



WOLFGANG REITMEIER

# Spannungs- und dehnungs- abhängiger Steifemodul $E_s(\sigma, \delta)$ bei bindigen Böden

Veröffentlicht in der International Scientific Conference CIB 2018 (Brasov - Romania)

Herausgegeben in Deutsch und Englisch

von Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG | Bahnhofstraße 8, D-84323 Massing | [csv@laumer.de](mailto:csv@laumer.de) | [www.laumer.de](http://www.laumer.de)



## Prof. Dr. - Ing. Wolfgang Reitmeier

Hochschule Konstanz mit Öffentlicher Prüfstelle  
für Baustoffe und Geotechnik

Vorsitzender des Unterausschusses  
Trockenmörtelsäulen der DGGT

84307 Eggenfelden/Gern, Ebenfeld 17

reitmeie@htwg-konstanz.de

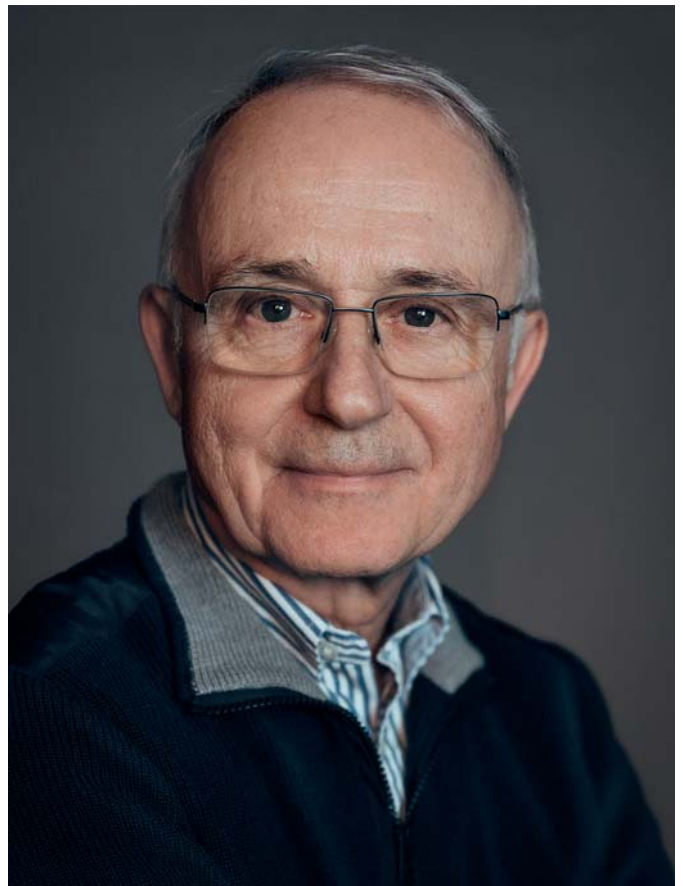
Der in Deutsch und Englisch verfasste Beitrag zur Ermittlung eines verbesserten Steifemoduls für die Abschätzung von Bauwerksverformungen ist eine zusammenfassende Veröffentlichung von aktuellen Forschungsergebnissen, durchgeführt an der HTWG Konstanz, für die praktische Anwendung.

Die Englische Fassung kann in **BULLETIN OF THE TRANSILVANIA UNIVERSITY OF BRASOV** unter folgendem Link [http://webbut.unitbv.ro/Bulletin/Series%20I/2018/BUT\\_CIB/Reitmeier\\_ver.1.pdf](http://webbut.unitbv.ro/Bulletin/Series%20I/2018/BUT_CIB/Reitmeier_ver.1.pdf) auch elektronisch abgerufen werden.



Im Rahmen von sechs Bachelor- und Masterarbeiten wurden die für die Ermittlung der dehnungsabhängigen Korrekturfaktoren erforderlichen Kompressionsversuche in der Öffentlichen Prüfstelle für Baustoffe und Geotechnik der Hochschule Konstanz in den Jahren 2014 bis 2016 durchgeführt.

Von 1996 bis 2016 war der Autor als Professor für das Fachgebiet Geotechnik an die Hochschule Konstanz berufen und in dieser Funktion auch Leiter des Sachgebietes Geotechnik der öffentlichen Prüfstelle für Baustoffe und Geotechnik.



Prof. Reitmeier war von 1999 bis 2006 Obmann des Arbeitskreises 2.8 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und leitet seit 2006 den Unterausschuss Trockenmörtelsäulen (CSV-Verfahren).

Das von ihm entwickelte CSV-Verfahren wurde 1996 auf der Baugrundtagung in Berlin vorgestellt und wird seit über zwei Jahrzehnten in Deutschland, Amerika und Asien ausgeführt.

Die in diesem Beitrag enthaltenen Bemessungsansätze wurden in zahlreichen Bauvorhaben bei der analytischen Abschätzung des Verformungsverhaltens auch baupraktisch umgesetzt und erprobt.

Als einfaches Beispiel wird die Abschätzung des Steifemodul nach dem Ansatz von Engel und Ohde einleitend für den Boden 2 [5] vorgestellt.

$$E_s = \frac{\sigma}{0,21 \cdot 0,341^{1,037} \cdot 0,144^{0,17}} = 20,2 \cdot \sigma$$

Für eine Spannung von 200 kN/m<sup>2</sup> berechnet sich der Steifemodul nach Engel zu:

$$E_s = 20,2 \cdot 200 = \mathbf{4.040 \text{ kN/m}^2}$$

Bei einer Spannungserhöhung von 200 auf 400 folgt nach Ohde:

$$\text{mit } \delta \left( \frac{200}{200} = 1,0 \right) \rightarrow v(1) = 20 \quad \omega(1) = 0,90$$

$$\text{mit } E_s (\sigma = 200, \delta = 1) = 100 \cdot 20 \left( \frac{200}{100} \right)^{0,90} = \mathbf{3.732 \text{ kN/m}^2}$$

Bei einer kleineren Spannungserhöhung von 200 auf 300 folgt mit Hilfe der Korrekturfaktoren:

$$\text{mit } \delta \left( \frac{100}{200} = 0,5 \right) \rightarrow v(0,5) = 27 \quad \omega(0,5) = 0,80$$

$$\text{mit } E_s (\sigma = 200, \delta = 0,5) = 100 \cdot 27 \left( \frac{200}{100} \right)^{0,80} = \mathbf{4.700 \text{ kN/m}^2}$$

# Spannungs- und dehnungsabhängiger Steifemodul $E_s(\sigma, \delta)$ bei bindigen Böden

Vorschlag zur Erweiterung des Potenzansatzes von Ohde unter Berücksichtigung der Größe der Laststeigerung, berechnet aus den Versuchsergebnissen von konventionellen Kompressionsversuchen mit reduzierter Laststeigerung

Die Abschätzung des Setzungsverhaltens erfolgt in Deutschland nach DIN 4019 i.a. durch Integration der Dehnungen über die Tiefe  $z$ . Hierzu wird der Steifemodul  $E_s$  benötigt, der mit Hilfe von einfachen Kompressionsversuchen ermittelt werden kann. Nach einer Lasteinwirkungszeit von 24 Stunden werden konventionell die Laststufen verdoppelt, um das Verhältnis der Messgrößen zur Fehlergröße klein halten zu können.

Damit verbunden sind aber bei bindigen Böden sehr hohe Dehnungen, die gegenüber den Dehnungen unter einem Baukörper deutlich größer sind. Dieser Abweichung von der Wirklichkeit begegnet die DIN 4019 mit dem Hinweis, dass wegen der vereinfachten Annahmen nur Schätzungen der Setzungen möglich sind, die nicht selten bis zu 50% unterschritten, in Ausnahmefällen auch überschritten werden. Ursache ist der bei konventionellen Kompressionsversuchen vernachlässigte Einfluss der Größe der Laststeigerung auf den Steifemodul. In der Literatur werden diese Zusammenhänge auch als small-strain-Effekte bezeichnet. Für eine verbesserte Setzungsprognose ist es daher erforderlich, auch die Größe der jeweiligen Spannungserhöhung bei der Festlegung des Steifemoduls in den einzelnen Bodenschichten mit zu berücksichtigen. Im folgenden Beitrag wird gezeigt, wie sich der Einfluss der Laststeigerung auf den Steifemodul im Sinne einer Erweiterung des Potenzansatzes von Ohde als mathematisches Modell ableiten lässt.

**Keywords** Steifemodul, Dehnung, Lasterhöhungsfaktor, Lastinkrement, small-strain, Kompressionsversuch, Potenzgesetz

## 1 Einleitung

Die versuchstechnische Untersuchung des Konsolidierungsverhaltens eines bindigen Bodens kann im Kompressionsversuch sowohl an aufbereitet eingebauten Proben, als auch in situ entnommenen ungestörten Bodenproben durchgeführt werden. Im klassischen Standardversuch werden die einzelnen Laststufen dabei jeweils verdoppelt. Mit diesen Versuchsrandbedingungen erhält man eine Abschätzung des Steifigkeitsverhaltens, das aber von den in situ gemessenen Bauwerksverformungen teils erheblich abweicht.

Ursache ist die im Standardversuch vorgegebene Größe der Spannungserhöhung (Lastverdoppelung) gegenüber der unter einem Fundament vor allem mit zunehmender Tiefe deutlich geringeren Spannungsänderung.

*In Germany, the estimation of the settling behavior is, according to DIN 4019, in general done by integrating the strains along the depth  $z$ . For this purpose, the stiffness modulus  $E_s$  is required, which can be determined by using simple compression tests. After a load time of 24 hours, the standard procedure is to double the load stages in order to keep the ratio of the measured variables to the error value small. For cohesive soils, this is, however, associated with very high elongations. These elongations are significantly greater than the elongations under a building foundation. DIN 4019 deals with this uncertainty with the notification that because of the simplified assumptions only an approximation of the settling is possible. These approximations are often inaccurate (i.e., they often overestimate the settling by 50% and, in exceptional cases, underestimate the settling). The reason for this is the influence of the magnitude of the load increase on the stiffness modulus, which is neglected in conventional compression tests. These relationships are also referred to as small-strain effects in the literature. Therefore, for an improved prediction of the settlement, the magnitude of the stress increase needs to be considered in every individual layer during the estimation of the stiffness modulus. This article shows how the influence of the load increase on the stiffness modulus can be derived as a mathematical model by extending the power theorem of Ohde.*

**Keywords** stiffness modulus, Dehnung, Lasterhöhungsfaktor, Lastinkrement, small-strain, Kompressionsversuch, Potenzgesetz

Anhand von konventionellen Kompressionsversuchen mit angepasstem Lastinkrement ist versuchstechnisch eine präzisere Abschätzung der Steifemoduli  $E_s(\sigma, \delta)$  möglich, so dass mit spannungs- und dehnungsabhängigen Rechenwerten in der Praxis realitätsnähere Abschätzungen des Verformungsverhaltens möglich sind.

Der Beitrag konzentriert sich ausschließlich auf den Einfluss des Lastinkrements, d.h. den Einfluss der Lasterhöhung auf die Größe des Steifemoduls in den für Setzungsrechnungen relevanten Spannungsbereichen.

Untersuchungen zur Frage der Grenztiefe, d.h. bis zu welcher Tiefe Verformungen aus Spannungsänderungen nach

deutscher Norm berücksichtigt werden müssen, sind nicht Gegenstand dieses Beitrags. Hierzu wird z.B. auf die im Aufsatz von Alters dargestellten Zusammenhänge verwiesen.

Zunächst wird die Ableitung des Potenzgesetzes für den Standardversuch, also mit Lastverdoppelung und unter Berücksichtigung der Größe der Laststeigerung, beispielhaft gegenübergestellt.

$$\text{Dehnung } \epsilon = \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i} \quad h_i \text{ Ausgangshöhe } h_{i+1} \text{ Höhe nach Spannungsänderung}$$

Spannungs-/Lastinkrement  $\Delta\sigma$

$$\text{Spannungs-/Lasterhöhungsfaktor } \delta_i = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} \quad \begin{array}{l} \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = 0 \text{ keine Laststeigerung} \\ \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = 1 \text{ Lastverdoppelung} \end{array}$$

Steifemodul aus dem Ödometerversuch  $E_{oed}$   
Probenhöhe beim Einbau in den Ödometer  $h_a$   
bezogene Setzung  $s' = \Delta h / h_a$

## 2. Konventionelle Kompressionsversuche

Für die Auswertung eines gestörten Kompressionsversuchs, bei dem der Boden nahe der Fließgrenze  $w_L$  eingebaut werden sollte, müssen zusätzlich die Feuchtmasse  $m_f$  beim Einbau und der Wassergehalt  $w_{n \text{ Ausbau}}$  beim Ausbau bestimmt werden.

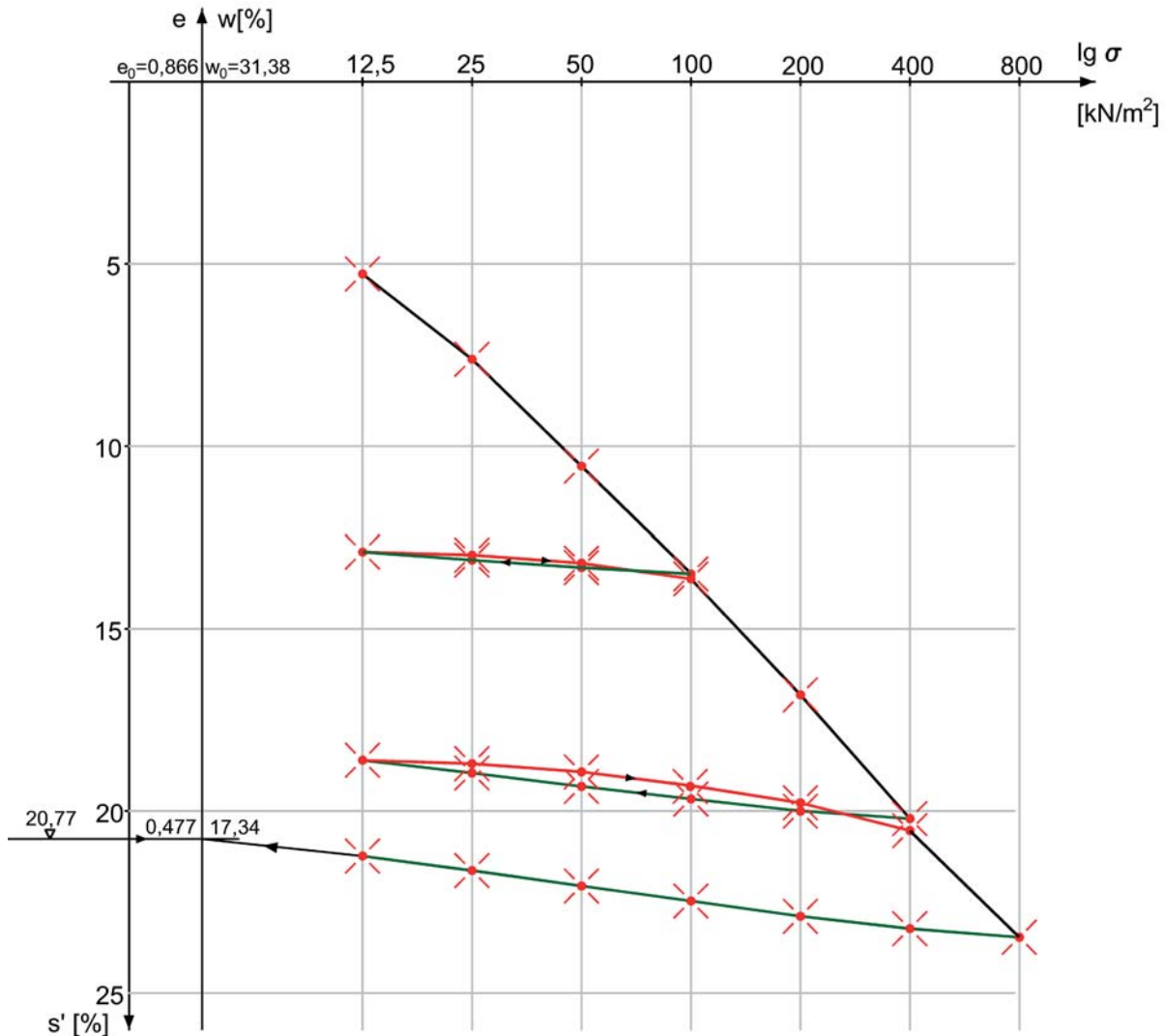
Beginnend mit einer Laststufe von z.B. 12,5 kN/m<sup>2</sup> werden nach einer Lasteinwirkungszeit von 24 Stunden die weiteren Laststufen jeweils verdoppelt und 24 Stunden konstant gehalten.

Für die Auftragung der Versuchsergebnisse benötigt man die bezogene Setzung  $s' = \frac{\Delta h}{h_a}$  beim Ausbau, die dem zugehörigen Wassergehalt  $w_{n \text{ Ausbau}}$  entspricht. Bringt man diese Kenndaten in der grafischen Darstellung zur Übereinstimmung, ergibt sich eine einfache Proportionalität des Spannungszustandes zum zugehörigen Wassergehalt des Bodens.

Der Steifemodul  $E_{oed}$  kann so aus der Grafik für den in situ relevanten Spannungszustand sowohl über die Spannungsgröße als auch den Wassergehalt oder die Porenzahl abgelesen werden.

$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12,5	25	50	100	50	25	12,5	25	50	100	200	400	200	100	
$\Delta s$ [mm]	1,008	1,455	2,015	2,577	2,544	2,505	2,463	2,479	2,521	2,603	3,211	3,860	3,821	3,757	
$s'$	5,28	7,62	10,55	13,49							16,81	20,21			
$\sigma$	50	25	12,5	25	50	100	200	400	800	400	200	100	50	25	12,5
$\Delta s$	3,691	3,621	3,554	3,572	3,615	3,687	3,777	3,923	4,482	4,437	4,372	4,292	4,213	4,132	4,056
$s'$									23,47						

**Tabelle 1** Beispiel: Messdaten eines konventionellen Kompressionsversuchs (Boden 2) [5]  
Example of measurement data from a conventional compression experiment (soil 2)



**Bild 1** Kompressionsversuch (konventionell) [5]  
*Compression test (conventional)*

### 3. Kompressionsversuch mit reduziertem Lastinkrement

Alle Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Laststeigerung auf den Steifemodul wurden zur Gewährleistung einheitlicher Ausgangsbedingungen mit Einbau eines homogenisierten Bodens nahe der Fließgrenze durchgeführt.

Für jeden Boden wurden zur Ermittlung der in Bild 5 und 6 dargestellten Geraden vier Kompressionsversuche mit reduzierten Laststeigerungen und ergänzend mit einem konventionellen Versuch durchgeführt. Die reduzierten Laststeigerungen erfolgten in sieben Einzelschritten mit einem gleichbleibenden Lasterhöhungsfaktor von  $\delta_i = 0,1041$ .

Zur Gewährleistung einheitlicher Ausgangsbedingungen wurde jede Probe zunächst bis zur jeweiligen Ausgangsspannung (im Beispiel 50 kN/m<sup>2</sup>) belastet, entlastet und wieder bis zur Ausgangsspannung mit konventionellen Laststufenschritten und einer Lasteinwirkungszeit von jeweils 24 Stunden belastet.

Beispielhaft sind diese Versuchsergebnisse für die Laststeigerung von 50 kN/m<sup>2</sup> auf 100 kN/m<sup>2</sup> in der nachfolgenden Tabelle angegeben.



In Bild 2 ist gut zu erkennen, dass sich bei der Belastung mit reduziertem Lasterhöhungsfaktor im Spannungsbereich von 50 kN/m<sup>2</sup> bis 100 kN/m<sup>2</sup> die Verformungen der Bodenprobe gegenüber dem Standardversuch reduzieren.

Damit bestätigt sich die Erfahrung der Praxis, nach der neben der Größe der Spannungserhöhung auch die jeweilige Größe der einzelnen Lastschritte und damit implizit auch die Belastungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf das Verformungsverhalten hat.

Erhöht man die Spannungen z.B. von 50 auf 55,2 kN/m<sup>2</sup>, ergibt sich für dieses Lastinkrement ein deutlich größerer Steifemodul im Vergleich zu jedem höheren Lastinkrement.

Für die weitere Bearbeitung wird der Sekantenmodul  $E_S$  für alle Zwischenschritte nach Gleichung 1 berechnet.

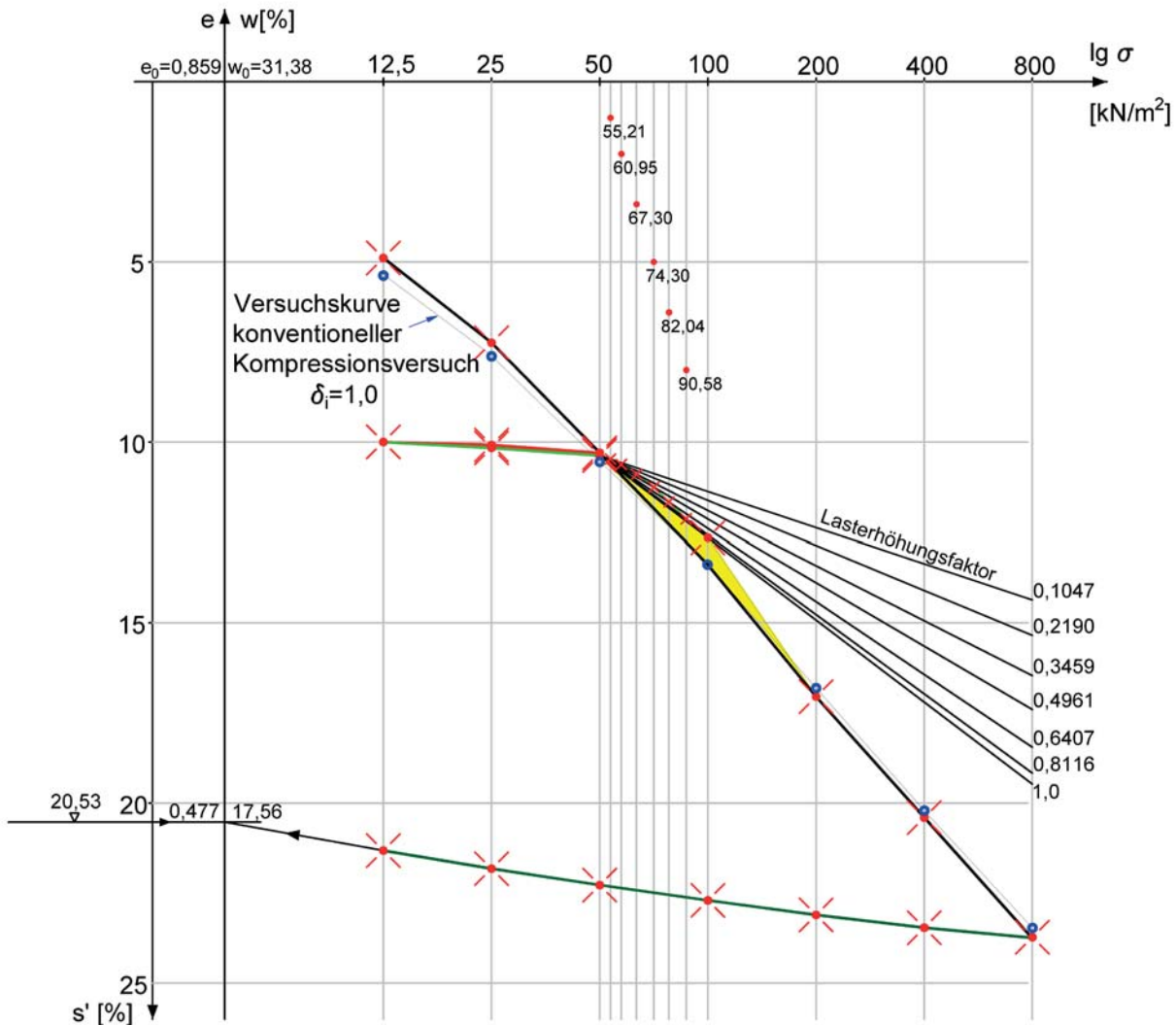
$$E_S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta s'} (1 - s'_1) \quad \text{Gleichung 1}$$

Anmerkung:  $s'_1$  - bezogene Setzung vor Spannungserhöhung

$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12,5	25	50	25	12,5	25	50	55,21	60,95	67,30	74,30	82,04	90,58	100
$\Delta s$ [mm]	0,934	1,383	1,967	1,941	1,909	1,925	1,981	2,000	2,029	2,081	2,149	2,228	2,317	2,416

$\sigma$	200	400	800	400	200	100	50	25	12,5
$\Delta s$	3,691	3,621	3,554	3,572	3,615	3,687	3,777	3,923	4,482
$s'$	3,256	3,897	4,531	4,481	4,413	4,336	4,255	4,168	4,072

**Tabelle 2 Beispiel: Messdaten eines Kompressionsversuchs mit reduziertem Lastinkrement (Ausgangsspannung 50 kN/m<sup>2</sup>) [5]**  
Sample data of a compression test with reduced load increment (starting from 50 kN/m<sup>2</sup>)



**Bild 2 Kompressionsversuch mit reduziertem Lasterhöhungsfaktor [5]**  
Compression test with reduced load increment

**4. Ableitung eines spannungsabhängigen Steifemoduls  $E_{oed}$  mit den im Kompressionsversuch gewonnenen Verformungsdaten**

Trägt man den Sekantenmodul  $\ln\left(\frac{E_S}{\sigma_{at}}\right)$  in doppelt logarithmischem Maßstab  $\ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}}\right)$  auf, liegen die Sekantenmoduli näherungsweise auf einer Geraden. Als Parameter der Gleichung können der Steifebeiwert  $\nu$  und der Steifeexponent  $\omega$  abgeleitet werden:

$$\text{Steifebeiwert } \nu(0) = e \ln \frac{E_S}{\sigma_{at}} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\nu(0) \rightarrow \sigma = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Steifeexponent } \omega = \tan \alpha = \frac{\Delta \ln \frac{E_S}{\sigma_{at}}}{\Delta \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{at}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Mit  $\sigma_{at} = 100 \text{ kN/m}^2$  kann der von Ohde [7] vorgeschlagene Potenzansatz nach Gleichung 4 abgeleitet werden.

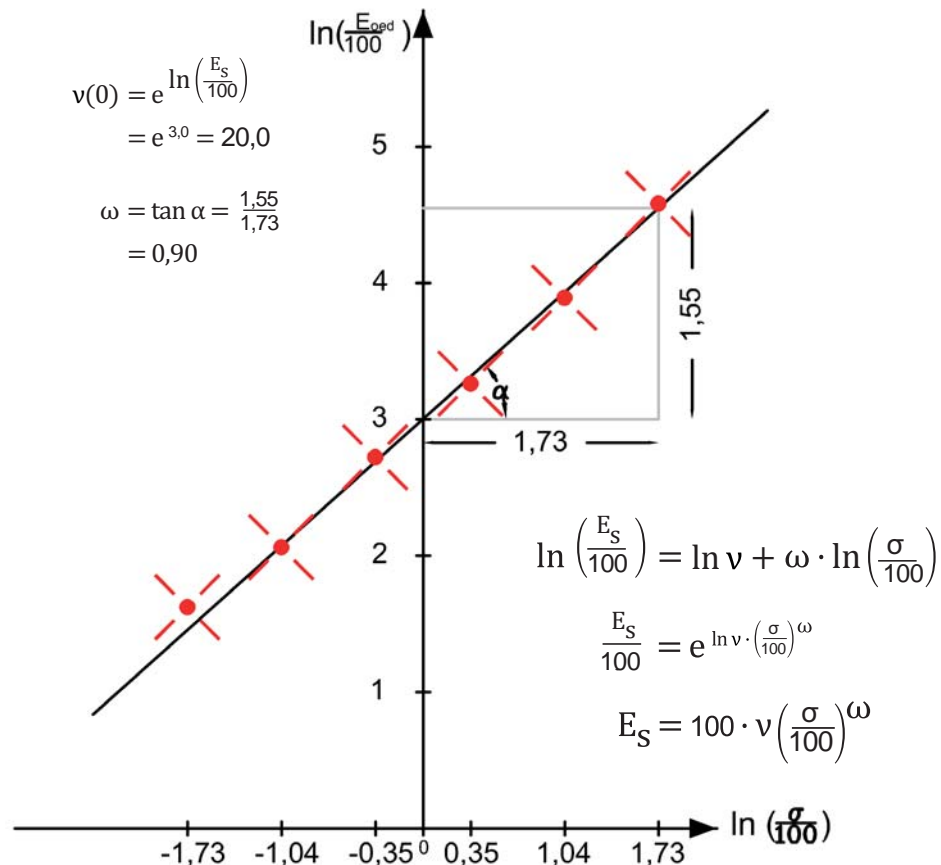
Als Zuordnung des im Spannungsintervall  $(\sigma_i - \sigma_{i+1})$  abgeleiteten Sekantenmoduls wird das geometrische Mittel  $\sigma_m = \sqrt[2]{\sigma_i \cdot \sigma_{i+1}}$  aus den beiden Spannungen vorgeschlagen.

$$E_S = \sigma_{at} \cdot \nu \left(\frac{\sigma}{\sigma_{at}}\right)^\omega \quad \text{Gleichung 4}$$

$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12,5	25	50	100	200	400	800
$s'$ [%]	5,277	7,618	10,550	13,492	16,812	20,209	23,466
$E_{oed}$	506	788	1520	2606	4898	9799	
$\sigma_m$	17,68	35,36	70,71	141,42	282,84	565,69	
$\ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{at}}$	-1,73	-1,04	-0,35	0,35	1,04	1,73	
$\ln \frac{E_{oed}}{100}$	1,62	2,06	2,72	3,26	3,89	4,58	

**Tabelle 3 Datenaufbereitung der Werte von Tabelle 1 für die Ableitung von  $\nu$  und  $\omega$  Boden 2 [5]**

*Data processing of the values from table 1 for the derivative of  $\nu$  and  $\omega$  (soil 2)*



**Bild 3** Ableitung des Potenzansatzes nach Ohde [5]  
*Derivation of the power law of Ohde*

## 5. Erweiterung des spannungsabhängigen Steifemoduls $E_s$ mit Berücksichtigung des Einflusses der Größe der Laststeigerung

Bei allen Laststufen wurde eine einheitliche Lasteinwirkungszeit von 24 Stunden gewählt. Die Auswertung des Zeit-Setzungs-Verlaufs ergab bei allen Proben einen vernachlässigbaren Einfluss von Sekundärverformungen (Kriechen) im Verhältnis zu den Primärverformungen.

In Bild 2 sind ergänzend zu den Ergebnissen des Standardversuchs (blaue Punkte) auch die zugehörigen Spannungen und Steigungen für sieben aufeinanderfolgende Zwischenschritte (Lasterhöhungsfaktor konstant mit  $\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = 0,1041$ ) dargestellt.

Bei der Ermittlung der Steigungen ist darauf zu achten, dass die nach Gleichung 1 ermittelten Sekantenmoduli von der jeweiligen Ausgangsspannung, im Beispiel also von  $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ , nach erfolgter Entlastung und Wiederbelastung verwendet werden muss, um eine möglichst genaue Datenerfassung auch bei kleinen Verformungszuwächsen im sich anschließenden Erstbelastungsast zu gewährleisten.

Gegenüber der Verformung, die aus nur einem Lastschritt resultiert, werden bei einer stufenweisen Laststeigerung deutlich reduzierte Endverformungen gemessen. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Lasteinwirkungszeit, entsprechend der Anzahl der Zwischenschritte, wesentlich größer ist.

Um bei der Bestimmung des Steifemoduls  $E_s$  in der praktischen Anwendung auf jeden Lasterhöhungsfaktor zugreifen zu können, müssen die Steigungen der schrittweisen Belastung an die Standardkurve mit  $\delta(1)$  angepasst werden.

Alternativ könnte man auch mit sieben unterschiedlichen Laststeigerungsfaktoren, in dann sieben Einzelversuchen, die an die Standardkurve angepassten Versuchsergebnisse direkt ermitteln. Allerdings erhöht sich dadurch die Versuchsanzahl für jeden Boden von 5 auf mindestens 25 Einzelversuche.



Einfacher ist es, die Versuchsergebnisse, ermittelt in einer stufenweisen Belastung, an die Standardgerade anzupassen.

Hierzu wird die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise vorgeschlagen.

Bekannt ist die Steigung für  $\delta_a$  (0,1041) und die Steigung  $\delta_a$  (1,0) bei stufenweiser Lasterhöhung. Ebenfalls bekannt aus dem Standardversuch ist die Steigung  $\delta_b$  (1).

Die Indizes a stehen für eine stufenweise Belastung, b für den Standardversuch und c für die Korrektur bzw. Anpassung an die Standardkurve.

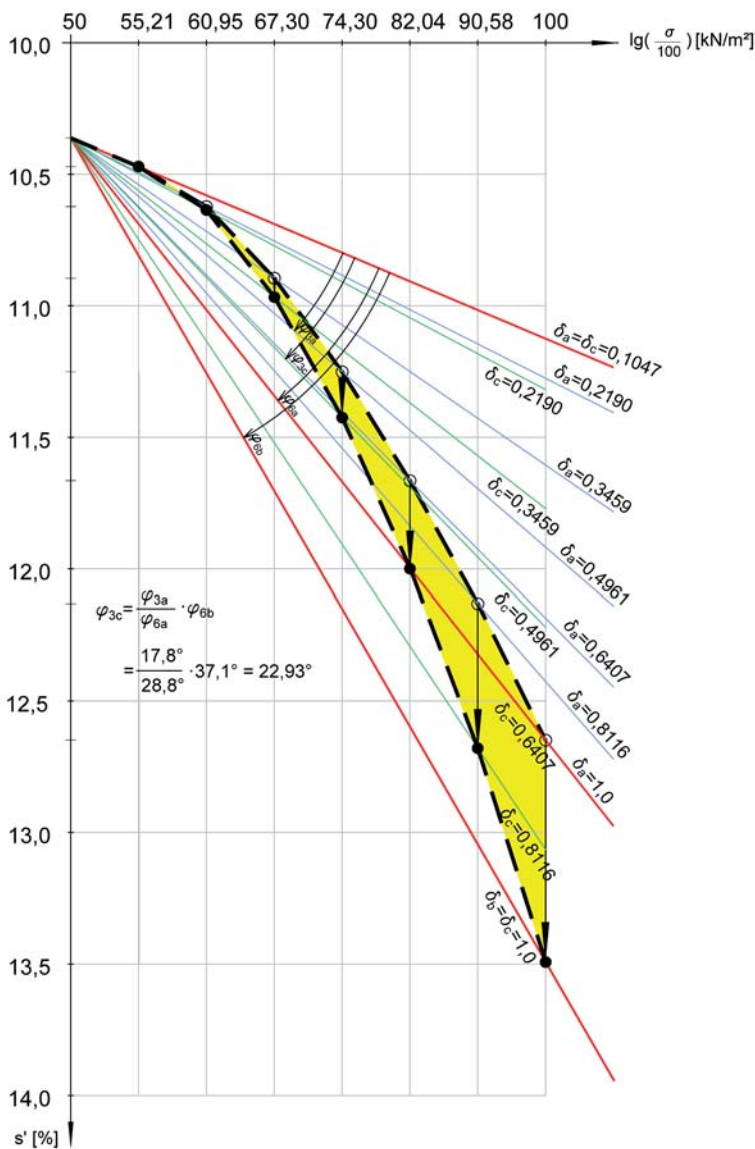
Die Steigung  $\delta_a$  (0,1041) wurde mit nur einem Belastungsschritt ermittelt und kann damit als Ausgangswert für die Winkelanpassung herangezogen werden. Alle Steigungen der korrigierten Werte von  $\delta_c$  (0,2190) bis  $\delta_c$  (0,8116) berechnen sich nach Gleichung 5.

$$\varphi_{ic} = \frac{\varphi_{ia}}{\varphi_{6a}} \cdot \varphi_{6b} \quad \text{Gleichung 5}$$

Die nach Gleichung 5 durchzuführende Korrektur der Steigungen und damit der Anpassung und Reduzierung der Steifemoduli wurde durch mehrere Kompressionsversuche in unterschiedlichen Spannungsbereichen und mit unterschiedlichen Lasterhöhungsfaktoren überprüft, in denen eine Laststeigerung mit nur einem Laststeigerungsschritt, z.B. für einen Laststeigerungsfaktor von  $\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = \frac{74,30 - 50,0}{50} = 0,486$  gefahren wurde.

Der Unterschied zwischen Berechnung und versuchstechnischer Ermittlung liegt in einer vernachlässigbaren Größenordnung.

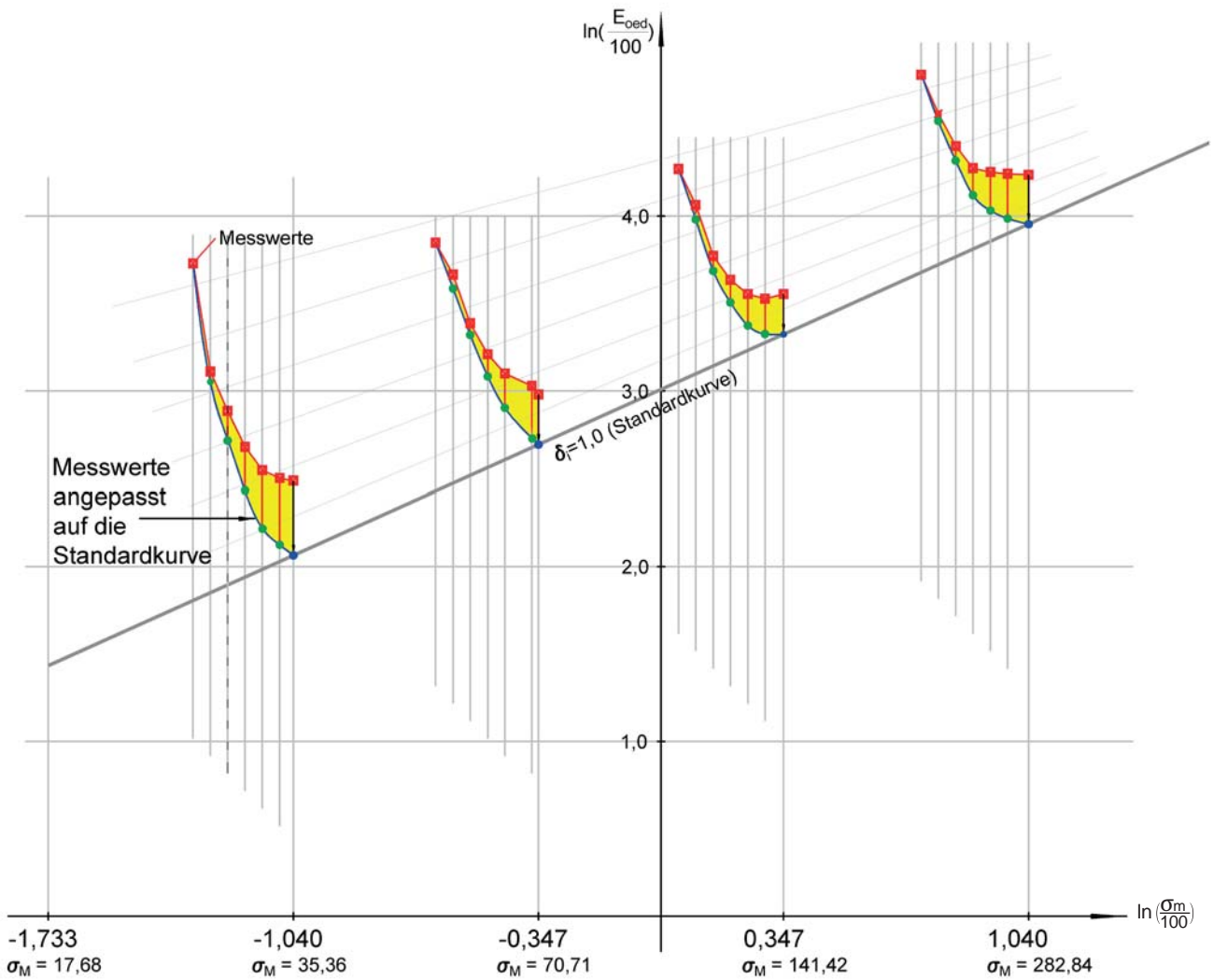
In Bild 4 wird für das Spannungsintervall 50 bis 100 kN/m<sup>2</sup> gezeigt, wie mit der in Gleichung 5 angegebenen Korrektur die Anpassung des zweiten bis siebten Lastinkrements aus einer stufenweisen Belastung an die Standardkurve für eine Laststeigerung ohne Zwischenschritte erfolgen kann.



**Bild 4** Korrektur der Sekantenneigungen für eine schrittweise Belastungssteigerung mit sieben Lastinkrementen zur Anpassung an die Standardkurve [5]

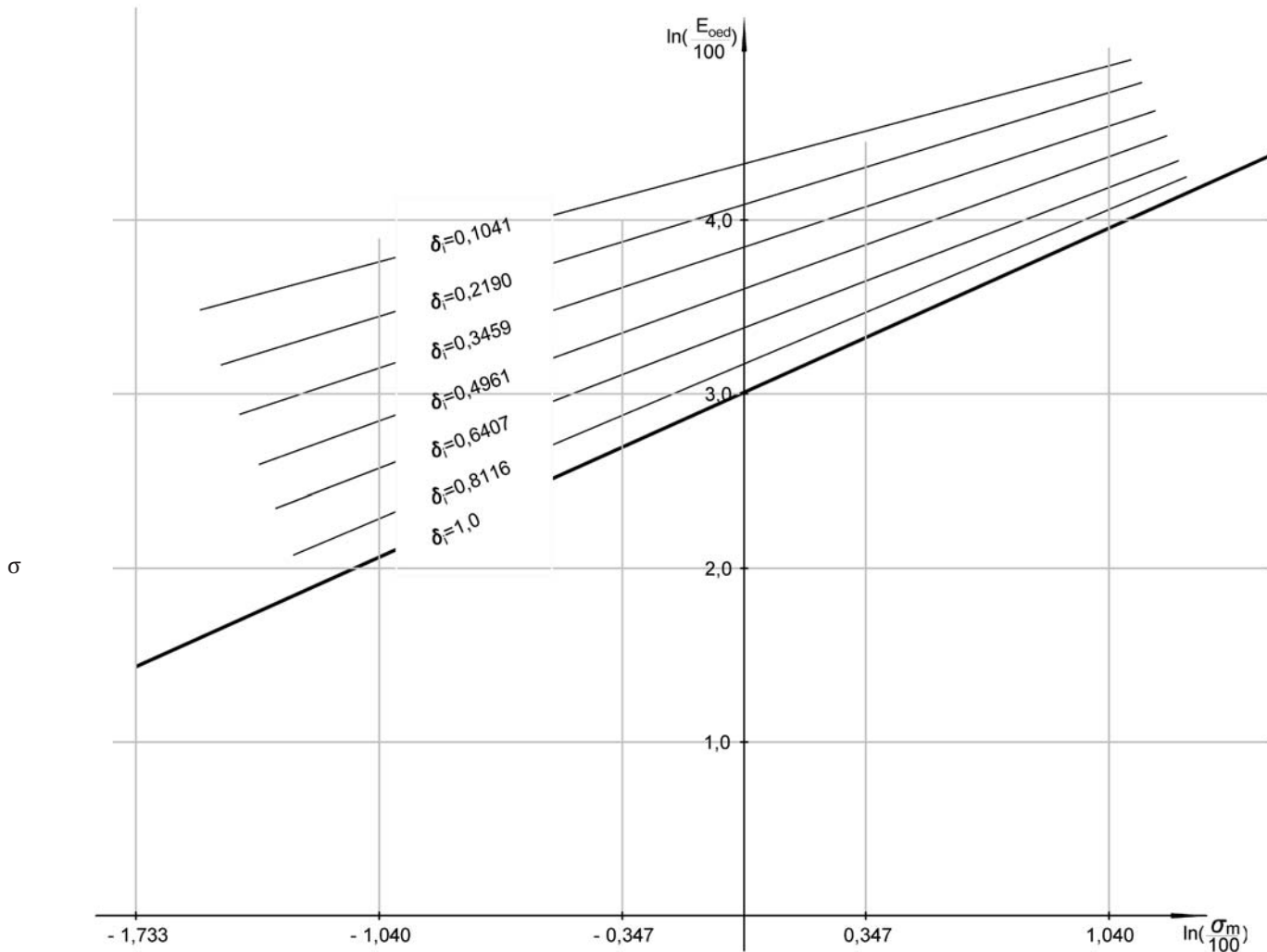
Correction of the incline of the secant for a gradual increase in stress with seven load increments for adaption to the standard curve

Bild 5 zeigt die Standardgerade und die zugehörigen Versuchspunkte mit sieben einzelnen Laststeigerungen für vier unterschiedliche Ausgangsspannungen  $\sigma$  (25, 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup>).



**Bild 5** Kurven gleicher Lasterhöhung nach dem Ansatz von Ohde mit Eintragung der vom Lastinkrement abhängigen Steifemoduli  $\ln\left(\frac{E_{oesd}}{100}\right)$  [5]  
 rot  $\equiv$  Messdaten, grün  $\equiv$  nach Bild 4 korrigierte Messdaten in den gewählten vier Spannungsbereichen (25, 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup>)  
 Curves of the same elevation of stress according to the approach of Ohde with the from the load increment dependent stiffness moduli  $\ln\left(\frac{E_{oesd}}{100}\right)$   
 red  $\equiv$  measured data, green  $\equiv$  corrected measurement data according to figure 4 shown for the selected four stress areas (25, 50, 100 and 200 kN/m<sup>2</sup>)

Alle Versuchsergebnisse unterliegen sowohl messtechnischen als auch statistischen Streuungen. Mit einer einfachen linearen Regression erfolgt für die Ableitung des Steifebeiwertes  $\nu(\delta)$  und des Steifeexponenten  $\omega(\delta)$  eine Glättung der Daten.



**Bild 6** Laststeigerungskurven für sieben Einzelschritte [5]  
*Load increase curves for seven individual steps*

Für jede vom Lastinkrement abhängige Gerade kann der Steifebeiwert  $\nu(\delta)$  und der Steifeexponent  $\omega(\delta)$  berechnet werden.

Trägt man  $\nu(\delta)$  und  $\omega(\delta)$  als Funktion des Lastinkrements auf, entstehen die in Bild 7 und Bild 8 dargestellten Versuchskurven.

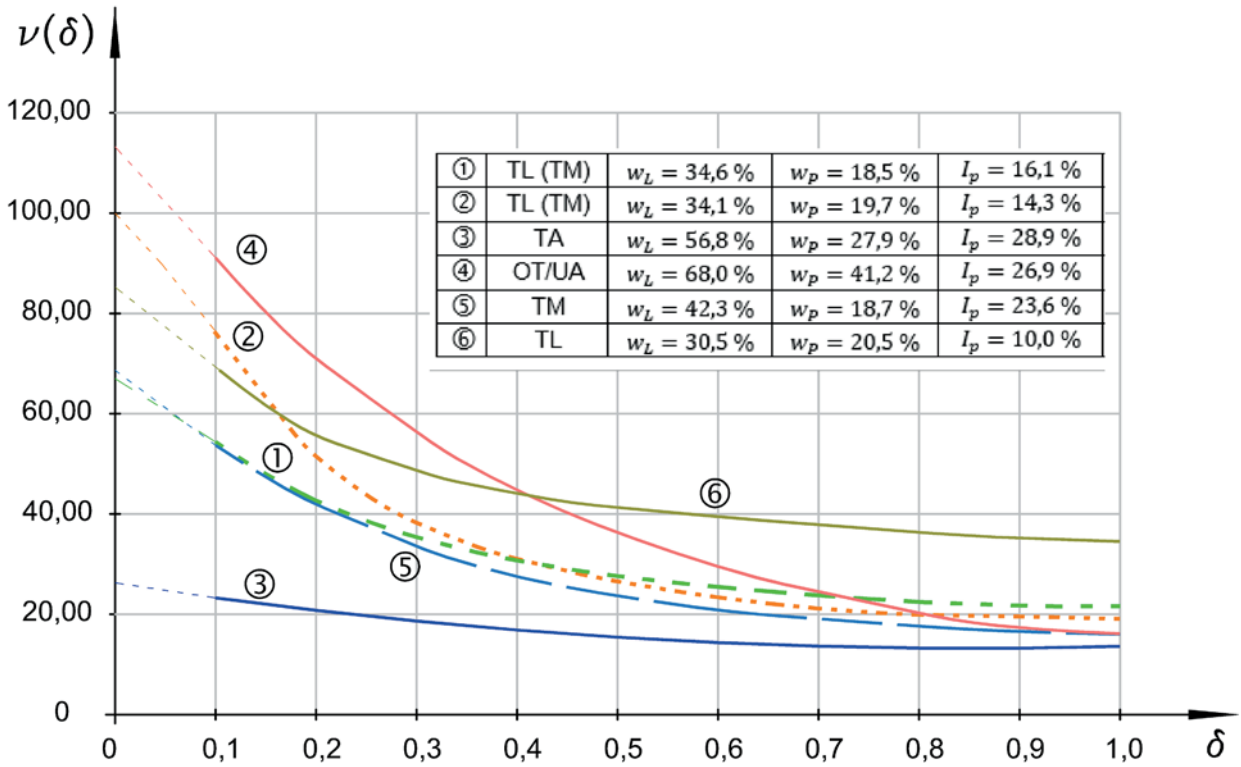
In den Bildern 7 und 8 wurde ergänzend der Kurvenverlauf bis zu einer abnehmenden Laststeigerung von  $\Delta\sigma \rightarrow 0$ , also für ein Lastinkrement von Null, extrapoliert.

Bei Lastverdoppelung enden die Kurven in den Standardwerten  $\nu(1)$  und  $\omega(1)$  des Kompressionsversuchs und damit bei einem Lastinkrement von eins.

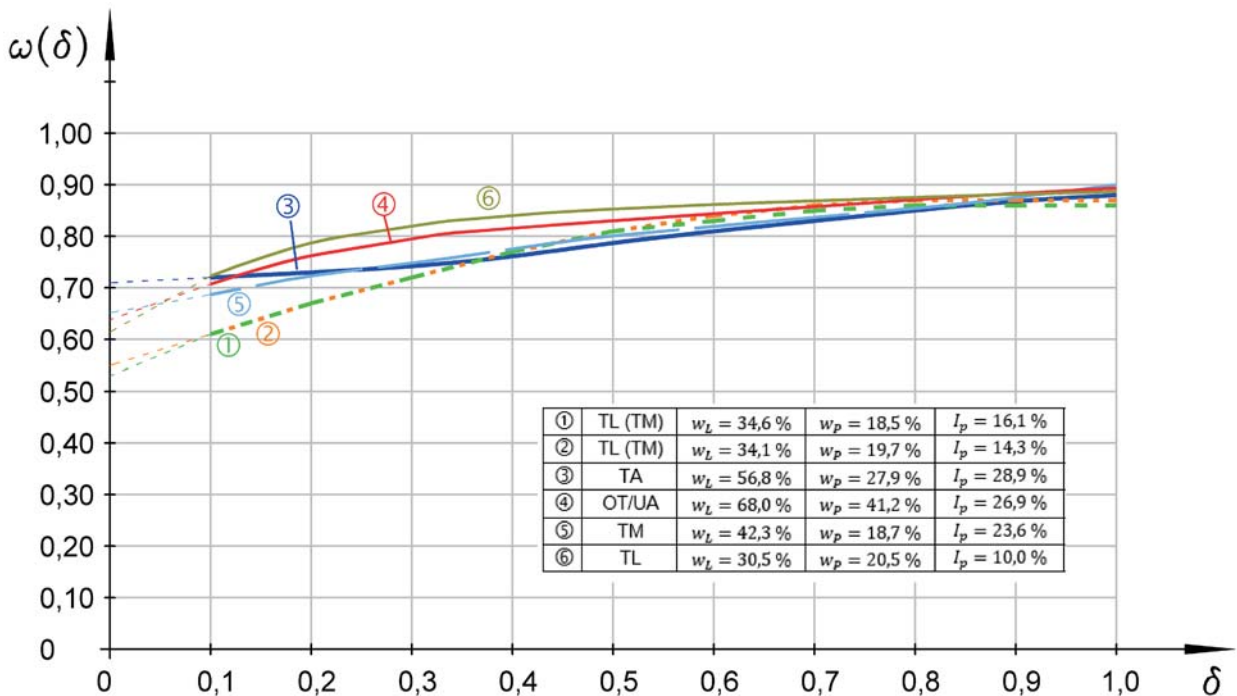
Die bodenmechanischen Kennwerte der in den Bildern 7 und 8 dargestellten sechs Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

1	TL (TM)	$w_L=34,6\%$	$w_P=18,5\%$	$I_P=16,1\%$	Seeton Konstanz [6]
2	TL (TM)	$w_L=34,1\%$	$w_P=19,7\%$	$I_P=14,4\%$	Eggenfelden Bayern [5]
3	TA	$w_L=56,8\%$	$w_P=27,9\%$	$I_P=28,9\%$	Essenrode Niedersachsen [4]
4	OT/UA	$w_L=68,0\%$	$w_P=41,2\%$	$I_P=26,8\%$	Wehr Baden-Württemberg [3]
5	TM	$w_L=42,3\%$	$w_P=18,7\%$	$I_P=23,6\%$	Überlingen B.-W. [1]
6	TL	$w_L=30,5\%$	$w_P=20,5\%$	$I_P=10,0\%$	Friedrichshafen B.-W. [2]

**Tabelle 4** bodenmechanische Kennwerte der untersuchten Böden  
*soil mechanical characteristics of the soil studied*



**Bild 7** Steifebeiwert  $\nu(\delta)$  in Abhängigkeit der Größe der Laststeigerung [1-6]  
*Stiffness coefficient  $\nu(\delta)$  as a function of the magnitude of the load increase*



**Bild 8** Steifeexponent  $\omega(\delta)$  in Abhängigkeit der Größe der Laststeigerung [1-6]  
*Stiffness exponent  $\omega(\delta)$  as a function of the magnitude of the load increase*

## 6. Schema für die praktische Umsetzung

Für die praktische Berechnung einer Setzungsprognose kann schichtenweise der vom Lasterhöhungsfaktor  $\delta_i$  abhängige Steifemodul  $E_s(\sigma, \delta_i)$  aus den Ödometerwerten  $E_{oed}$ , wie nachfolgend aufgezeigt, ermittelt werden.

6.1 Abschätzung des Ödometerwertes  $E_{oed}$  z.B. aus Drucksondierungen (CPT), Kompressionsversuchen oder sonstigen Erfahrungswerten für jede einzelne Bodenschicht  $i \rightarrow$  damit ist gegeben  $E_{oed}$ .

6.2 Berechnung der zugehörigen Spannung  $\sigma_i$  zu  $E_{oed}$  im Kompressionsversuch mit einem Lasterhöhungsfaktor von  $\delta_i=1 \rightarrow v(1)$  und  $\omega(1)$ .

aus  $E_{oed}(\sigma_i) = \sigma_{at} v(1) \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{at}}\right)^{\omega(1)}$  folgt für die Spannung

$$\sigma_i = \sigma_{at} \left(\frac{E_{oed}(\sigma_i)}{\sigma_{at} \cdot v(1)}\right)^{\frac{1}{\omega(1)}} \quad \text{Gleichung 6}$$

6.3 Ermittlung des aus der Bauwerkslast in der Schicht  $i$  resultierenden Spannungszuwachses  $\Delta\sigma_\omega$

$$\Delta\sigma_\omega; f(\sigma_o, a, b, z)$$

## 7. Fachtechnische Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Das Verformungsverhalten bindiger Böden wird vor allem bei kleinen Laststeigerungen auch vom Strukturwiderstand und der hydraulischen Anfangsgradienten beeinflusst. Unter Strukturwiderstand des Bodens wird eine Spannungsgröße verstanden, die überschritten werden muss, damit die Widerstände in den Kontaktstellen der Bodenteilchen überwunden werden und eine Verformung des Bodens möglich wird. Mit Anfangsgradienten wird das hydraulische Gefälle bezeichnet, bis zu dem kein Wasser aus den Poren des Bodens ausgedrückt werden kann, d.h. beim wassergesättigten Boden keine Konsolidierung stattfindet. Erst nach Überschreiten dieses Schwellenwertes kann der Konsolidierungsprozess des Bodens beginnen, der mit dem Abbau der durch die Lasterhöhung verursachten Porenwasserüberdrücke dann wieder endet.

Bei Tonmineralen, die als Schichtsilikate betrachtet werden können, wird das Verformungsverhalten maßgeblich

6.4 Ermittlung des in der Bodenschicht  $i$  vorhandenen Spannungserhöhungsfaktors

$$\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i}$$

6.5 Ermittlung des Steifebeiwertes  $v(\delta_i)$  und des Steifeexponenten  $\omega(\delta_i)$  für den in Abschnitt 6.4 berechneten Lasterhöhungsfaktor  $\delta_i$  mit Hilfe von Bild 7 und Bild 8

6.6 Ermittlung des verbesserten Steifemoduls  $E_{si}(\sigma_i, \delta_i)$  für die Verformungsberechnung in der Schicht  $i$ .

$$E_{si}(\sigma_i, \delta_i) = \sigma_{at} \cdot v(\delta_i) \cdot \left[\frac{\sigma_i}{\sigma_{at}}\right]^{\omega(\delta_i)} \quad \text{Gleichung 7}$$

6.7 Integration aller Verformungsanteile in den Schichten  $i$  von  $i=0$  bis zur Grenztiefe.

$$\Delta s = \int_{i=0}^{t_{gr}} \frac{\sigma_{wi}}{E_{si}(\sigma_i, \delta_i)} dz \quad \text{Gleichung 8}$$

Im Vergleich zu einer Setzungsprognose ohne Berücksichtigung des Einflusses des Laststeigerungsfaktors vereinfacht sich das Integral zu

$$\Delta s = \int_{i=0}^{t_{gr}} \frac{\sigma_{wi}}{E_{si}(\sigma_i, \delta_{i=1})} dz \quad \text{Gleichung 9}$$

auch von der Anzahl und der Wertigkeit der Kationen innerhalb der Silikatschichten beeinflusst. Abhängig vom Abstand der Kationen von der Oberfläche sind die anhaftenden Wassermoleküle unterschiedlich stark gebunden, sodass Strömungsvorgänge erst bei Überschreiten eines Schwellenwertes ausgelöst werden.

Eine zutreffende Abschätzung des Verformungsverhaltens mit den im Kompressionsversuch ermittelten Steifemodulen setzt aber voraus, dass die nach Abschluss der Primärkonsolidierung eintretenden Kriechverformungen vernachlässigbar klein sind. Daher ist die Auswertung von Kompressionsversuchen an Böden, die Kriechsetzungen aufweisen, nicht ganz eindeutig.

Bei den in diesem Beitrag untersuchten Böden ist der gemessene Einfluss des Kriechens auf den von der Laststeigerung abhängigen Steifemodul vernachlässigbar gering.



## 8. Beispiele für die praktische Anwendung

### Beispiel 1:

**Boden Nr. 1** - Bodengruppe nach DIN 18196 TL an der Grenze zu TM. Aus einem charakteristischen Bodenprofil von Konstanz in der Tiefe -15,0m unter GOK und einem 5-geschossigen Bauvorhaben wird als bekannt vorgegeben:

$q_c = 0,6 \text{ MN/m}^2$  (Spitzenwiderstand aus Drucksondierung CPT)

$\sigma_{\bar{u}}(z = 15,0 \text{ m}) = 153 \text{ kN/m}^2$  (Überlagerungsspannung)

$\Delta\sigma_z(z = 15,0 \text{ m}) = 30 \text{ kN/m}^2$  (Spannungsänderung infolge Bauwerkslast)

Abschätzung eines spannungsabhängigen Steifemoduls  $E_s(\sigma)$  aus dem Spitzenwiderstand einer Drucksondierung nach DIN 4094:

$$v = 15,2 \cdot q_c + 50 = 15,2 \cdot 0,6 + 50 = 59,12 \quad \omega = 0,70$$

$$E_s = v \cdot p_a \left[ \frac{\sigma_{\bar{u}} + 0,5 \cdot \Delta\sigma_z}{p_a} \right]^w = 59,12 \cdot 100 \left[ \frac{153 + 0,5 \cdot 30}{100} \right]^{0,70} = 8.500 \text{ kN/m}^2$$

Ausgangswert für  $\delta_i = 1$ :  $E_{oed}(z = 15,0 \text{ m}) = 8.500 \text{ kN/m}^2$

$$v(1,0) = 21,5 \quad \omega(1,0) = 0,86$$

zugehörige Spannung nach Abschnitt 6.2

$$\sigma_i = 100 \left( \frac{8500}{100 \cdot 21,5} \right)^{\frac{1}{0,86}} = 494,5 \text{ kN/m}^2$$

mit  $\delta_i = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = \frac{30}{494,5} = 0,06$  folgt für  $v(0,06)$  und  $\omega(0,06)$  aus Bild 7 und Bild 8  
 $v(0,06) = 60,0$  und  $\omega(0,06) = 0,59$

Damit folgt nach Abschnitt 6.5 für  $E_{si}(\sigma_i, \delta_i)$

$$E_{si}(494,5; 0,06) = 100 \cdot 60,0 \cdot \left[ \frac{494,5}{100} \right]^{0,59} = 15.406 \text{ kN/m}^2$$

### Beispiel 2:

**Boden Nr. 2** - Bodengruppe nach DIN 18196 TL an der Grenze zu TM

Berechnet werden die Steifemoduli unter Berücksichtigung des jeweiligen Spannungsinkrements  $\delta_i$  in den Tiefen von -1,5 m und -5,0 m unter GOK.

Unter einem starren Fundament mit den Abmessungen 5,0 m x 2,5 m (Lasteinleitungsebene = GOK) erhöht sich die Normalspannung  $\sigma_w$  infolge einer Bodenpressung von  $\sigma_0 = 100 \text{ kN/m}^2$  im kennzeichnenden Punkt in der Tiefe von -1,5m um  $\Delta\sigma = 38,0 \text{ kN/m}^2$  und in der Tiefe von -5,0 m um  $\Delta\sigma = 15,0 \text{ kN/m}^2$ .

Die Wassergehalte in -1,5 m und -5,0 m Tiefe seien mit 22,6 % und 24,0 % bekannt.

Mit den in Bild 1 dargestellten Versuchsdaten können die Wassergehalte im Kompressionsversuch einem Spannungszustand von  $\sigma = 87 \text{ kN/m}^2$  (entspricht einer Konsistenz von  $I_c = 0,8$ ) und  $\sigma = 53 \text{ kN/m}^2$  ( $I_c = 0,7$ ) zugeordnet werden.

In -1,5 m Tiefe gilt:

$$w_n = 22,6 \% \quad \sigma (w_n = 22,6 \%) \approx 87,0 \text{ kN/m}^2$$

→ in Bild 7 und 8 werden für  $v(1,0)=19,0$  und  $\omega(1,0)=0,87$  abgelesen.  
Damit kann der Steifemodul für eine Laststeigerung von 100% mit Gleichung 4 berechnet werden:

$$E_{oed} = \sigma_a \cdot v(1) \left( \frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right)^{\omega(1)} = 100 \cdot 19,0 \cdot \left( \frac{87,0}{100} \right)^{0,87} = 1.683 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{mit } \delta_i = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_i} = \frac{38,0}{87,0} = 0,436 \text{ folgt aus Bild 7 und 8:}$$

$$\rightarrow v(0,436)=29,3 \text{ und } \omega(0,436)=0,79 \text{ damit folgt für } E_s$$

$$\begin{aligned} E_{si} (\sigma_i = 87,0; 0,436) &= \sigma_{at} \cdot v(\delta_i) \cdot \left[ \frac{\sigma_i}{\sigma_{at}} \right]^{\omega(\delta_i)} \\ &= 100 \cdot 29,3 \cdot \left( \frac{87,0}{100} \right)^{0,79} = 2.625 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

In -5,0 m Tiefe gilt:

$$w_n = 24,0 \% \quad \sigma (w_n = 24,0 \%) \approx 53,0 \text{ kN/m}^2$$

→ in Bild 7 und 8 werden für  $v(1,0)=19,0$  und  $\omega(1,0)=0,87$  abgelesen.  
Damit kann der Steifemodul für eine Laststeigerung von 100% mit Gleichung 4 berechnet werden:

$$E_{oed} = \sigma_a \cdot v(1) \left( \frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right)^{\omega(1)} = 100 \cdot 19,0 \cdot \left( \frac{53,0}{100} \right)^{0,87} = 1.094 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{mit } \delta_i = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_i} = \frac{15,0}{53,0} = 0,283 \text{ folgt aus Bild 7 und 8:}$$

$$\rightarrow v(0,283)=40,0 \text{ und } \omega(0,283)=0,72 \text{ damit folgt für } E_s$$

$$\begin{aligned} E_{si} (\sigma_i = 53,0; \delta_i = 0,283) &= \sigma_{at} \cdot v(\delta_i) \cdot \left[ \frac{\sigma_i}{\sigma_{at}} \right]^{\omega(\delta_i)} \\ &= 100 \cdot 40 \cdot \left( \frac{53,0}{100} \right)^{0,72} = 2.532 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

## 9. Anhang

### 9.1 Kenndaten Kompressionsversuch Boden 2:

Fließgrenze  $w_L = 34,1\%$  Ausrollgrenze  $w_p = 19,7\%$  Korndichte  $\rho_s = 2,662 \text{ g/cm}^3$

Probendurchmesser  $\varnothing = 7,0 \text{ cm}$  Einbauhöhe  $h_a = 1,910 \text{ cm}$

Feuchtmasse beim Einbau  $m_f = 137,92 \text{ g}$

Wassergehalt beim Einbau  $w_{\text{Einbau}} = 31,38 \%$

Wassergehalt beim Ausbau  $w_{\text{Ausbau}} = 17,34 \%$

Mit den Kenndaten folgt für den Einbauzustand:

$$\text{Feuchtdichte } \rho_f = \frac{m_f}{r^2 \cdot \pi \cdot h_a} = \frac{137,92}{3,5^2 \cdot \pi \cdot 1,91} = 1,876 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Trockendichte } \rho_d = \frac{\rho_f}{1+w} = \frac{1,876}{1+0,3138} = 1,428 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Porenanteil } n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{1,428}{2,662} = 0,464 \quad e_{\text{Einbau}} = \frac{n}{1-n} = \frac{0,464}{1-0,464} = 0,866$$

$$\text{Sättigungsgrad } S_r = \frac{w \cdot \rho_d}{n \cdot \rho_w} = \frac{0,3138 \cdot 1,428}{0,464 \cdot 1,0} = 0,966$$

$$\text{mit } \Delta s_{\text{Ausbau}} = 4,056 \text{ mm folgt für } \Delta m_w = \frac{\varnothing^2}{4} \pi \cdot \Delta s \cdot \rho_w = \frac{7,0^2}{4} \pi \cdot 0,4056 \cdot 1,0 = 15,609 \text{ g}$$

$$m_{f(\text{Ausbau})} = 137,92 - 15,609 = 122,311 \text{ g}$$

$$h_1 = h_a - \Delta s_{\text{Ausbau}} = 19,10 - 4,056 = 15,044 \text{ mm}$$

Ausbauzustand:

$$\rho_f = \frac{122,311}{3,5^2 \cdot \pi \cdot 1,5044} = 2,113 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_d = \frac{2,113}{1+0,1734} = 1,801 \text{ g/cm}^3$$

$$n = 1 - \frac{1,803}{2,662} = 0,323 \quad e_{\text{Ausbau}} = \frac{n}{1-n} = \frac{0,323}{1-0,323} = 0,477$$

$$S_r = \frac{0,1734 \cdot 1,801}{0,323 \cdot 1,0} = 0,967$$

rechnerisch bezogene Setzung im Ausbauzustand  $s'_{\text{Ausbau}}$

mit  $s' = \frac{\Delta h}{h_a} = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o}$  und  $e = \frac{w \cdot \rho_s}{S_r \cdot \rho_w}$  folgt für die bezogene Setzung beim Ausbau:

$$s'_{\text{Ausbau}} = \frac{\frac{w_{\text{Einbau}}}{S_r(\text{Einbau})} - \frac{w_{\text{Ausbau}}}{S_r(\text{Ausbau})}}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w_{\text{Ausbau}}}{S_r(\text{Ausbau})}} = \frac{\frac{0,3138}{0,966} - \frac{0,1734}{0,967}}{\frac{1,0}{2,662} + \frac{0,3138}{0,966}} = 0,2077$$

Mit Hilfe der rechnerisch bezogenen Setzung  $s'_{\text{Ausbau}}$  lässt sich in einem Diagramm (Bild 1) die Ordinate der bezogenen Setzungen mit den Werten der zugeordneten Wassergehalte und Porenzahlen darstellen. Somit kann einfach der einem Wassergehalt im Kompressionsversuch zugeordnete Spannungszustand abgelesen werden.

## 9.2 Ableitung von Gleichung 1 am Einheitswürfel:

$h_a$  - Ausgangsprobenhöhe

$h_1$  - Probenhöhe nach Einwirkung von  $\Delta\sigma_1$

$h_2$  - Probenhöhe nach Einwirkung von  $\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2$



$$s'_1 = \frac{\Delta h}{h_a} = \Delta \varepsilon_1$$

$$\Delta s'_1 = s'_2 - s'_1 = \frac{\Delta h + \Delta \Delta h}{h_a} - \frac{\Delta h}{h_a} = \frac{\Delta \Delta h}{h_a}$$

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{\Delta \Delta h}{h_1} = \frac{\Delta \Delta h}{h_a - \Delta h} = \frac{\Delta \Delta h / h_a}{1 - \Delta h / h_a} = \frac{\Delta s'_1}{1 - s'_1}$$

$$E_s = \frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{\Delta \sigma_2}{\Delta s'_1} (1 - s'_1)$$

## 10. Literatur

- [1] De Simone, V. (2017): Masterarbeit an der HTWG Konstanz
- [2] Ibrahim, K. (2017): Masterarbeit an der HTWG Konstanz
- [3] Francese, M. (2016): Bachelorarbeit an der HTWG Konstanz
- [4] Schmidt, Ph. (2016): Bachelorarbeit an der HTWG Konstanz
- [5] De Simone, V. (2015): Bachelorarbeit an der HTWG Konstanz
- [6] Salzer, I. (2015): Bachelorarbeit an der HTWG Konstanz
- [7] Ohde (1939): Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund, Bauingenieur 20, S.551
- [8] DIN 18135:2012-04 Eindimensionaler Kompressionsversuch
- [9] Engels, J. (2002): Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für bodenmechanische Nachweise, Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden, Heft 10
- [10] Bassem S. (2005): Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten Böden; Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 16
- [11] Soumaya B; Kempfert H.-G. (2010): Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch, Bautechnik 87(2010), Heft 2

## 11. Impressum

Autor: Prof. Dr.-Ing. W. Reitmeier

Satz & Layout Titelseite: Christian Reitmeier

Satz Inhalt dt. Fassung: Laumer GmbH & Co. CSV Bodenstabilisierung KG

