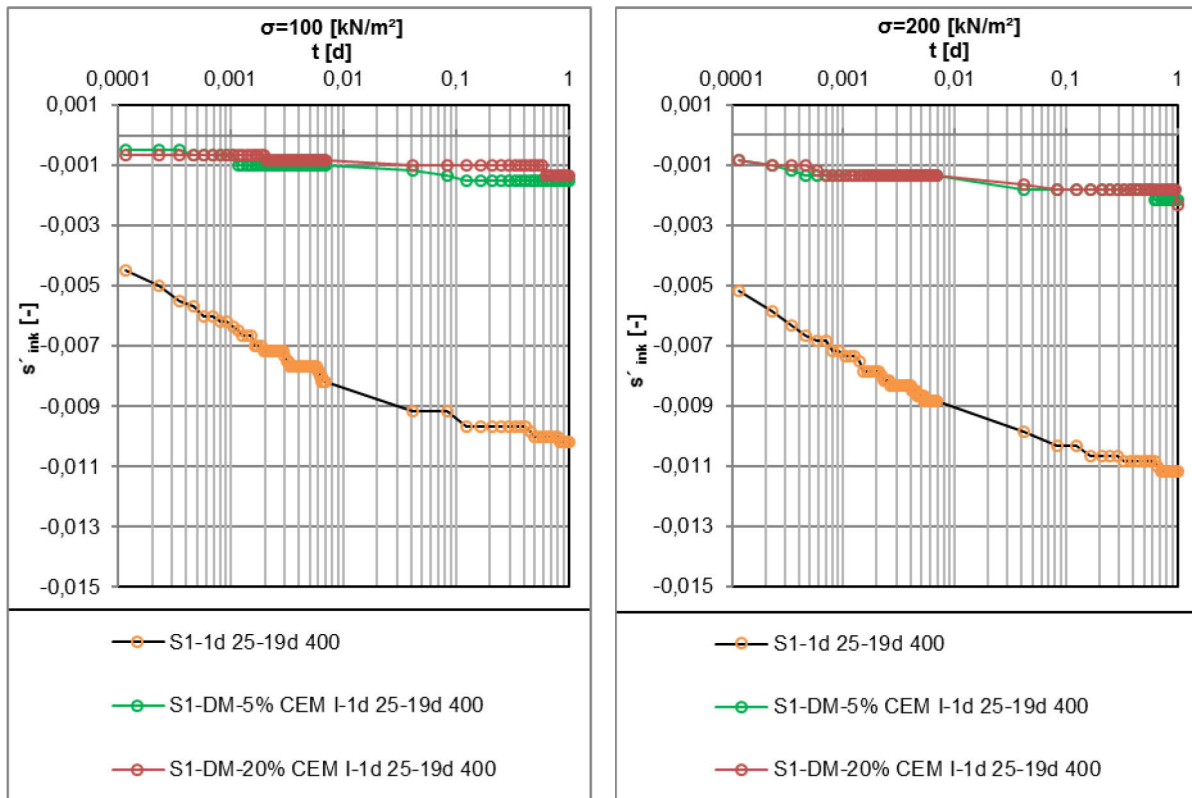


Abb. A. 65: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen – l.:  $\log t \cdot s'_{ink(100)}$ , r.:  $\log t \cdot s'_{ink(200)}$ .

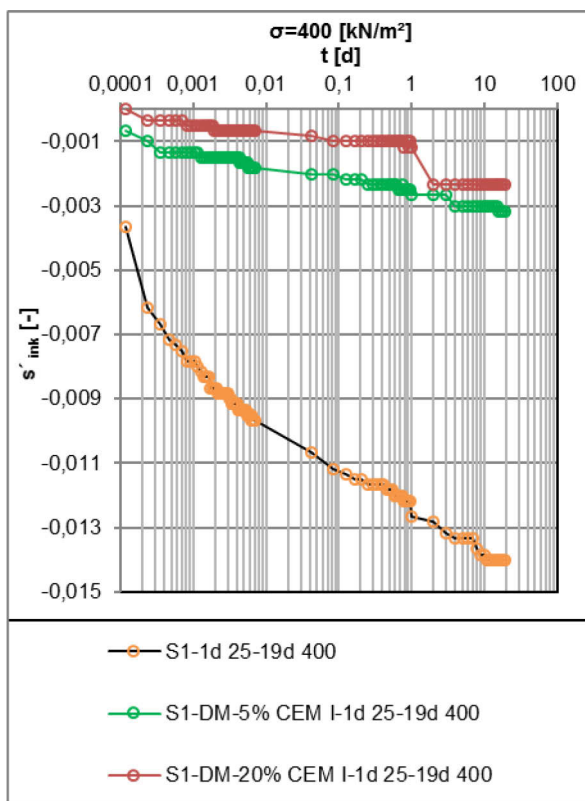


Abb. A. 66: S1-DM-CEM I-Versuchsreihen –  $\log t \cdot s'_{ink(400)}$ .

## A. 10 Zusammenstellungen der Ergebnisse der Scherversuche

In diesem Abschnitt sind die weiteren Ergebnisse der Scherversuche aufgeführt.

**Tab. A. 88: Zusammenstellung der Einbaudichten  $\rho_r$  der Scherversuche.**

Versuchsreihe [Bez.]	Einbaudichte $\rho_r$ [g/cm <sup>3</sup> ]		
	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	$\sigma=100$	$\sigma=150$	$\sigma=200$
T1-K1-1d	1,17	1,22	1,22
T1-K2-1d	1,20	1,20	1,20
T1-Q1-1d	1,20	1,20	1,21
T1-DM-K-10% LP-1d	1,22	1,23	1,23
T1-DM-K-20% LP-1d	1,18	1,18	1,18
T1-DM-K-5% B500-1d	1,26	1,26	1,26
T1-DM-K-20% B500-1d	1,35	1,34	1,34
T1-DM-Q-5% B500-2d	1,23	1,23	1,23
T1-DM-K-5% B300-1d	1,23	1,23	1,23
T1-DM-K-20% B300-1d	1,31	1,31	1,31
T1-DM-Q-5% B300-2d	1,23	1,23	1,23
T1-DM-K-5% BK-1d	1,26	1,27	1,26
T1-DM-K-20% BK-1d	1,31	1,31	1,31
T1-DM-Q-5% BK-2d	1,25	1,25	1,25
T1-DM-K-5% CEM I-1d	1,24	1,25	1,25
T1-DM-K-20% CEM I-1d	1,33	1,33	1,33
T1-DM-Q-5% CEM I-2d	1,24	1,20	1,21

Tab. A. 89: Mittelwerte der unbehandelten Scherversuche T1-K1, K2 und Q1-1d.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_c$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-K1-1d	67,5	100,2	140,9	36,3	-7,2	0,996	34,6	0,998
rel. D. zu MW1 [%]	-3,2	-4,3	3,9	-	-	-	-	-
rel. D. zu MW2 [%]	-8,6	-8,5	-0,8	-	-	-	-	-
T1-K2-1d	72,0	109,3	130,2	30,2	16,5	0,995	34,4	0,991
rel. D. zu MW1 [%]	3,2	4,3	-3,9	-	-	-	-	-
rel. D. zu MW2 [%]	-2,5	-0,2	-8,3	-	-	-	-	-
T1-Q1-1d	82,0	118,9	155,0	36,1	9,2	0,974	34,4	0,991
rel. D. zu MW1 [%]	17,6	13,5	14,3	-	-	-	-	-
rel. D. zu MW2 [%]	11,1	8,6	9,1	-	-	-	-	-
T1- Mittelwert- K1 u. K2- 1d ( <b>MW1</b> <sup>1</sup> )	69,8 (V=4,6%)	104,8 (V=6,1 %)	135,6 (V=5,6 %)	33,3	4,6	0,999	38,2	0,999
T1- Mittelwert- K1, K2 u. Q1- 1d ( <b>MW2</b> <sup>1</sup> )	73,8 (V=10,1 %)	109,5 (V=8,6 %)	142,0 (V=8,8 %)	34,4	6,2	0,999	35,8	0,999

<sup>1</sup> Vergleich in rel. D. [%] zu **MW1/2** in den nachfolgenden Tabellen Tab. A. 89 bis Tab. A. 94



Tab. A. 90: Vergleich der Scherversuche T1-DM-B500 und T1-unbehandelt.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_G$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-DM-K-5% B500-1d	86,5	126,8	166,8	38,8	6,2	1,000	40,1	1,000
rel. D zu MW1 [%]	24,0	21,1	23,1	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	17,1	15,8	17,4	-	-	-	-	-
T1-DM-K-20% B500-1d	89,6	127,8	173,0	39,8	5,0	0,989	40,9	0,999
rel. D zu MW1 [%]	28,5	22,0	27,6	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	21,3	16,7	21,8	-	-	-	-	-
T1-DM-Q-5% B500-2d	84,2	144,6	181,4	44,2	-9,2	0,981	42,5	0,994
rel. D zu MW1 [%]	20,6	38,0	33,8	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	14,0	32,1	27,7	-	-	-	-	-

Tab. A. 91: Vergleich der Scherversuche T1-DM-B300 und T1-unbehandelt.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_G$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-DM-K-5% B300-1d	86,7	126,9	163,8	37,6	10,2	0,999	39,8	0,999
rel. D zu MW1 [%]	24,3	21,1	20,8	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	17,4	15,9	15,3	-	-	-	-	-
T1-DM-K-20% B300-1d	94,5	120,5	171,0	37,4	13,9	0,967	40,4	0,991
rel. D zu MW1 [%]	35,5	15,0	26,2	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	28,0	10,1	20,4	-	-	-	-	-
T1-DM-Q-5% B300-2d	99,5	141,1	176,4	37,6	23,6	0,998	42,5	0,994
rel. D zu MW1 [%]	42,7	34,7	30,2	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	34,8	28,9	24,2	-	-	-	-	-

Tab. A. 92: Vergleich der Scherversuche T1-DM-BK und T1-unbehandelt.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_c$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-DM-K-5% BK-1d	87,7	120,9	163,5	38,8	6,2	1,000	39,4	0,998
rel. D zu MW1 [%]	24,0	21,1	20,8	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	17,4	15,9	15,3	-	-	-	-	-
T1-DM-K-20% BK-1d	86,9	134,3	167,0	38,7	9,3	0,989	40,6	0,997
rel. D zu MW1 [%]	24,6	28,2	23,2	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	17,7	22,7	17,6	-	-	-	-	-
T1-DM-Q-5% BK-2d	97,8	140,1	175,6	37,9	21,1	0,997	42,3	0,995
rel. D zu MW1 [%]	40,2	33,8	29,5	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	32,4	28,0	23,6	-	-	-	-	-

Tab. A. 93: Vergleich der Scherversuche T1-DM-CEM I und T1-unbehandelt.

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_c$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-DM-K-5% CEM I-1d	93,9	135,5	178,2	40,1	9,4	1,000	42,0	0,999
rel. D zu MW1 [%]	34,6	29,4	31,5	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	27,2	23,8	25,5	-	-	-	-	-
T1-DM-K-20% CEM I-1d	113,1	163,5	189,2	37,3	41,1	0,966	45,5	0,981
rel. D zu MW1 [%]	62,2	56,1	39,6	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	53,2	49,3	33,2	-	-	-	-	-
T1-DM-Q-5% CEM I-2d	110,0	153,4	193,1	39,7	27,6	0,999	45,0	0,994
rel. D zu MW1 [%]	57,7	46,4	42,4	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	49,0	40,1	35,9	-	-	-	-	-

**Tab. A. 94: Vergleich der Scherversuche T1-DM-LP und T1-unbehandelt.**

Versuchsreihe [Bez.]	Laststufe $\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			Schervinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]	Gesamtscherfestigkeit $\varphi_G$ [°]	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> [-]
	$\sigma=100$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=150$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma=200$ max. Scherspannung $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]					
T1-DM-K-10% LP-1d	73,1	108,8	151,6	38,1	-6,6	0,997	36,7	0,999
rel. D zu MW1 [%]	4,8	3,9	11,8	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	-1,0	-0,6	6,7	-	-	-	-	-
T1-DM-K-20% LP-1d	80,2	101,4	148,3	34,3	7,8	0,955	36,1	0,999
rel. D zu MW1 [%]	15,0	-3,2	9,4	-	-	-	-	-
rel. D zu MW2 [%]	8,6	-7,4	4,4	-	-	-	-	-