

Die Verwendung des HSSmall-Modells bei FE-Berechnungen für die Gebrauchstauglichkeit für KBE-Konstruktionen

1) Herold, Andreas

IBH Herold & Partner Ingenieure, Weimar

2) von Wolffersdorff, Peter-Andreas

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Kurzfassung: Neuartige Stoffgesetze, die erhöhte Steifigkeiten bei kleinen Dehnungen berücksichtigen, erlauben es noch besser, das Materialverhalten von Böden realitätsnah abzubilden. Im vorliegenden Aufsatz wird gezeigt, wie der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für KBE-Konstruktionen unter Anwendung des sogenannten HSSmall-Modells erfolgen kann. Die Ergebnisse belegen, dass sich damit eine realitätsnahe Prognose der Verformungen für KBE-Konstruktionen ergeben kann. Die Ermittlung der dafür erforderlichen bodenmechanischen Kennwerte im Labor wird erläutert. Weiterhin wird gezeigt, dass die Ergebnisse der Berechnungen sich mit den tatsächlichen zu erwartenden Verformungen sehr gut decken. Hierzu werden die Ergebnisse von Großversuchen herangezogen und mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Ergänzend wird an einem Beispiel dokumentiert, dass mit dem genannten Stoffgesetz auch dynamische Probleme berechnet werden können.

1. Einleitung

Die Einführung der DIN 1054:2005-01 bringt neben der Einführung des Partialsicherheitskonzeptes auch entscheidende Neuerungen im Hinblick auf zu führende Verformungsnachweise im Erd- und Grundbau mit sich. So wird neben dem

- Grenzzustand der Tragfähigkeit auch
- der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
-

als zu führende Nachweisgruppe im Zuge statischer Berechnungen definiert. Dies bedeutet, dass für alle Konstruktionen die Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen ist. Ein rechnerischer Nachweis der Gebrauchstauglichkeit umfasst alle Berechnungen zu Zuständen des Tragwer-

kes, bei deren Überschreitung die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt werden können. Bei geotechnischen Konstruktionen beschränkt sich in der Regel die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit auf Verformungsnachweise für Baugrund und/oder Bauwerk.

Die im Jahre 2008 fertig gestellte Neufassung der EBGEO /1/ regelt im Abschnitt 3 die Nachweisführung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Hierbei wird deckungsgleich mit der DIN 1054:2005-01 die Berechnung der Verformungen in Abhängigkeit der geotechnischen Kategorie verlangt. Berechnungen der zu erwartenden Verformungen für Konstruktionen aus KBE-Kunststoffbewehrter Erde sind problematisch, weil der Verbundbaustoff aus Boden und Geokunststoffen nur näherungsweise mit

Materialgesetzen abgebildet werden kann. In /2/ wurde die Problematik bereits angerissen. Für den praktisch tätigen Ingenieur ergibt sich nunmehr die Frage, wie die Ermittlung der zu erwartenden Verformungen bzw. die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit rechnerisch zu bewerkstelligen sind. Erste Ansätze für ein Stoffmodell, das den Verbundstoff Boden-Geokunststoff beschreibt, sind in /3/ zu finden. Die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Stoffmodelle für die Einzelbaustoffe ist inzwischen weit vorangeschritten, so dass für eine praxisnahe Anwendung diverse Modelle zur Verfügung stehen. Sie erlauben eine einfache Ermittlung der Stoffmodellparameter und liefern Ergebnisse mit hoher Wirklichkeitstreue. Hierbei wird jedoch jeder Baustoff einzeln betrachtet.

Oft angewendete Stoffmodelle sind neben dem Mohr-Coulomb-Modell (MC), das Hardening-Soil-Modell (HS). Die Einfachheit des MC-Modells gestattet eine schnelle und einfache Anwendung, berücksichtigt jedoch bodentypische Eigenschaften, wie spannungs- und verformungsabhängige Steifigkeiten oder die Lastgeschichte nicht. Diesem Anspruch genügen höherwertige Stoffgesetze, wie das HS-Modell besser. Damit wird insbesondere

- eine spannungsabhängige Steifigkeit und
- die Lastgeschichte bei Erst-, Be- und Wiederbelastung

berücksichtigt. Mittlerweile sind auch in kommerziellen Programmen, wie z.B. Plaxis-Version 9.01, Stoffmodelle der neusten Generation, wie z.B. das HSSmall-Modell (HSS) /4/, verfügbar. Es eignet sich sowohl für die Bearbeitung statischer als auch dynamischer Aufgabenstellungen.

1.1. HSSmall-Modell

Grundsätzlich ist ein rein linear-elastisches Verhalten, wie es das MC-Modell innerhalb des zulässigen Spannungsbereiches vorausgesetzt, nur in einem sehr begrenzten Dehnungsbereich (sehr kleine Dehnungen) für Böden zutreffend. Abbildung 1 zeigt die Größenordnungen von Dehnungen und deren Zuordnung zu Laborversuchen und typischen geotechnischen Bauwerken.

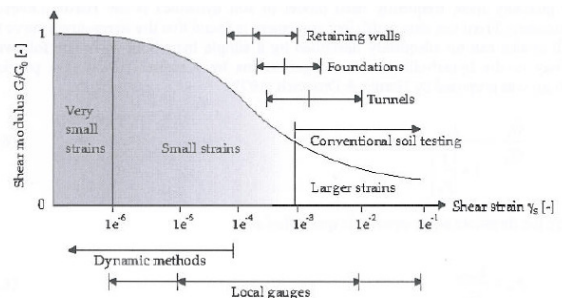


Abbildung 1: Dehnungsbereiche nach /4/

Wie der Darstellung zu entnehmen ist, kann ein linear-elastisches Verhalten nur bei sehr kleinen Dehnungen ($\gamma_s < 1 \times 10^{-6}$) näherungsweise angenommen werden. Dies wird im Übrigen durch die Untersuchungen nach /5/ bestätigt. Wie weiterhin Abbildung 1 entnommen werden kann, liegen die üblichen Dehnungsbereiche für geotechnische Bauwerke weit außerhalb des linear-elastischen Bereiches. Für Verformungsberechnungen bzw. für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit ist daher davon auszugehen, dass die Böden ein ausgeprägtes nicht-lineares Verhalten aufweisen. Demzufolge sollte bei den geforderten Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit auch ein realitätsnahes Stoffmodell, das diese komplexen Eigenschaften angemessen berücksichtigt, verwendet werden.

Das HSS-Modell ist eine Erweiterung des Hardening-Soil-Modells, mit der die erhöhten Steifigkeiten im Bereich kleiner und sehr kleiner

Dehnungen und eine Verringerung der Steifigkeiten bei größer werdenden Dehnungen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 1). Hierfür sind die beiden folgenden Parameter zusätzlich zu den Materialparametern des regulären Hardening-Soil-Modells erforderlich:

- Referenzwert des Schubmoduls G_0^{ref} bei sehr kleinen Dehnungen,
- Schubdehnung $\gamma_{0,7}$ bei 70 % des Referenzwertes des Schubmoduls G_0^{ref} .

Die nachfolgende Gleichung nach /4/ zeigt den zugehörigen Zusammenhang zwischen G_0^{ref} und $\gamma_{0,7}$. Es gilt:

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{3}{7} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}}}$$

Durch Berücksichtigung des veränderten Steifigkeitsverhaltens bei kleinen Dehnungen kann bei dynamischen Berechnungen die Hysterese bei zyklischen Belastungen realistisch wiedergegeben werden (siehe Abbildung 9).

Somit ist das Stoffmodell speziell für Berechnungen geeignet, bei denen duktile Konstruktionen (z. B. KBE) sowohl unter dynamischen als auch unter statischen Beanspruchungen untersucht werden sollen.

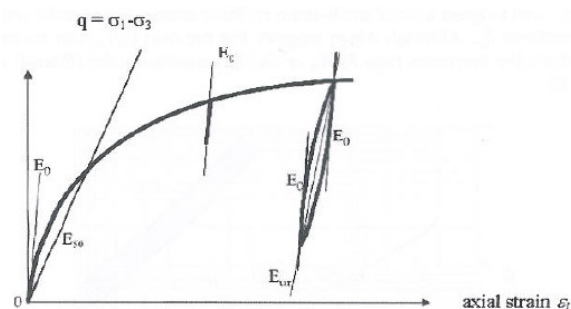


Abbildung 2: Parameterdefinition für das HSS-Modell nach /4/

Die Parameter des HSS-Modells lassen sich aus Triaxialversuchen (siehe Abbildung 2) und aus Resonant-Column-Versuchen bestimmen. Der Aufwand für die Parameterermittlung ist insgesamt gering.

Der Vorteil, der sich bei Nutzung des HSS-Modells in Kombination mit dynamischen Berechnungen ergibt wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass der aus der Bodendynamik bekannte Effekt einer von der Dehnungsgröße abhängigen, viel größeren Steifigkeit, wie sie in /6/ und /7/ beschrieben ist und in Abbildung 3 dargestellt ist, bereits seit langem bekannt ist und damit in den Finite-Elemente-Berechnungen Eingang finden kann.

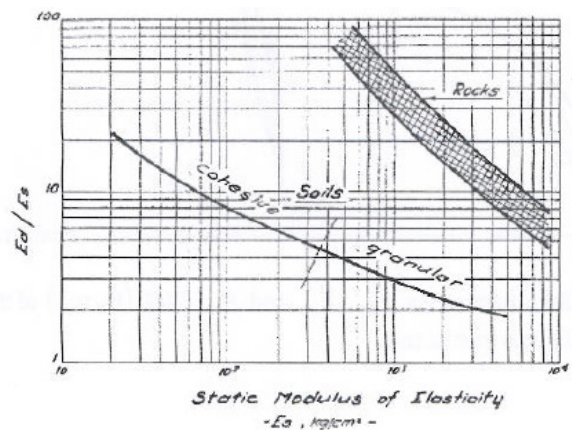


Abbildung 3: Statische / dynamische Steifemoduln nach /6/

Mit dem HSS-Modell ist daher eine relativ einfache Beschreibung des Bodenverhaltens unter zeitlich veränderlichen Belastungen möglich. Da das Stoffmodell auch hysteretisches Verhalten einschließt, wird bei dynamischen Berechnungen ein „Materialdämpfung“ erreicht, ohne dass zusätzliche Dämpfung (z. B. Rayleigh-Dämpfung) angenommen werden muss. Eine ausführliche Beschreibung des Stoffgesetzes findet sich /4/.

1.2. Laboruntersuchungen

An zwei verschiedenen Sandböden wurden umfangreiche Laboruntersuchungen durchge-

führt. Diese beiden Böden für die im Abschnitt 2 beschriebenen Großversuche (Großversuch „Riga“; Versuch „Cottbus“) verwendet.

Die Sande wurden zur Bestimmung erforderlichen Stoffgesetzparameter für das HSS-Modell untersucht. Nachfolgend sind die ermittelten Parameter für den Versuchssand des Großversuches „Cottbus“ exemplarisch dargestellt.

Tabelle 1: Parameter für HSS-Modell, Versuchssand „Cottbus“

Parameter:	Dimension:	Wert:	Legende:
ρ	$[kg/m^3]$	1840	Einbaudichte
ρ_d	$[kg/m^3]$	1763	Einbautrockendichte
D_{pr}	[1]	-1,00	Verdichtungsgrad
w	[1]	0,043	Wassergehalt
φ'	$[^\circ]$	38,3	Reibungswinkel
c'	$[kN/m^2]$	1,0	Kohäsion
ψ	$[^\circ]$	6,02	Dilatanzwinkel
p^{ref}	$[kN/m^2]$	100,00	Referenzspannung
m	[1]	0,88	Steiindex
E_{s0}^{ref}	$[kN/m^2]$	79.400,00	Referenzwert des Steifmoduls
E_{s0}^{ref}	$[kN/m^2]$	53.900,00	Referenzwert des Elastizitätsmoduls bei der Hälfte der Scherbruchspannung
E_{s0}^{ref}	$[kN/m^2]$	145.900,00	Referenzwert des Elastizitätsmoduls bei Entlastung und Wiederbelastung
ν_{ur}	[1]	0,28	Querdehnungszahl bei Entlastung und Wiederbelastung
β_r	[1]	0,84	Spannungsverhältnis
G_0^{ref}	$[kN/m^2]$	98.400,00	Referenzwert des Schubmoduls bei kleinen Dehnungen
$\epsilon_{0,7}$	[1]	$6,89 \cdot 10^{-4}$	Referenzwert der Schubdehnung bei etwa 72,2% Abminderung des Schubmoduls

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse eines durchgeführten Versuches im Triaxialgerät bei einer Referenzspannung von 100 kN/m^2 . Aufgetragen sind Deviatorspannung und Vertikaldeformationen. Die Versuchsdurchführung wurde mit einmaliger Entlastung bei ca. 1% Vertikaldeformation durchgeführt.

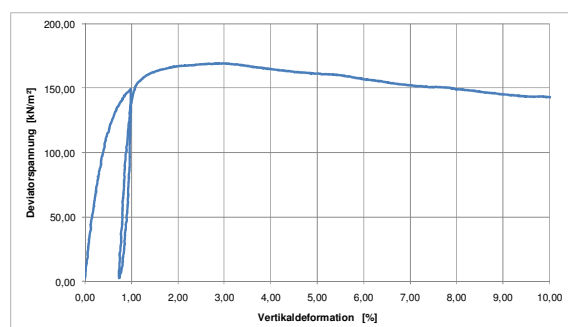


Abbildung 4: Ergebnis eines Triaxialversuches

Zusätzlich sind Resonant-Column-Versuche für die Bestimmung des Schubmoduls bei kleiner Dehnung durchgeführt worden. Auf eine Darstellung der Resonant-Column-Versuche wird

hier verzichtet. Mit den ermittelten Parameter für das HSS-Modell wurden die Großversuche mit Plaxis 9.01 modelliert und nachgerechnet.

2. Großversuche

An 2 Großversuchen konnten umfangreiche Messungen bei statischen und dynamischen Belastungen durchgeführt werden. Damit ergab sich die Möglichkeit des direkten Vergleiches zwischen Messung und Berechnung. Nachfolgend werden die einzelnen Versuchssituationen und deren Ablauf näher beschrieben.

2.1. Großversuch „Riga“

Im Jahr 2008 wurde ein Großversuch an einem ausgeführten Bauwerk in Riga, an einer 6 m hohen KBE-Konstruktion durchgeführt. Die Randdaten und versuchstechnischen Bedingungen sind in /8/ ausführlich beschrieben. Abbildung 5 zeigt den Messquerschnitt und die Belastungssituationen.

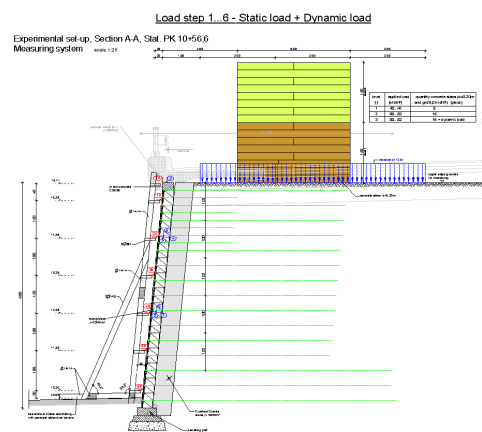


Abbildung 5: Großversuch „Riga“, Messquerschnitt

Die Versuchsdurchführung erfolgte mittels Todlast. Die Todlast ist in einzelnen Stufen mit Betonplatten appliziert worden. Da reguläre Belastungen aus LKW-Verkehr simuliert werden sollten, wurde jeweils die doppelte prognostizierte Flächenlast für die Verkehrssituation als statische Last aufgebracht. Über den Versuchszeitraum von 3 Tagen wurden die Horizontal- und

die Vertikalverschiebungen der Wandfront gemessen. Während der dynamischen Belastungsphasen mittels einer 12,5 t Vibrationswalze wurden Schwinggeschwindigkeitsmessungen ausgeführt. Die statische Last wurde in mehreren Stufen aufgebracht und am Ende des Versuchs vollständig entlastet. Abbildung 6 zeigt den gesamten Versuchsablauf, Abbildung 7 den Versuchsaufbau mit Todlast.

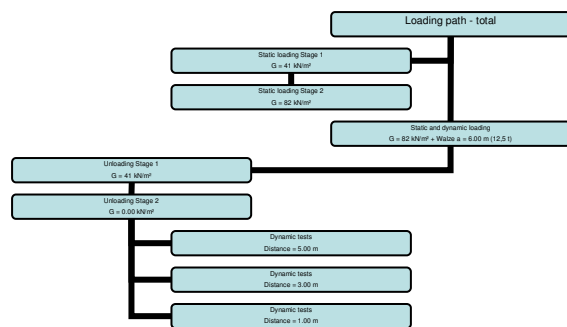


Abbildung 6: Großversuch „Riga“, Versuchsablauf



Abbildung 7: Großversuch „Riga“

2.2. Großversuch „Cottbus“

Im Rahmen eines Kooperationsforschungsvorhabens wurden an der BTU Cottbus sind insgesamt 2 Großversuche mit unterschiedlichen Frontsystemen geplant und realisiert. Dabei wurden Geogittertyp und Abstand sowie die statischen Einwirkungen variiert. Zusätzlich sind unterschiedliche dynamische Einwirkungen mit Variation von Frequenz und Lastamplitude aufgebracht worden.

Die Versuche sind in /9/ und /10/ beschrieben, Abbildung 8 zeigt den Messquerschnitt mit Instrumentierung, Abbildung 9 die Lastaufbringung mit einer schweren Vibrationswalze.

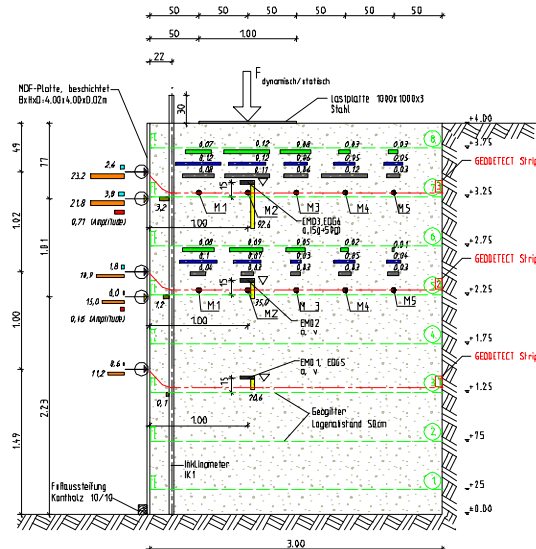


Abbildung 8: Versuch „Cottbus“, Messquerschnitt



Abbildung 9: Versuch „Cottbus“, Dynamische Einwirkung

Ziel der Nachrechnungen mit der Finite-Elemente-Methode (Plaxis, Version 9.01) war es, die Berechnungsergebnisse und die Messergebnisse zu vergleichen und Aussagen über die Eignung und die Qualität des verwendeten Stoffmodells zu geben.

2.3. Messergebnisse und Vergleich

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Ergebnisse der Nachrechnung für den Versuch „Cottbus“. Die Modellgeometrie und die Horizontalverformungen für eine Auflast von 350 kN/m², die die Berechnung mit dem MC-Modell ergeben haben, sind in Abbildung 10 dargestellt. Für einen Messpunkt in Höhe von 3,75 m über UK Konstruktion sind in Abbildung 11 die Messergebnisse sowie die Berechnungsergebnisse bei Verwendung des MC-Modells und des HSS-Modells als Verläufe der Horizontalverformungen gegenübergestellt.

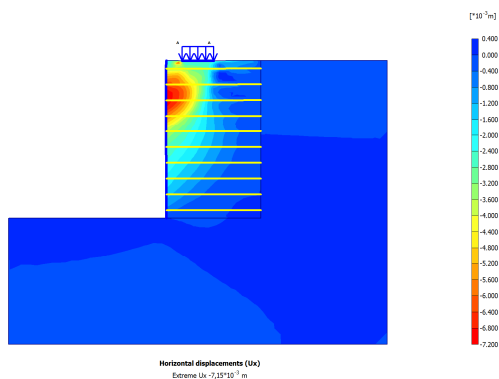


Abbildung 10: Versuch „Cottbus“, Horizontalverformungen, statisch, 350 kN/m²

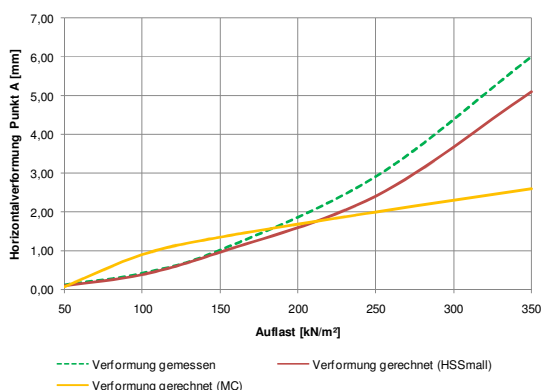


Abbildung 11: Versuch „Cottbus“, Vergleich der Horizontalverformungen, statisch, H = 3,75 m (Front)

Wie aus Abbildung 11 erkennbar ist, decken sich die Berechnungsergebnisse des HSS-Modell sowohl für kleine Auflaststufen als auch für die Bruchlastbereiche (350 – 400 kN/m²)

sehr gut mit den Versuchsergebnissen. Die Ergebnisse mit dem MC-Modell weichen bereits ab ca. 50 % der Bruchlast deutliche von den Messergebnissen ab und liefern zu kleine Verformungen. Der Grund dafür ist, dass mit MC-Modell die hier nachweisbare, deutliche Nichtlinearität der Steifigkeitsfunktion nach Abbildung 1 nicht berücksichtigt werden kann. Der Großversuch in Riga wurde mit mehreren Belastungsphasen ausgeführt. In Abbildung 12 sind die auf die Wandhöhe bezogenen Frontverformungen sind für den gesamten Versuchsablauf dargestellt.

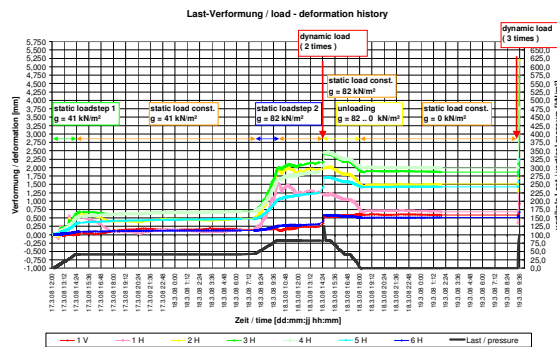


Abbildung 12: Großversuch „Riga“, Last-Zeitverlauf der Horizontalverformungen

Abbildung 13 zeigt das FE-Modell und dessen Berechnungsergebnisse im Zustand der maximalen statischen Belastung.

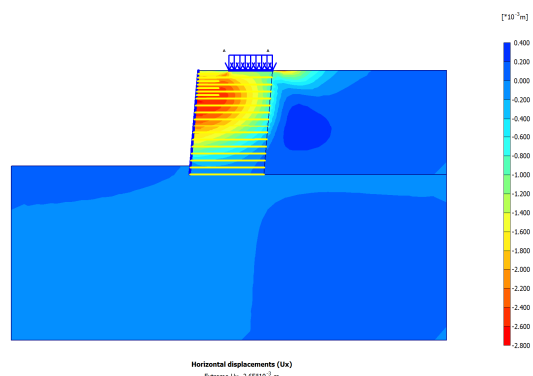


Abbildung 13: Großversuch „Riga“, Horizontalverformungen, statisch, 82 kN/m²

Der in Abbildung 14 dargestellte Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen dem MC-Modell und dem HSS-Modell zeigt auch hier

den o. g. Mangel des MC-Modells. Der nach dem HSS-Modell berechnete Verlauf der Horizontalverformungen über die Wandhöhe bei maximaler statischer Belastung stimmt wiederum gut mit dem gemessenen Verlauf überein, wohin nach dem MC-Modell die Verformungen im Vergleich zu den Messergebnissen deutlich unterschätzt werden und nur der qualitative Verlauf wiedergegeben wird.

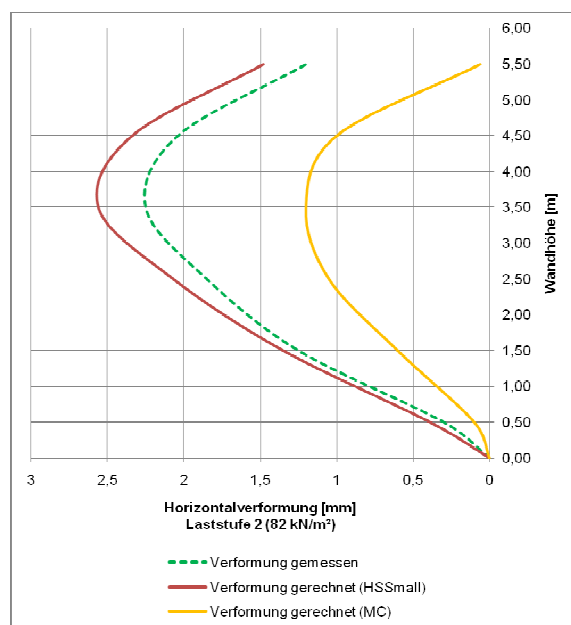


Abbildung 14: Großversuch „Riga“, Vergleich der Horizontalverformungen

3. Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

Der vorliegende Artikel beinhaltet einen direkten Vergleich von Messungen und Berechnungen für 2 Stützkonstruktionen unter Nutzung verschiedener Stoffmodelle. Es kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Das HSS-Modell ist für statische und dynamische Aufgabenstellungen und für Verformungsberechnungen von KBE-Konstruktionen mit nichtbindigen Füllböden gut geeignet.
- Die Messergebnisse und die Berechnungsergebnisse nach dem HSS-Modell

zeigen für statische und dynamische Einwirkungen gute Übereinstimmung.

- Die Aufwendungen für die Ermittlung der Parameter für das HSS-Modell sind im Vergleich zur Qualitätssteigerung der Berechnungsergebnisse gering.
- Die bodendynamische Systemeigenschaft der Materialdämpfung kann mit dem HSS-Modell näherungsweise ohne zusätzliche Dämpfungsvorgaben berücksichtigt werden.
- Eine wirklichkeitsnahe Abschätzung der Verformungen kann mit nutzerfreundlichen Programmen, z. B. Plaxis Version 9.01, auch bei Anwendung moderner Stoffmodelle, wie z. B. das HSS-Modell mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

Insgesamt ist einzuschätzen, dass der zeitliche Aufwand für die Umsetzung und Abarbeitung ingenieurpraktischen Belangen durchaus genügt und die Forderungen der DIN 1054:2005-01 sowie der EBGEO /1/ im Zuge der Nachweisführung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erfüllt werden können. Eine weitere Anwendung kann daher empfohlen werden.

4. Literatur

/1/ EBGEO 2008 – „Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungseinlagen aus Geokunststoffen“, Entwurf Stand 02/2009a; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)

www.gb.bv.tum.de/fachsektion/b_ak-ak52.htm

/2/ Herold, A., (2007), 10 Jahre Verformungsbeobachtungen an KBE-Bauwerken – Ist die Dehnsteifigkeit der Geokunststoffe der Schlüssel zur korrekten Prognose des Verformungsverhaltens von KBE-Stützbauwerken?, Geotechnik 29(2007)2 S. 79 – 86

- /3/ Ruiken, A. / Ziegler, M., Untersuchung des Tragkraft-Verformungsverhaltens von geogitterbewehrtem Boden, Geotechnik Sonderheft 2009
- /4/ Plaxis Software Delft (2008) Material Models Manual, Version 9.01, PLAXIS BV, Netherlands,
- /5/ Vucetic, M.,(1994), Cyclic Threshold Shear Strains in Soils, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, 1994, No. 12,
- /6/ Santos, J.A. / Correia, A.G., Reference threshold shear strain of soil application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve for soil, Proceedings 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2001 (Istanbul, Turkey), Vol. 1: S. 267 – 270
- /6/ Alpan, I., (1970), The geotechnical properties of soils. Earth-Science Reviews, 6: S. 5 – 49
- /7/ Empfehlungen des Arbeitskreises “Baugrunddynamik”, (2002) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)
- /8/ Hangen, H. / Herold, A. / Gaisin, A. / Arhipenko, R., Construction of the bridge approach embankments for Riga’s South Bridge: Case study, 11th Baltic Sea Conference Gdansk 2008, Conference Proceedings
- /9/ Klapperich, H. / Herold, A., Neues rund um’s Geogitter, 4. Geokunststoff Kolloquium, Bad Lauterberg, 2007, Tagungsband
- /10/ Pachomov, D. / Vollmert, L. / Herold, A., Der Ansatz des horizontalen Erddruckes auf die Front von KBE-Systemen, FS-KGEO 2007, Sonderheft Geotechnik 2007