

# VERÖFFENTLICHUNGEN

des Grundbauinstituts  
der Technischen Universität Berlin  
Herausgegeben von S. A. Savidis

## HEFT 59

Untersuchungen zum Verformungsverhalten von  
Untergrundverbesserungen mit Sandsäulen in  
Böden mit organischen Anteilen

Investigation of the Deformation Behaviour of Ground  
Improvement with Sand Columns in Soils with Organic Matter



Maik Schüßler

Berlin 2012

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2011

Adresse des Instituts:

Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo  
Technische Universität Berlin  
Skr. TIB1-B7  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin

Telefon: (030) 314-72341  
Telefax: (030) 314-72343  
E-Mail: [info@grundbau.tu-berlin.de](mailto:info@grundbau.tu-berlin.de)  
Internet: <http://www.grundbau.tu-berlin.de>

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0943-9  
ISSN 0342-3905

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# **Untersuchungen zum Verformungs- verhalten von Untergrund- verbesserungen mit Sandsäulen in Böden mit organischen Anteilen**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Maik Schüßler  
aus Arnstadt/Thür.

von der Fakultät VI Planen Bauen Umwelt  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna  
Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. A. Savidis  
Berichter: Prof. Dr.-Ing. K.-M. Borchert  
Berichter: Dr.-Ing. F. Rackwitz

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. November 2011

Berlin 2012

D 83



---

## Vorwort des Herausgebers

Die Gründung von Straßendämmen in Moorgebieten bereitet dem Bauingenieur schon immer Schwierigkeiten. Die Kenntnis der Eigenschaften der Böden ist eine Grundvoraussetzung für die Herstellung eines standsicheren und verformungsverträglichen Straßenunterbaus. Untergrundverbesserungen leisten zur Erreichung dieses Ziels einen wesentlichen Beitrag und stellen insbesondere im großflächigen Verkehrswegebau eine wirtschaftliche Alternative zu Tiefgründungen dar. Die Untergrundverbesserung mit Sandsäulen wird vorwiegend in Japan eingesetzt. Sandsäulen können durch ihre höhere Steifigkeit größere Spannungen als der umgebende Boden aufnehmen und bewirken durch die Entlastung des anstehenden Bodens eine Verringerung der Verformungen.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften von Torfen und Mudden gewonnen. Insbesondere im Bereich der Mudden stellte sich heraus, dass die vorliegende bautechnische Einteilung nicht ausreichend ist und weitere Differenzierungen notwendig sind. Anhand von Untersuchungen zum geschwindigkeitsabhängigen Materialverhalten wurden Korrekturfaktoren für die Ergebnisse von Feldflügelsondierungen, welche bis dato nicht existierten, angegeben. Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen konnte ein Einblick in die Partikelstruktur der Mudden gewährt und damit bodenmechanische Besonderheiten erklärt werden.

Mit der Auswertung von Messergebnissen von Straßenbauprojekten des Landes Brandenburg konnte die Wirksamkeit von Untergrundverbesserungen mit Sandsäulen in Torfen und Mudden nachgewiesen werden. Ein aufwändig instrumentierter Großmodellversuch in der geotechnischen Versuchsrube des Fachgebiets vervollständigte die Erkenntnisse aus den in situ Messungen und gab einen Einblick insbesondere in Herstellungseinflüsse, Spannungsverteilungen und Verformungen an der Oberfläche sowie in das tiefenabhängige Verformungsverhalten des verbesserten Bodens.

Ein Vergleich von Bemessungsverfahren für Rüttelstopfverdichtungen hat gezeigt, dass diese auch für Untergrundverbesserungen mit Sandsäulen Verwendung finden können und dass das Verformungsverhalten ausschließlich durch die Eigenschaften des umgebenden Bodens gesteuert wird. Bezüglich des Kriechverhaltens eines mit Sandsäulen verbesserten Bodens wurde festgestellt, dass eine nennenswerte Reduzierung der Kriechverformungen erst nach einer Entlastung erreicht wird, d.h. eine Überkonsolidierung ist erforderlich. Mit der Annahme eines Modells der Einheitszelle konnte der Verfasser die kriechmindernde Wirkung einer Untergrundverbesserung mit Sandsäulen gegenüber einem unverbesserten Boden nachvollziehen.

---

Für die Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials zu Verformungsmessungen an Straßendämmen und vorliegenden Baugrunduntersuchungsergebnissen geht ein besonderer Dank an die Niederlassung Autobahn des Landesbetriebes Straßenwesen Brandenburg.

S. A. Savidis

---

## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als Sachgebietsleiter im Brandenburgischen Autobahnamt und nachfolgend Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, Niederlassung Autobahn. Der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur stellt insbesondere in Gebieten mit geringtragfähigen und verformungsempfindlichen Böden erhöhte Anforderungen an kosteneffektive Gründungslösungen. Ein Verfahren ist die in Deutschland bisher wenig angewandte Methode der Untergrundverbesserung mit Sandsäulen. Herrn Professor Dr.-Ing. S. A. Savidis möchte ich dafür danken, dass er mir die Möglichkeit gab, über die Thematik am Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo der Technischen Universität Berlin promovieren zu können. Für die mehrjährige stets konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit und Unterstützung sowie für die Begutachtung der Arbeit gilt ihm mein besonderer Dank.

Den Berichtern, Herrn Professor Dr.-Ing. K.-M. Borchert vom Ingenieurbüro GuD Consult GmbH und Herrn Dr. Ing. F. Rackwitz von der Technischen Universität Berlin möchte ich für die Begutachtung der Arbeit ausdrücklich danken.

Herrn Professor Dr.-Ing. Y. Petryna danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Den Mitarbeitern des Fachgebietes Grundbau und Bodenmechanik – Degebo bin ich für ihre Hilfsbereitschaft dankbar. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Dr. Ing. F. Rackwitz für die zahlreichen Diskussionen und Hinweise in den vergangenen Jahren danken. Er stand stets als anregender Gesprächspartner zur Verfügung. Für die Durchführung der bodenmechanischen Laborversuche an nicht einfach handhabbaren Versuchsböden danke ich Herrn Podeswa. Weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing M. Ney und Herrn Dipl.-Ing. H. Wieser für die Betreuung und das Gelingen eines fast zwei Jahre dauernden Großmodellversuchs.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Susanne und den Kindern Julia und Robert. Sie haben durch ihr Verständnis in den zurückliegenden acht Jahren wesentlich dazu beigetragen, dass die vorliegende Arbeit entstehen konnte.

Maik Schüßler





## Summary

Infrastructure projects, such as roads and railway lines, have sometimes to be planned through regions with very soft underground conditions. Soil improvement techniques are required in such cases if soil replacement is not a possible that means cost-intensive solution. The use of sand columns for ground improvement is very cost effective if sand is sufficiently available nearby the construction site. The drainage of the soft soils is accomplished by the sand columns itself. Another advantage is the fact that these columns also increase the stiffness and the strength of the soft soils.

The local area of Berlin and Brandenburg is situated in the northern lowlands of Germany. More than 10% of this area are moor regions with very soft organic soils. The very soft organic soils deposited mainly in the past ice ages era, the Holocene, and are located in narrow valleys generally with gyttja at the bottom and peat on the top. The properties of these soils were determined by more than 600 disturbed and undisturbed soil samples taken from different peat and gyttja layers. Based on these investigations the classification in mineral gyttja (Kalkmudde, Diatomeenmudde), organic gyttja (Torfmudde, Detritusmudde) and peat is possible. The distinction between mineral gyttja and organic gyttja / peat was done at 35% organic content  $V_{gl}$ . The solid density  $\rho_s$  shows a close correlation with the organic content  $V_{gl}$ . Peat and gyttja display extreme compressibility due to the increase in effective vertical stress. The compression index  $C_c$  is in the range of 0.5 to 2.5 for mineral gyttja and up to 8 for peat and organic gyttja. The secondary compression index  $C_\alpha$  is in the range of 0.02 to 0.15 for mineral gyttja and 0.15 to 0.6 for peat and organic gyttja. The ratios  $C_\alpha/C_c$  are very high with values up to 0.08 (gyttja) and 0.1 (peat) and display a highly viscous behaviour. Peat and gyttja are materials with high values of friction angle ( $\varphi_s'$  up to  $70^\circ$ ). The initial undrained shear strength  $s_u$  is very low ( $s_u = 1 \dots 7 \text{ kN/m}^2$ ). Primary and secondary compression leads to increase of the undrained shear strength.

The Sand Compaction Pile Method was developed for the improvement of clay and sandy grounds in Japan. In Brandenburg sand columns were used to improve very soft organic soil layers for the construction of road embankments. Extensive in situ measurements as well as laboratory tests and a large scale model test were done to investigate the behaviour of the soft soil in conjunction with the sand columns in more detail. The sand columns were installed with full displacement of the soil during penetration of a pipe with closed toe. The initial undrained shear strength  $s_u$  was  $2.5 \text{ kN/m}^2$  (laboratory large scale model test) and minimal  $4 \text{ kN/m}^2$  (road embankment project). The sand column-to-organic soil vertical stress ratio depends strongly on the loading conditions. Results from literature show stress concentration ratios on the top of the column between 2 and 5 for sand compaction piles and stone columns. In the laboratory model test the stress concentration ratio was determined between 1.5 to 1.8 for loads between 15 and  $25 \text{ kN/m}^2$ . Settlements of the column head levels are about 5% less than the organic soil surface. Due to shear stresses mobilized at the soft soil – sand column interface, a stress

transfer from the soil to the column with depth and an increase of the stress concentration ratio with depth can occur.

The total settlement reduction of the improved soil compared to the natural ground conditions can attain about 70 - 80% by using sand columns designed with area replacement ratio  $A_s/A_e$  in the range of 0.1 to 0.15 for the end of primary consolidation. The settlements can be estimated by the unit cell concept according equation (8.7) respectively according the solutions of PRIEBE (1995), ABOSHI et al. (1991) or GOUGHNOUR & BAYUK (1979). The friction angle of the sand column material is  $32^\circ$ .

The long term deformations of the soft organic soils are strongly influenced by their creep behaviour. Secondary compression behaviour of gyttja and peat improved with sand columns was obtained by a laboratory large scale model test and road embankment projects. An important improvement of creep behaviour is not possible without surcharge. With removal of surcharge in the range of 70 to 80% from the maximum load the secondary settlement can be reduced to only 15 to 25% of the secondary settlement without surcharge.

# Inhaltsverzeichnis

Summary.....	I
Symbolverzeichnis.....	VI
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Struktur und Ziele der Arbeit .....	4
<b>2 Untergrundverbesserung mit granularen Säulen .....</b>	<b>7</b>
2.1 Allgemeines.....	7
2.2 Herstellungsverfahren .....	7
2.3 Änderung der Bodeneigenschaften durch den Einbau granularer Säulen.....	9
2.4 Geometrische Randbedingungen und Tragverhalten granularer Säulen unter Dämmen .....	12
2.5 Analytische Bemessungsverfahren .....	18
2.5.1 Ermittlung der Verformungen am Modell der Einheitszelle.....	18
2.5.2 Böschungs- bzw. Geländebruch bei Dämmen .....	27
2.6 Numerische Berechnungsverfahren .....	29
2.7 Zusammenfassende Beurteilung .....	31
<b>3 Messergebnisse ausgeführter Bauvorhaben .....</b>	<b>33</b>
3.1 Allgemeines.....	33
3.2 Bauvorhaben 1: Neubau der Bundesstraße (B) 96.....	35
3.2.1 Untergrundverhältnisse und bautechnische Maßnahmen.....	35
3.2.2 Messergebnisse während der Säulenherstellung.....	36
3.2.3 Messergebnisse nach Aufbringen der Dammlasten und unter Verkehrsbelastung.....	42
3.3 Bauvorhaben 2: Ausbau der Autobahn (A) 115.....	47
3.3.1 Untergrundverhältnisse und bautechnische Maßnahmen.....	47
3.3.2 Feststellungen im Zuge der Säulenherstellung.....	50
3.3.3 Messergebnisse nach Aufbringen der Dammlasten und unter Verkehrsbelastung.....	50
3.4 Bauvorhaben 3: Ausbau der Autobahn (A) 13.....	58
3.4.1 Untergrundverhältnisse und bautechnische Maßnahmen.....	58
3.4.2 Messergebnisse während der Säulenherstellung.....	59
3.4.3 Messergebnisse nach Aufbringen der Dammlasten und unter Verkehrsbelastung.....	61
3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Feldmessungen .....	62
<b>4 Entstehung und Einteilung der Böden mit organischen Anteilen .....</b>	<b>67</b>
4.1 Geologie .....	67
4.2 Bautechnische Einteilung.....	70
4.3 Feststellungen.....	71
4.4 Ermittelte bodenmechanische Klassifikationskennwerte.....	71
4.4.1 Allgemeines.....	71
4.4.2 Glühverlust und Kalkgehalt .....	72
4.4.3 Korndichte .....	73
4.4.4 Natürlicher Wassergehalt, Wassergehalt an der Fließ- und Ausrollgrenze .....	75
4.4.5 Korngrößenverteilung, chemische Zusammensetzung und Ablagerungsstruktur .....	80

4.4.6	Porenanteil, Porenzahl und Sättigungszahl .....	85
4.5	Zusammenfassung zur Klassifizierung der Torfe und Mudden .....	87
<b>5</b>	<b>Ermittlung der Bodenkennwerte zum Spannungs-Verformungsverhalten durch Laborversuche .....</b>	<b>89</b>
5.1	Ödometerversuche .....	89
5.1.1	Grundlagen .....	89
5.1.2	Versuchsergebnisse zum Spannungs-Verformungsverhalten .....	96
5.1.3	Versuchsergebnisse zum zeitabhängigen Verformungsverhalten .....	102
5.2	Triaxialversuche, direkte Scherversuche und Flügelsondierungen .....	117
5.2.1	Versuche zum Spannungs-Verformungsverhalten im Triaxialgerät .....	117
5.2.2	Konsolidierte, triaxiale Scherversuche .....	126
5.2.3	Direkte Scherversuche .....	130
5.2.4	Unkonsolidierte, undrained Triaxialversuche .....	131
5.2.5	Laborflügelsondierungen .....	137
5.3	Zusammenfassung zum Spannungs-Verformungsverhalten .....	141
<b>6</b>	<b>Ermittlung der Bodenkennwerte durch Feldversuche .....</b>	<b>145</b>
6.1	Allgemeines .....	145
6.2	Feldflügelsondierungen .....	145
6.3	Drucksondierungen .....	156
6.4	Zusammenfassung zu den Feldversuchen .....	162
<b>7</b>	<b>Modellversuche .....</b>	<b>165</b>
7.1	Konzeption der Versuche .....	165
7.2	Kleinmaßstäbliche Versuche .....	166
7.2.1	Versuchsbeschreibung .....	166
7.2.2	Messergebnisse Säulenherstellung .....	167
7.2.3	Messergebnisse Belastungsversuche .....	171
7.2.4	Bildbasierte Verformungsmessungen .....	172
7.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der kleinmaßstäblichen Versuche .....	173
7.3	Großmaßstäbliche Versuche .....	174
7.3.1	Versuchsaufbau, Zielsetzung der Versuche und eingesetzte Messtechnik ....	174
7.3.2	Eigenschaften der Versuchsmaterialien .....	176
7.3.3	Versuchsdurchführung und Eigenschaften der Sandsäulen .....	177
7.3.4	Darstellung der Messergebnisse der Säulenherstellung .....	179
7.3.5	Darstellung der Messergebnisse der Be- und Entlastungsphasen .....	186
7.3.6	Probelastung der Mittelsäule .....	205
7.3.7	Rückbau der Versuchsböden .....	213
<b>8</b>	<b>Bemessungsverfahren zur Verformungsprognose .....</b>	<b>217</b>
8.1	Vorbemerkungen .....	217
8.2	Bemessungsverfahren nach PRIEBE, GOUGHNOUR & BAYUK und ABOSHI	217
8.3	Bemessungsverfahren für Sandsäulen zur Untergrundverbesserung .....	224
8.3.1	Ermittlung der Verformung zum Abschluss der Primärkonsolidierung .....	224
8.3.2	Bestimmung des Endes der Primärkonsolidierung .....	227
8.3.3	Bestimmung der Kriechverformungen .....	234
8.3.4	Einfluss der Säulenherstellung und entstehender Porenwasserüberdruck ....	252
8.3.5	Tragverhalten Gesamtsystem .....	256
8.4	Zusammenfassung zur Verformungsprognose .....	258
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>261</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>267</b>

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>277</b>
-----------------------------------	------------

<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>285</b>
---------------------------------	------------

## **Anhang**

<b>Anhang A: Messergebnisse Feldmessungen.....</b>	<b>287</b>
--	------------

A 1: Horizontalverschiebung infolge Säulenherstellung B 96.....	287
---	-----

A 2: Weitere Messergebnisse A 115.....	289
--	-----

A 3: Untergrundverhältnisse und Messergebnisse A 10.....	290
--	-----

A 4: Untergrundverhältnisse und Messergebnisse A 11.....	298
--	-----

<b>Anhang B: Humositätsgrad Torfe, Probenüberblick, Auswertungen und Bohrprofile.....</b>	<b>305</b>
---	------------

B 1: Humositätsgrad nach v. Post.....	305
---------------------------------------	-----

B 2: Probenüberblick und ausgeführte Untersuchungen.....	306
--	-----

B 3: Einfluss von Kalk- und Tongehalt auf die Korndichte.....	307
---	-----

B 4: Abhängigkeit der Porenzahl vom Glühverlust bzw. Kalkgehalt.....	309
--	-----

B 5: Bohrprofile A 10, Wublitzniederung.....	310
--	-----

<b>Anhang C: Einflüsse Laboruntersuchungen und Vergleich Versuchsarten.....</b>	<b>311</b>
---	------------

C 1: Einfluss des Spannungsverhältnisses $\sigma'_h / \sigma'_v$ auf die Ermittlung des Kriechbeiwertes in Ödometerversuchen.....	311
---	-----

C 2: Einfluss der Temperatur auf die Ermittlung des Kriechbeiwertes in Ödometerversuchen.....	314
---	-----

C 3: Vergleich triaxiale CU- und CD-Versuche.....	317
---	-----

C 4: Undrained triaxiale Scherversuche mit Variation der Versuchsgeschwindigkeit.....	319
---	-----

C 5: Untersuchungsergebnisse von Laborflügelsondierungen und undrained triaxialen Kompressionsversuchen.....	321
--	-----

<b>Anhang D: Laboruntersuchungen, Querschnitt Versuchsgrube und Messergebnisse Großmodellversuch.....</b>	<b>323</b>
---	------------

D 1: Laborversuchsergebnisse Großmodellversuch.....	323
---	-----

D 2: Drucksondierungen Großmodellversuch.....	326
---	-----

D 3: Querschnitt Versuchsgrube und Lage Messwertaufnehmer.....	327
--	-----

D 4: Weitere Messergebnisse Säulenherstellung.....	328
--	-----

D 5: Weitere Messergebnisse Probelastung Mittelsäule.....	331
---	-----

<b>Anhang E: Anwendung der Ergebnisse.....</b>	<b>337</b>
--	------------

<b>Anhang F: Zusammenstellung gemessener Fahrbahnabsenkungen an Bundesautobahnen im Land Brandenburg (Auswahl).....</b>	<b>345</b>
---	------------

## Symbolverzeichnis

Häufig verwendete Symbole, Formelzeichen sowie Abkürzungen, dazugehörige Einheiten und Bezeichnungen werden nachfolgend alphabetisch aufgelistet.

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$A_s$	$m^2$	Säulenfläche
$A_e$	$m^2$	einer Säule zugeordnete Fläche der Einheitszelle aus Säule und Boden
$A_s/A_e$	-	Verhältnis der Säulenfläche zur Fläche der Einheitszelle
$c'$	$kN/m^2$	Effektive Kohäsion
$C_B$	-	BUISMANN-Faktor
$C_c$	-	Kompressionsbeiwert
$c_{fu}$	$kN/m^2$	Undränierete Flügelscherfestigkeit (abgeminderter Messwert $c_{fv}$ )
$c_{fv}$	$kN/m^2$	Gemessener maximaler Scherwiderstand bzw. gemessene Flügelscherfestigkeit
CPT	-	Cone Penetration Testing (Drucksondierung)
CPTU	-	Cone Penetration Testing mit Porenwasserdruckmessung
$C_r$	-	Wiederbelastungsbeiwert
$C_s$	-	Schwellbeiwert
$C_T$	-	Temperaturbeiwert beim Kriechen
$c_u$	$kN/m^2$	Undränierete Kohäsion bzw. Scherfestigkeit
$c_v$	$m^2/s; m^2/a$	Konsolidierungsbeiwert
$C_\alpha$	-	Kriechbeiwert
$e$	-	(aktuelle) Porenzahl
$e_a$	-	Porenzahl im Ausgangszustand
EOP	-	End of Primary Consolidation / Ende der Primärkonsolidation
$E_s$	$kN/m^2$	Steifemodul
HIK	-	Horizontalinklinometer
$i_0$	-	Stagnationsgradient
$I_p$	%	Plastizitätszahl
$I_{v\alpha}$	-	Zähigkeitsindex
$k_v$ bzw. $k_h$	$m/s$	Wasserdurchlässigkeit vertikal bzw. horizontal
$n$	-	Spannungskonzentration
$n_0$	-	Grundwert der Verbesserung nach PRIEBE
$N_k$	-	Konusfaktor beim CPT-Versuch
$N_{kt}$	-	Konusfaktor beim CPTU-Versuch

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
OCR	-	Überkonsolidierungsverhältnis
$q_c$	kN/m <sup>2</sup> ; MN/m <sup>2</sup>	Spitzenwiderstand der Drucksonde
$S_r$	-	Sättigungszahl
TOB	-	Tragschicht ohne Bindemittel (Straßenoberbau)
$t_p$	min; d	Zeitpunkt des Endes der Primärkonsolidierung (EOP)
$u$	kN/m <sup>2</sup>	Porenwasserdruck
$U$	-	Konsolidierungsgrad
$V_{Ca}$	M.-%	Kalkgehalt
$v_{FS}$	°/s	Drehgeschwindigkeit Flügelsondierung
$V_{gl}$	M.-%	Glühverlust
VIK	-	Vertikalinklinometer
$w_L$	%	Wassergehalt an der Fließgrenze
$w_n$	%	Natürlicher Wassergehalt
$w_P$	%	Wassergehalt an der Ausrollgrenze
$\varphi'$	°	Effektiver Reibungswinkel
$\varphi'_s$	°	Winkel der Gesamtscherfestigkeit
$\varepsilon_l$	-	Vertikale bzw. axiale Dehnung
$\varepsilon_v$	-	Volumendehnung
$\beta$	-	Faktor zur Untergrundverbesserung
$\lambda_{cu}^*$	-	Faktor für die lineare Erhöhung der undränierten Kohäsion
$\nu$	-	Querdehnzahl
$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	Korndichte
$\sigma'_{h,B}$	kN/m <sup>2</sup>	Effektive horizontale Bodenspannung
$\sigma'_{h,S}$	kN/m <sup>2</sup>	Effektive horizontale Säulenspannung
$\sigma'_{v,B}$	kN/m <sup>2</sup>	Effektive vertikale Bodenspannung
$\sigma'_{v,S}$	kN/m <sup>2</sup>	Effektive vertikale Säulenspannung
$\sigma'_p$	kN/m <sup>2</sup>	Maximale effektive vertikale Vorlastspannung
$\sigma_{v0}$	kN/m <sup>2</sup>	Totaler Überlagerungsdruck
$\sigma'_{v0}$	kN/m <sup>2</sup>	Effektive in situ bzw. aufgebrauchte vertikale Auflastspannung