

Workshop „Verformungsprognose für Tiefe Baugruben“; DGGT AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“;
16. und 17.03.2000 in Stuttgart

Ergebnisse einer numerischen Vergleichsberechnung von Mitgliedern des DGGT-Arbeitskreises „Baugruben“ an einer zweifach ausgesteiften Baugrube

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Fachgebiet Geotechnik, Universität Gh Kassel

1 Einleitung

Der DGGT Arbeitskreis „Baugruben“ erarbeitet derzeit für den Sammelband „Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben“ (EAB) Entwürfe zum Thema „Baugruben in weichen Böden“. Darüber hinaus wird im Arbeitskreis die Einführung des Teilsicherheitskonzeptes im Grundbau analog zu den parallel vorgenommenen Arbeiten an der DIN 1054-neu diskutiert.

Aufgrund von zunehmend erhobener Forderung bei größeren Baugrubenprojekten nach Verformungsprognosen von Baugrubenkonstruktion bei angrenzender Bebauung und damit im Sinne von Gebrauchstauglichkeitsnachweisen, werden auch heute schon derartige Berechnungen vereinzelt mit numerischen Verfahren durchgeführt. Nun stellt die EAB für die Berechnung und Ausführung von Baugruben in Deutschland die „anerkannte Regel der Technik“ dar. Siehe hierzu auch Benutzerhinweise zur EAB. Damit muß in irgendeiner Form auch in einer zukünftigen EAB das Thema Baugrubenberechnungen mit numerischen Verfahren aufgegriffen werden.

Dazu wurde zunächst eine Vergleichsberechnung an einer zweifach ausgesteiften Baugrube von nahezu allen Mitgliedern des Arbeitskreises durchgeführt. Die Aufgabenstellung wurde so vorgegeben, wie sie üblicherweise in der Praxis auf der Grundlage von Baugrundinformationen aus einem Standardbodengutachten vorliegen, siehe Abschnitt 2. Soweit die Mitglieder des Arbeitskreises keine eigenen praktischen Erfahrungen mit numerischen Methoden hatten, sollten die Berechnungen aber unter deren Anleitung innerhalb der von ihnen vertretenen Institutionen durchgeführt werden, so daß eine wirklichkeitsnahe Bearbeitungssituation unter Anleitung eines mit Baugruben erfahrenen Fachmannes sichergestellt ist.

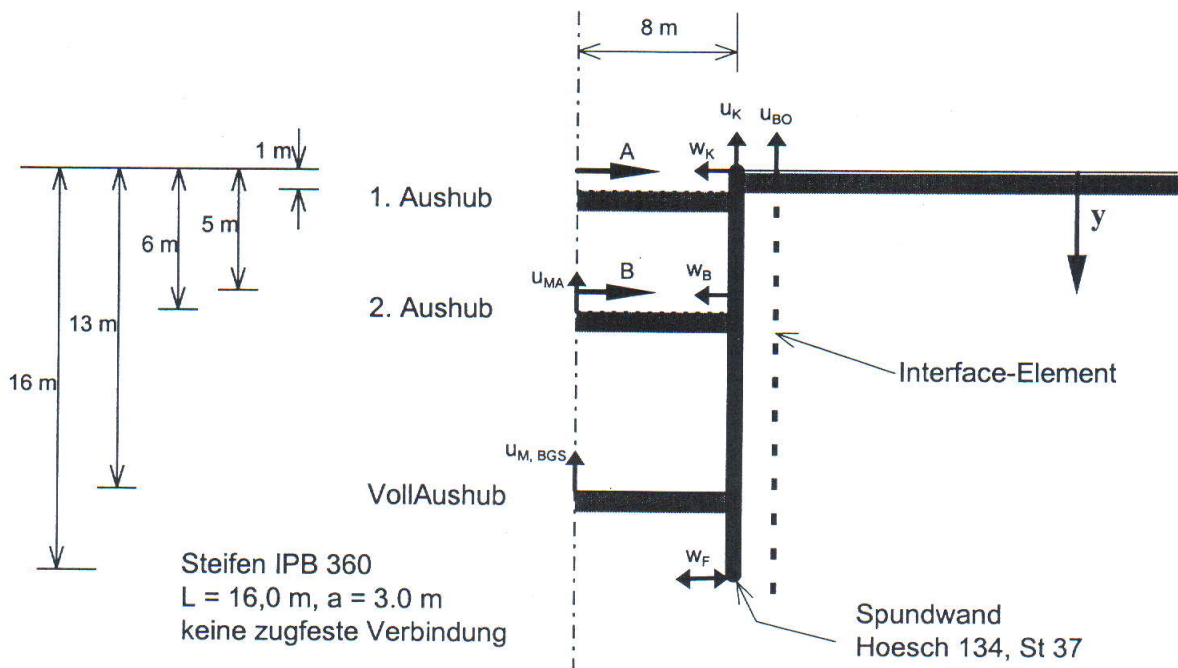
Die Vergleichsberechnungen sollten auch dazu dienen, aus praktischer Sicht Anforderungen an die Qualität und Prüfbarkeit numerischer Berechnungen für Baugruben zu formulieren. Dazu sind einige Hinweise im Abschnitt 4 enthalten.

2 Aufgabestellung für die Vergleichsberechnung

Der Grundgedanke für die Vergleichsberechnungen war, daß zunächst nur ein statisches System und Bodenkenngrößen vorgegeben werden, wie sie in jedem Standardbaugrundgutachten enthalten sind. Daraus sollten die Bearbeiter nach ihrem Ermessen Kenngrößen für die Numerik ableiten und die Berechnungen durchführen. Diese 1. Berechnungsrunde ergab so große Streuung in den Ergebnissen, daß man sich entschloß, weitere Parameter für die Numerik (z.B. Ent- und Wiederbelastungssteifemodul, Dilatanzwinkel, usw.) vorzugeben.

Für die hier dargestellten Ergebnissen lagen folgende Vorgaben zugrunde.

a) Bild 1: Geometrie der Baugrube



b) Bodenkenngrößen:

Bodenart	cal γ	cal ϕ'	cal c'	Steifemodul		Querdehnzahl		Dilatanzwinkel
				Erstbel. E_{sv}	Ent- und Wiederbel. S_v	Erstbel.	Ent- und Wiederbel.	
	kN/m ³	°	kN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	-	-	°
Sand	18,0	35	2,0	40,0	100,0	0,30	0,10	10
Lehm	20,0	25	20,0	10,0	50,0	0,40	0,20	0

$$K_0 = 1 - \sin \phi', \text{ falls möglich: } E_{sh} = \frac{1}{2} E_{sv} \text{ und } S_h = \frac{1}{2} S_v,$$

c) *Vorgaben für die analytische Berechnung:*

- Gemäß EAB soll auf den Erdwiderstand vor der Wand ein Sicherheitsbeiwert von $\eta_p = 1,5$ angewendet werden.
- Der aktive Erddruck sollte mit den Erddruckbeiwerten nach DIN 4085 mit einem Wandreibungswinkel von $\delta_a = \frac{2}{3} \varphi$ ermittelt werden. Der passive Erddruck sollte mit den Erddruckbeiwerten nach Caquot / Kerisel mit $\delta_p = -\varphi$ ermittelt werden.
- Erddruckverteilung gemäß Fall 1 und Fall 2 in Bild 2.
- Erddruckumlagerung in Fall 2 ist identisch zu EAB 70-2 (b), aber nur bis BGS

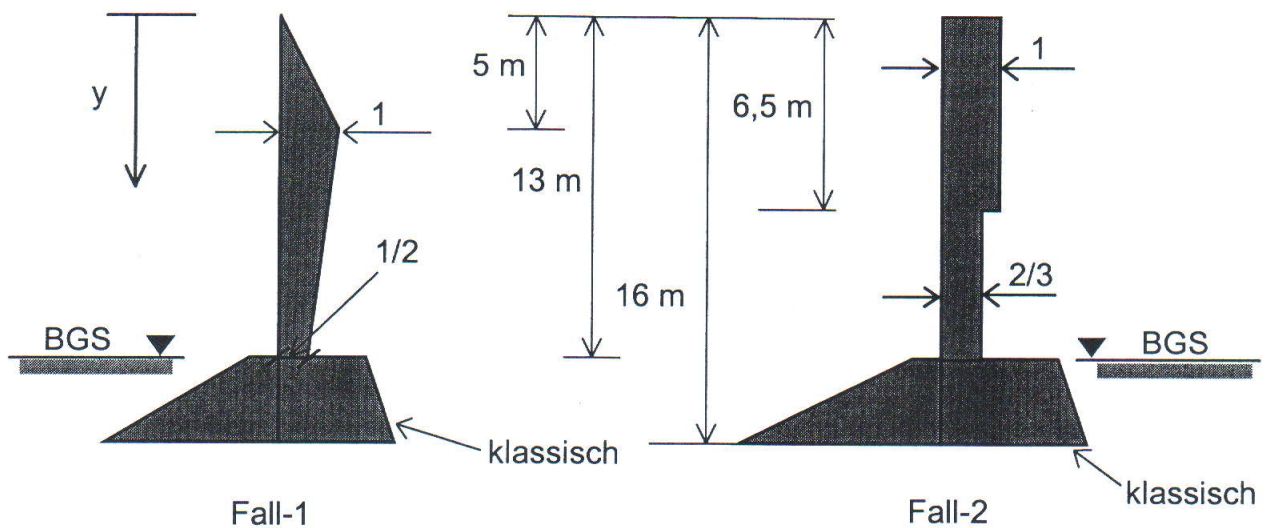


Bild 2: Vorgegebene Erddruckansätze für die analytische Berechnung

3 Ergebnisse

3.1 Verwendete Randbedingungen bei den numerischen Berechnungen

Die verwendeten Randbedingungen bei den numerischen Berechnungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Verwendete Randbedingungen bei den numerischen Berechnungen

Bearbeiter	Verwendete Programm	Netzausschnittsgröße [m]			Elementtyp	Elementanzahl	Wandsteifigkeit			Ankersteifigkeit	K ₀	E _{50,ref} MN/m ² *	P _{ref} kN/m ²	E _{ur,ref} MN/m ² *	Power, m [§]
		Vor der Wand	Hinter der Wand	Tiefe unter dem Wandfuß			EA [MN/m]	EI [MN/m ² /m]	EA [MN/m]						
A1	Plaxis 6.1	8	162	79	6-knotige Dreiecke	800	3590	53,6	3801	1-sinφ	30/4,7	100	98/45	0,5/1,0	
A2	Plaxis 6.1	8	30	16	15-knotige Dreiecke	200	3590	53,6	3801	1-sinφ	30/4,7	100	98/45	0,5/1,0	
A3	ABAQUS 5.7	8	42	34	8-knotige Vierecke	741	3590	53,6	3801	1-sinφ	30/4,7	100	98/45	0,5/1,0	
B	Plaxis 6.1	8	42	22	15-knotige Dreiecke	198	3591	53,55	1580	1-sinφ	30/4,7	100	98/45	0,5/0,5	
C	Plaxis 7.0	10	30	16	15-knotige Dreiecke	Medium	3501	53,55	3801	1-sinφ	40/10	100	100/50	0,5/0,5	
D	Plaxis 7.0	8	16	10	6-knotige Dreiecke	894	3591	53,6	1267	1-sinφ	40/10	100	100/50	0,5/1,0	
F1	RIB (Isotrop)	8	30	9	8-knotige Vierecke	619	7140	56,6	1260	v/(1-v)					
F2	RIB (Anisotrop)	8	30	9	8-knotige Vierecke	619	7140	56,6	1260	v/(1-v)					
F2	Plaxis 6.1	8	30	9	15-knotige dreiecke	407	6300	53,55	1267	1-sinφ					
G	Plaxis 6.31	8	39	18	15-knotige dreiecke	192	3591	53,55	1267	1-sinφ	40/10	150	98/45	0,5/0,5	
H1	Plaxis	8	20	9	15-knotige dreiecke	250	3523	52,53	3730	1-sinφ	40/10	100	50/100	0,5/0,5	
H2	ABAQUS 5.8	8	32	14	8-knotige Vierecke	3528	3420	52,0	3860	1-sinφ					

* Sand/Lehm

§ Power m ist der Steifeffizient in Hard Soil Model (PLAXIS)

A1 - A3 = Berechnung Universität Kassel

3.2 Beispiel für die Berechnungsergebnisse der Universität Kassel

Von der Beteiligten sollten die Ergebnisse in die beiden nachfolgend dargestellten Tabellen eingetragen werden. Die Tabelle enthalten hier als Beispiel die Berechnungsergebnisse der Universität Kassel (Buchstabe A).

Tabelle 2: Schnittgrößen

A	B	M_B	$M_f(y)$	$M_f(y)$	E_{ah1}	E_{ah2}	E_{ph}	η
kN/m	kN/m	kNm/m	kNm/m (m)	kNm/m (m)	kN/m	kN/m	kN/m	-

Sand

Mohr-Coulomb $E_s = 40 \text{ MN/m}^2$	2. Aushub	2	-		38 (3,25)	-22,9 (6,9)				
	Vollaushub	4,6	272	-154	155 (10,4)	-48,7(14,5)	366	597	314	2,27
Mohr-Coulomb $E_s = 100 \text{ MN/m}^2$	2. Aushub	21,4	-	0	30,9 (3,25)	-31,3 (6,87)				
	Vollaushub	23,1	258	-109	96,4 (10,38)	-77,9 (14,12)	360	656	369	1,93
Hard Soil	2. Aushub	31,4	-	0	56,4 (3,25)	-41,1 (7,75)				
	Vollaushub	20,1	405	-151	134 (10,4)	-56 (14,5)	507	785	375	1,89
Analytisch Fall-1	2. Aushub	28,5	-	0	38,9 (02,7)	-43				
	Vollaushub	0	246,1	-152	179,5 (09,7)	-66,6(14,8)	320	472,3	386	1,5
Analytisch Fall-2	2. Aushub	28,5	-	0	038,9 (02,7)	-43				
	Vollaushub	42,6	218,8	-156	103,5 (10,1)	-66,9(14,6)	320,2	466,1	358	1,5

Lehm

Mohr-Coulomb $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$	2. Aushub	18,5	-	-	111,5 (4,5)	-				
	Vollaushub	0	408	-238	360 (10,4)	-	555	895	484	1,21
Mohr-Coulomb $E_s = 50 \text{ MN/m}^2$	2. Aushub	0	-	-	33,9 (4,5)	-25,3 (6,9)				
	Vollaushub	0	330,1	-141	136,7 (10,4)	-48,2 (14,5)	430	860	546	1,07
Hard Soil	2. Aushub	48,8	-	-	113,2 (4,0)	-57 (8,6)				
	Vollaushub	8,1	751	-360	323 (10,4)	-	865	1153	379	1,55
Analytisch Fall-1	2. Aushub	32,7	-	0	044,60 (2,7)	-38				
	Vollaushub	0	263,3	159	220,8 (9,9)	-20,8(15,2)	338	565,4	366	1,5
Analytisch Fall-2	2. Aushub	32,7	-	0	044,60 (2,7)	-38				
	Vollaushub	46,4	282,2	218	150,7 (10,4)	-23,9(15,04)	338	558,3	351	1,5

Tabelle 3: Verformungen

$W_{\max(y)}$	W_K	W_B	W_F	u_K	u_{BO}	u_{MA}	$u_{M,BGS}$
mm (m)	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm

Sand

Mohr-Coulomb	2. Aushub	6,14 (16,0)	-0,9	-	6,14	21,3	14,4	55	
$E_s = 40 \text{ MN/m}^2$	Vollaushub	33,4 (10,4)	-1	6,72	8,5	27,1	11,9		98
Mohr-Coulomb	2. Aushub	1,77 (3,2)	-0,5	-	8,85	7,7	4,99	19,1	
$E_s = 100 \text{ MN/m}^2$	Vollaushub	13,9 (9,5)	-0,5	2,6	-0,94	10,9	3,17		35
Hard Soil	2. Aushub	4,6 (3,2)	-0,67	-	0,55	6,37	2,69	19,1	
	Vollaushub	23,6 (10,4)	-0,74	6,3	-1,4	5,32	-5,22		30,7
Analytisch	2. Aushub	3,2 (02,7)	-0,4	0	0				
Fall-1 *	Vollaushub	31,1 (10,0)	-23,2	0	0				
Analytisch	2. Aushub	3,2 (2,70)	-0,4	0	0				
Fall-2 *	Vollaushub	15,4 (10,1)	0	0	0				

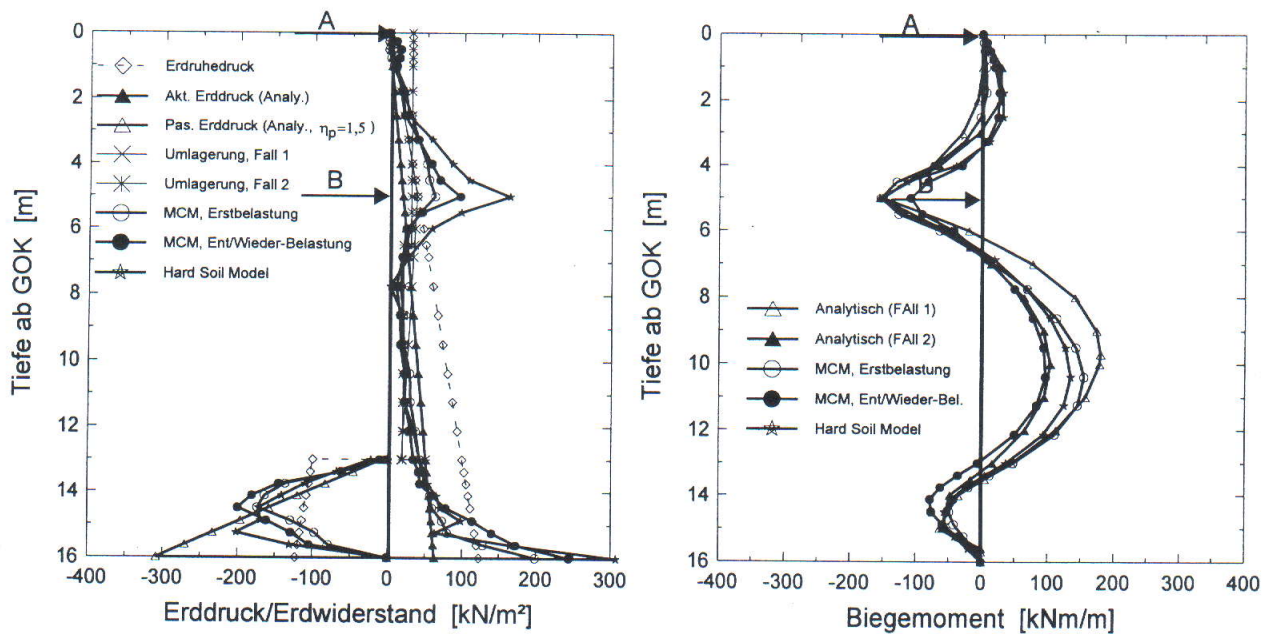
Lehm

Mohr-Coulomb	2. Aushub	61,7 (12,1)	-0,35		59	120,6	113,6	322	
$E_s = 10 \text{ MN/m}^2$	Vollaushub	173,3 (12,1)	-43,8	49,2	150	143,3	139		579
Mohr-Coulomb	2. Aushub	3,3 (16)	-2,7		3,3	17,8	17,7	43	
$E_s = 50 \text{ MN/m}^2$	Vollaushub	24,8 (10,4)	-3,2	4,21	4,65	22,4	21,9		78,9
Hard Soil	2. Aushub	14,5 (4)	-0,19		1,35	6,1	5,6	23,8	
	Vollaushub	75,3 (10,4)	-0,45	18,8	11,4	-22,9	-26,7		36,7
Analytisch	2. Aushub	3,7 (03,0)	0,4	0	0				
Fall-1 *	Vollaushub	42,9 (10,0)	-37,2	0	0				
Analytisch	2. Aushub	3,7 (03,0)	0,4	0	0				
Fall-2 *	Vollaushub	25,9 (10,0)	0	0	0				

* Die Verformungsangaben bei den analytischen Berechnungen beinhalten nur die elastischen Wandverformungen.

In den nachfolgenden Bildern sind die Erddruckverteilungen und die Biegemomente für unterschiedliche Stoffansätze dargestellt.

a) Sand



b) Lehm

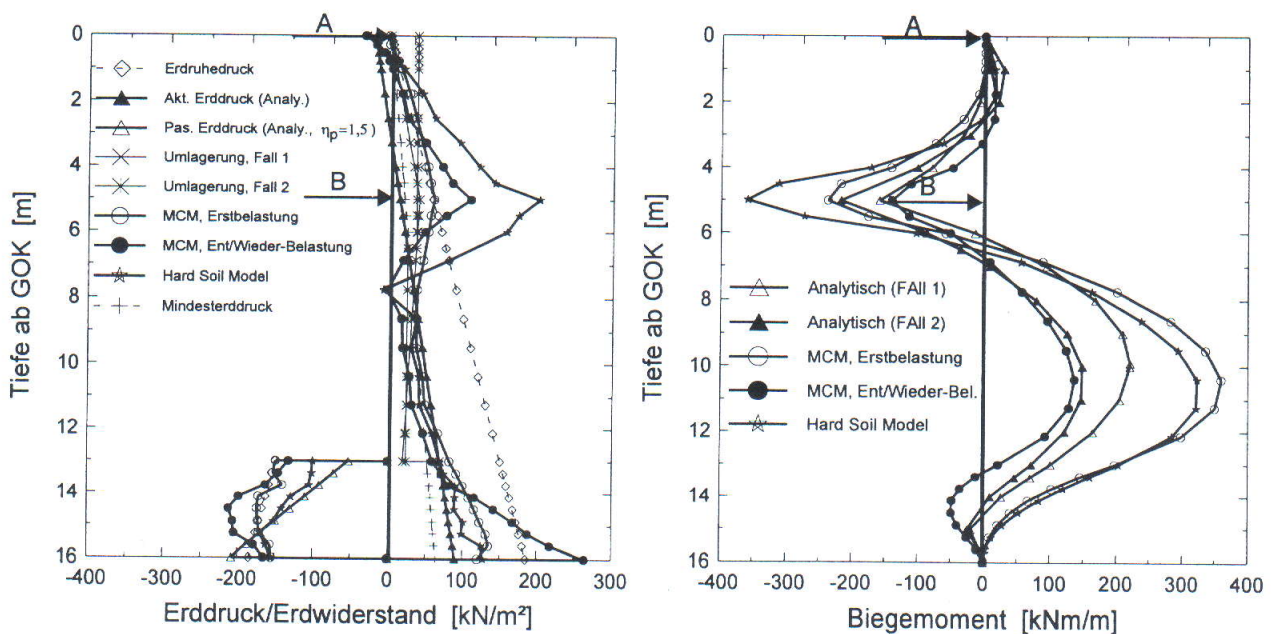
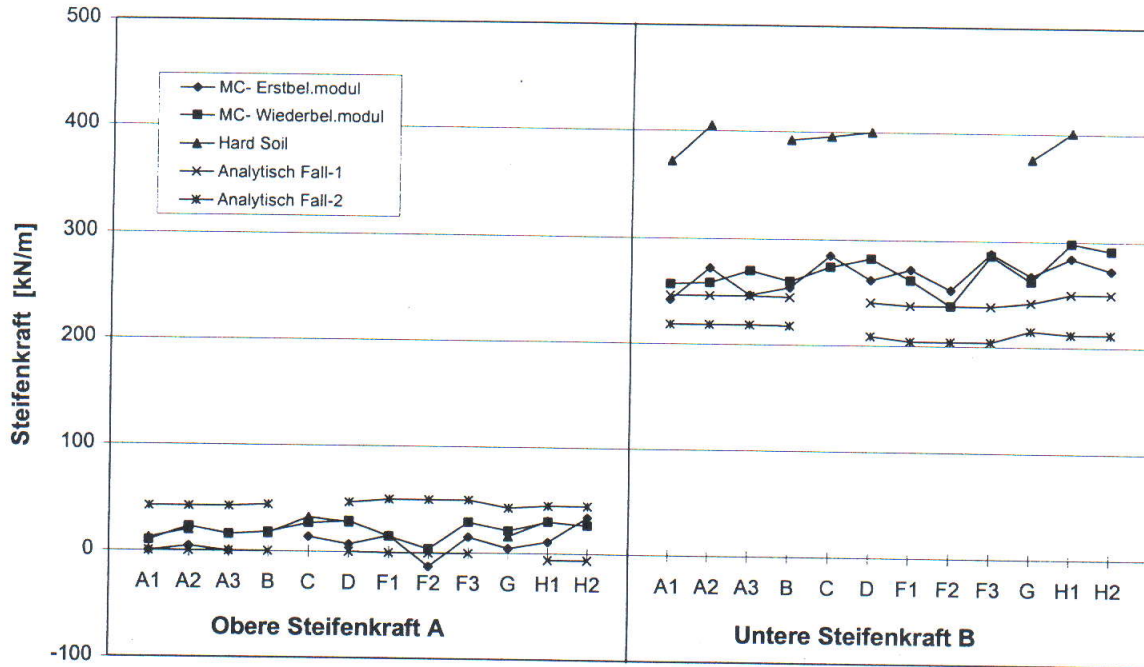


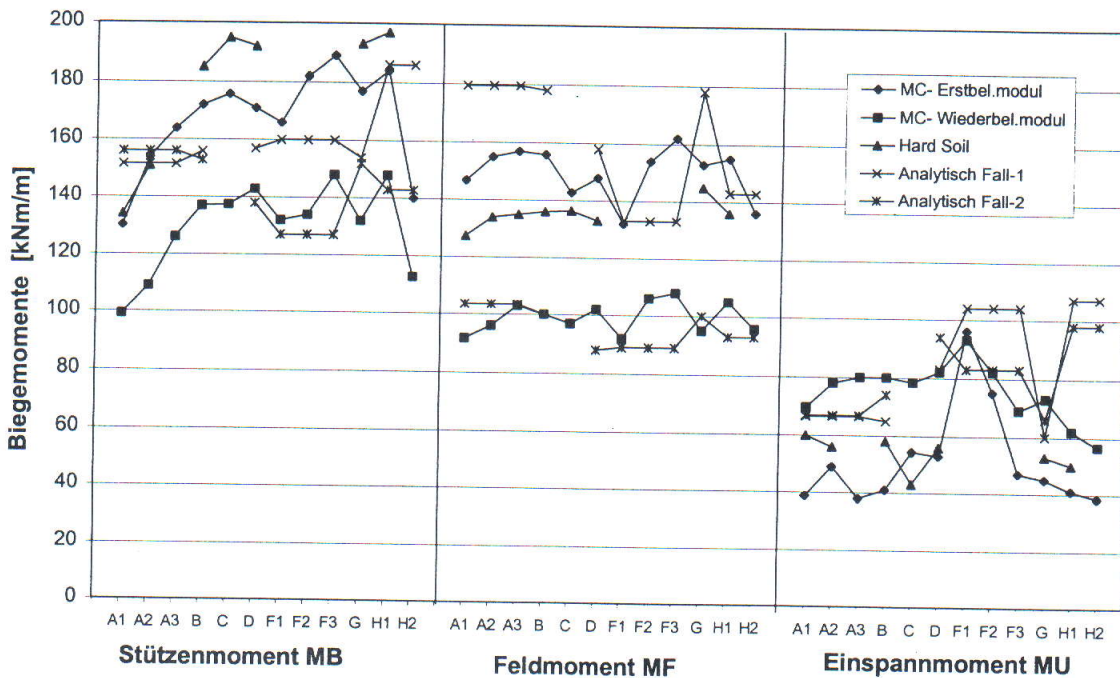
Bild 3: Ergebnisbeispiel (Berechnungen Universität Kassel) für die Erddrücke und Biegemomente

3.3 Erddruckkräfte und Schnittgrößen: Sand - Vollaushub

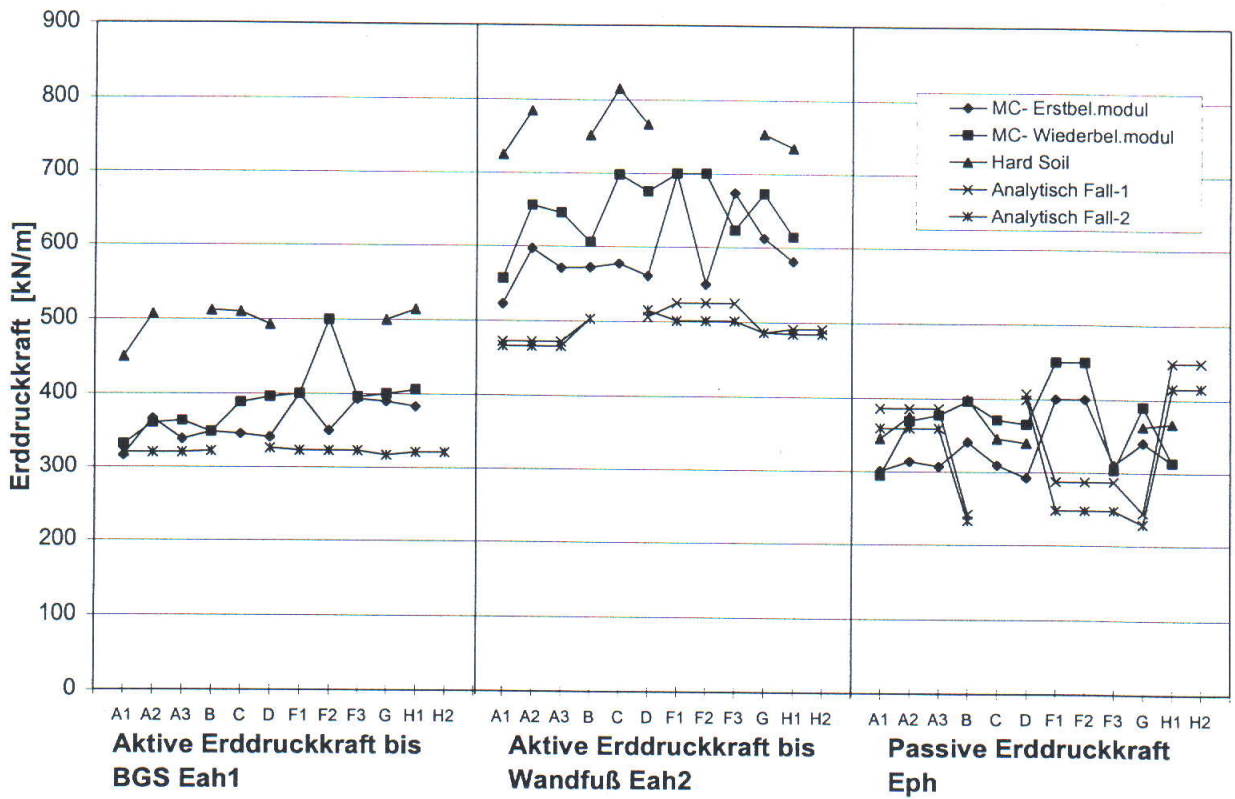
a) Steifenkräfte



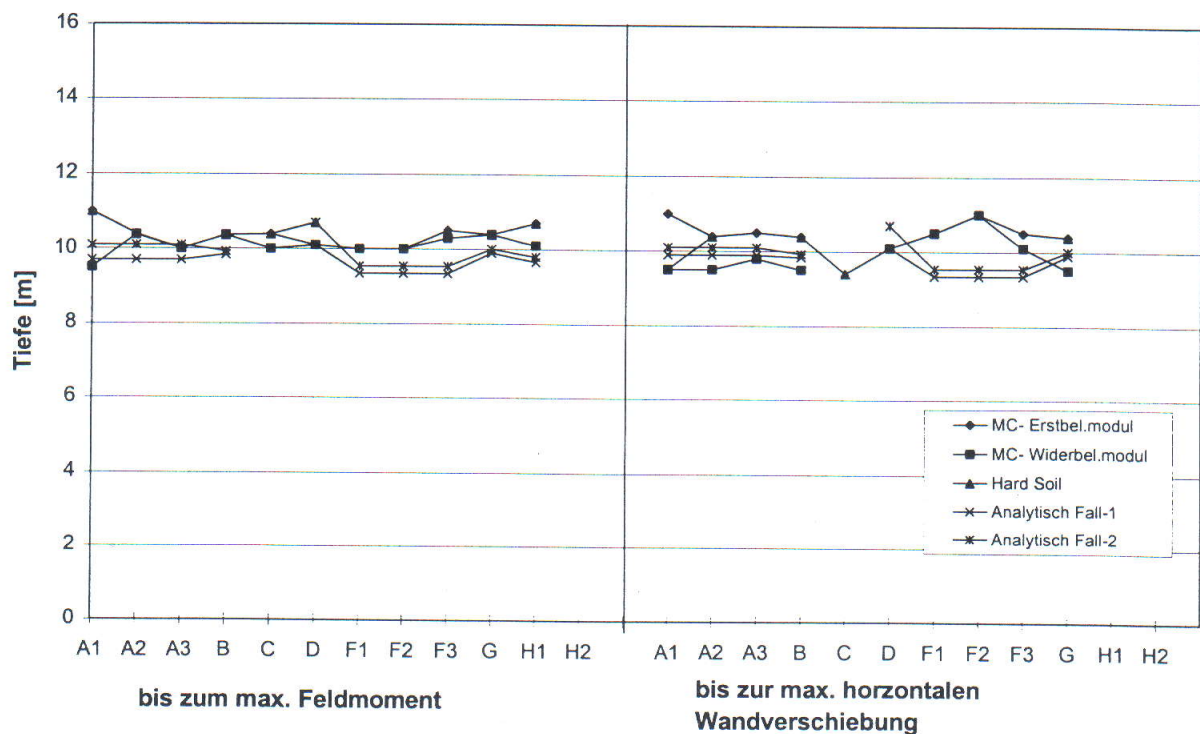
b) Biegemomente der Wand



c) Erddruckkräfte

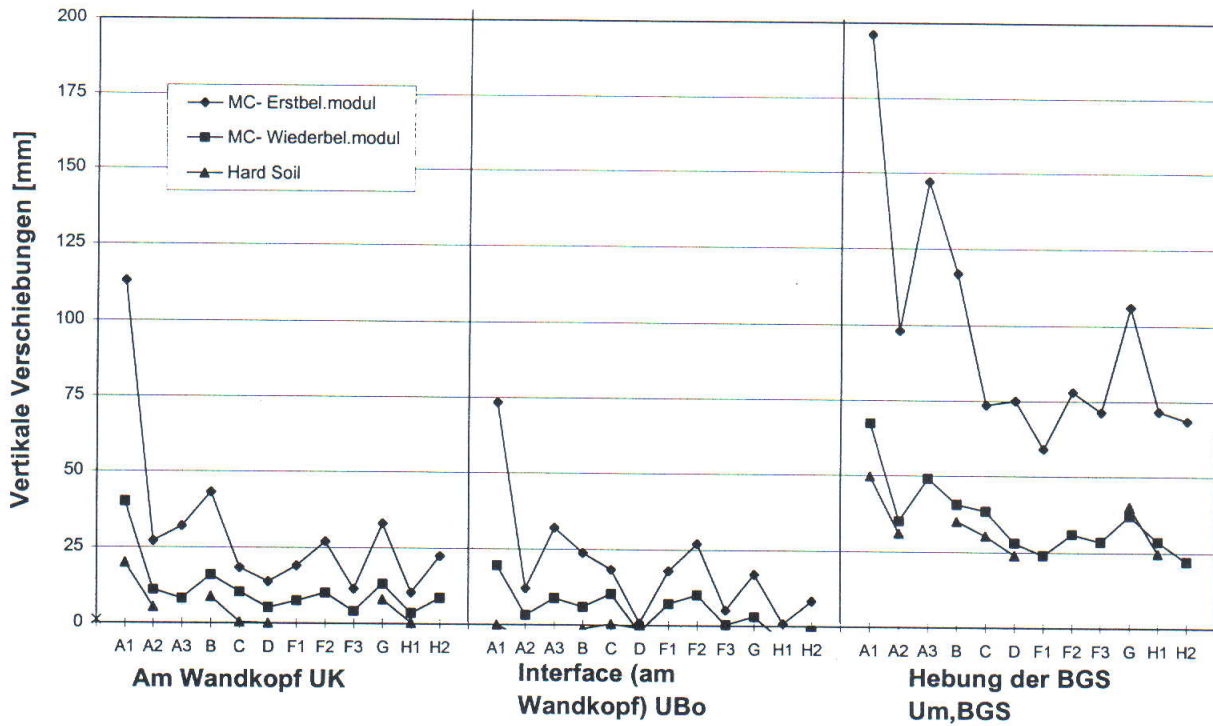


d) Tiefe des maximalen Feldmomentes bzw. der maximalen horizontalen Wandverschiebung

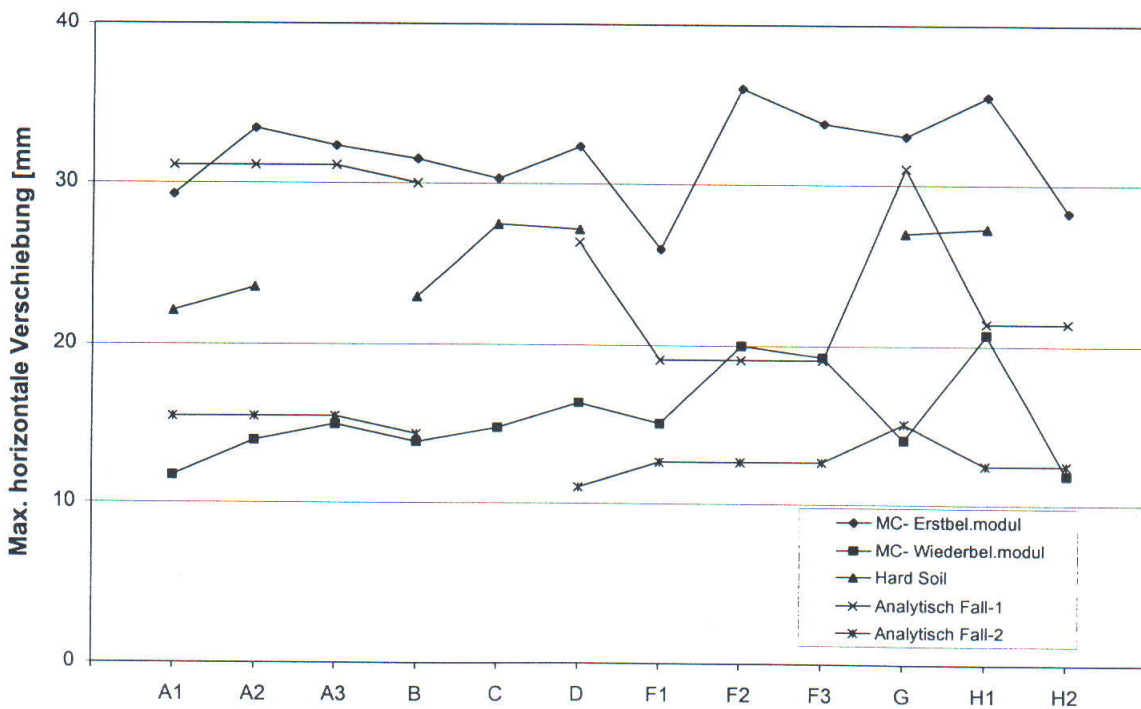


3.4 Verschiebungen: Sand - Vollaushub

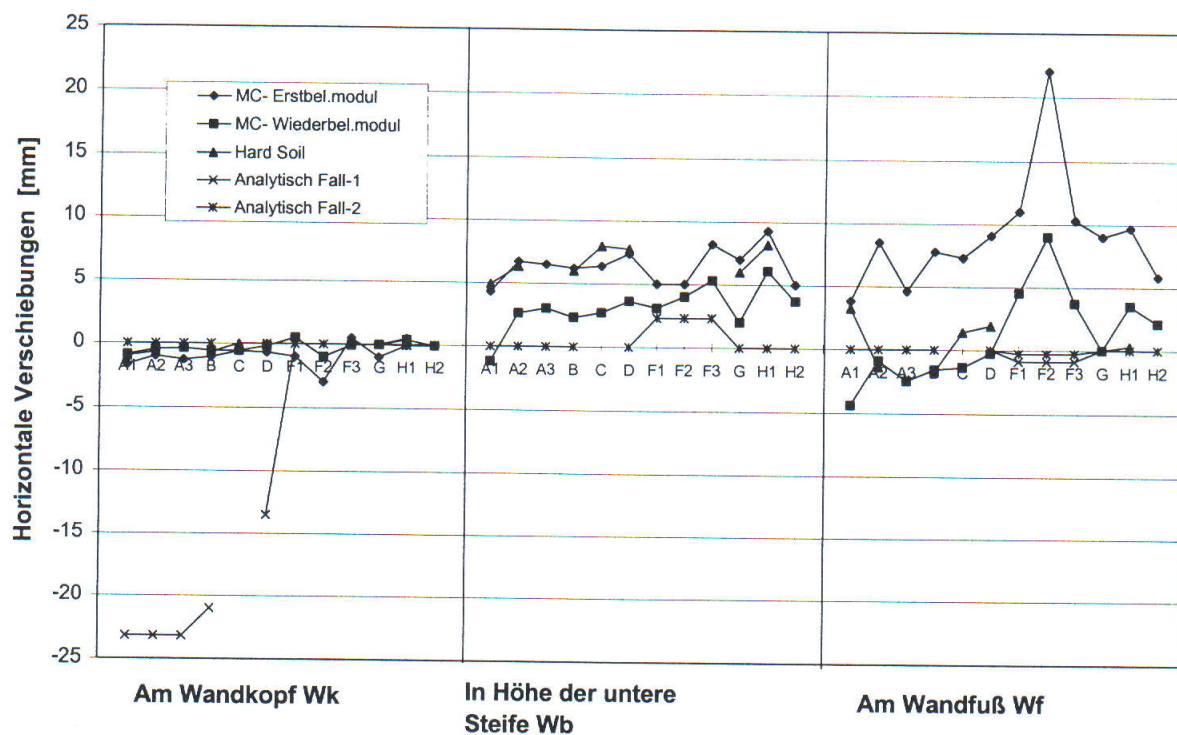
a) Vertikalverschiebung am Wandkopf und Hebung der BGS



b) Maximale horizontale Wandverschiebung

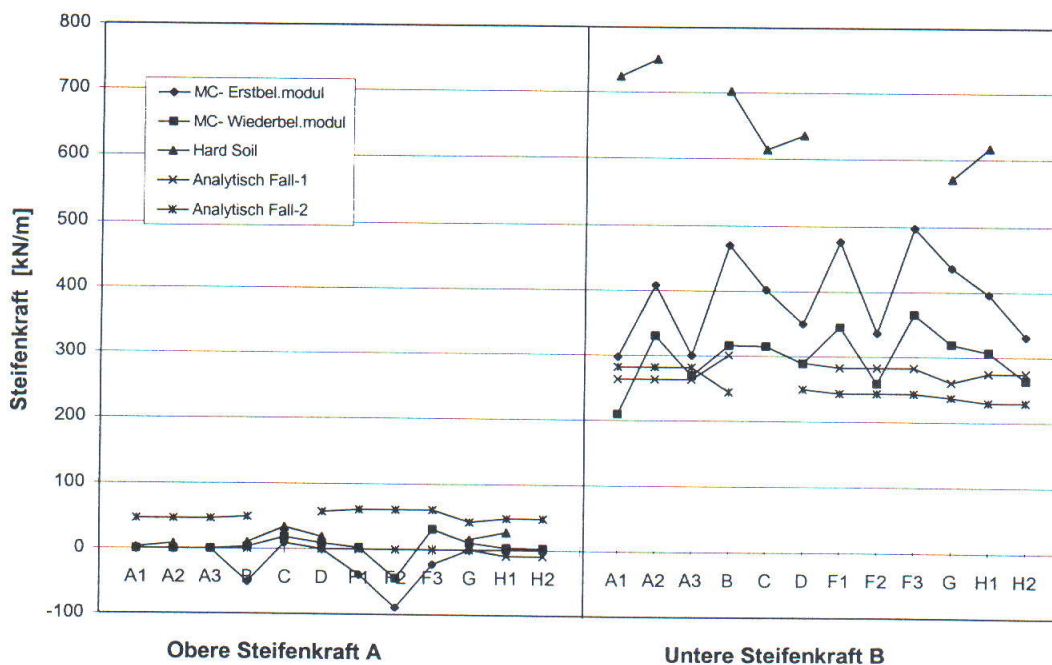


c) Horizontale Wandverschiebungen

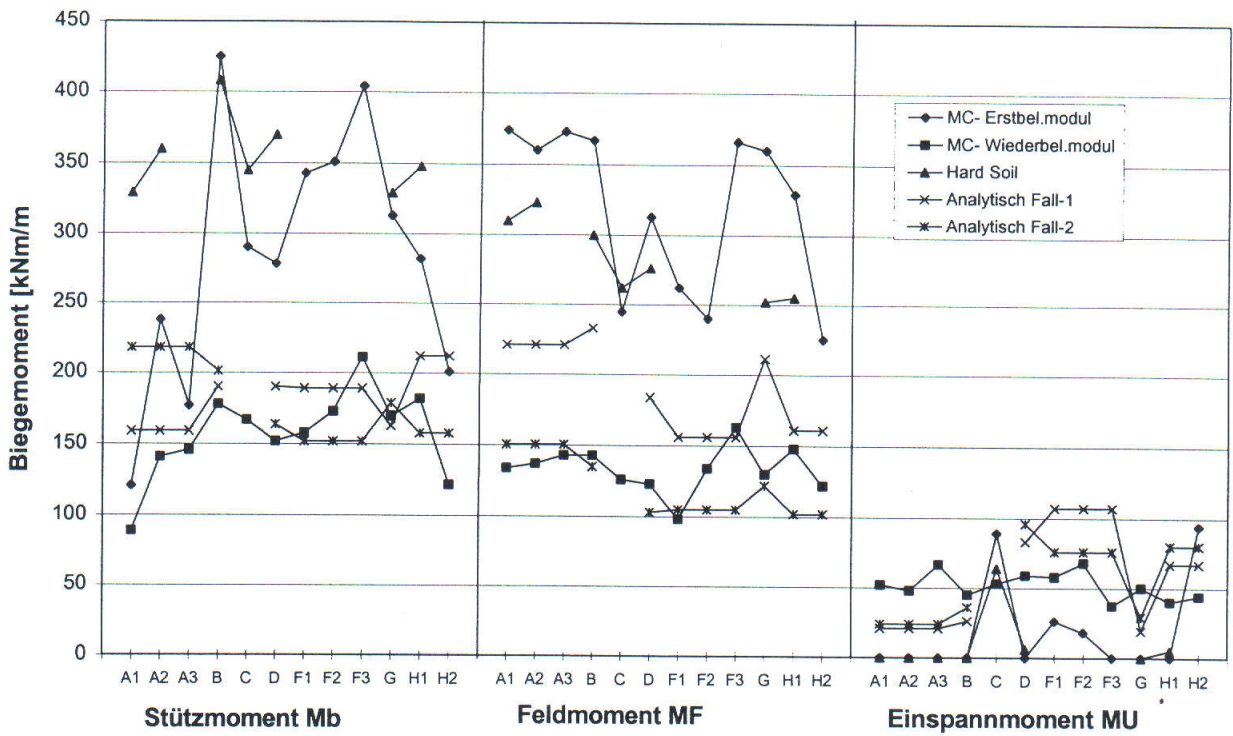


3.5 Erddruckkräfte und Schnittgrößen: Lehm - Vollaushub

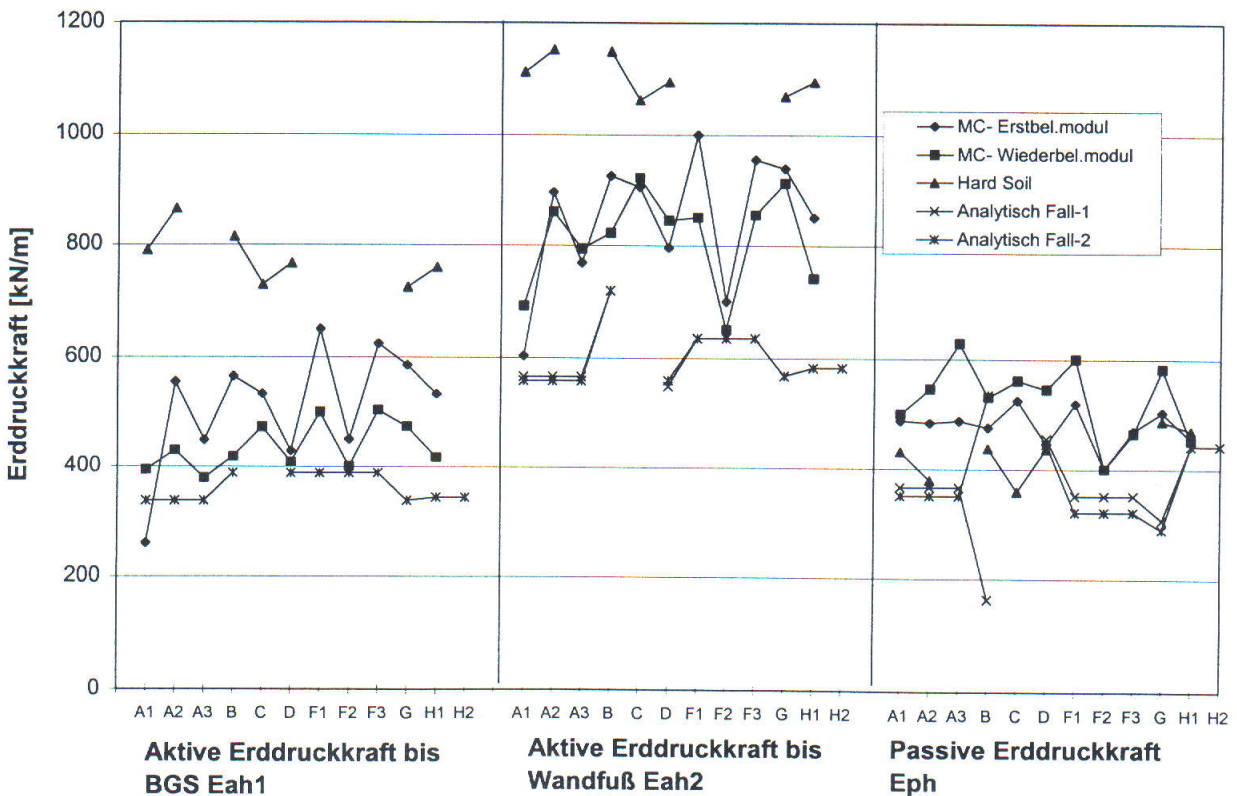
a) Steifenkräfte



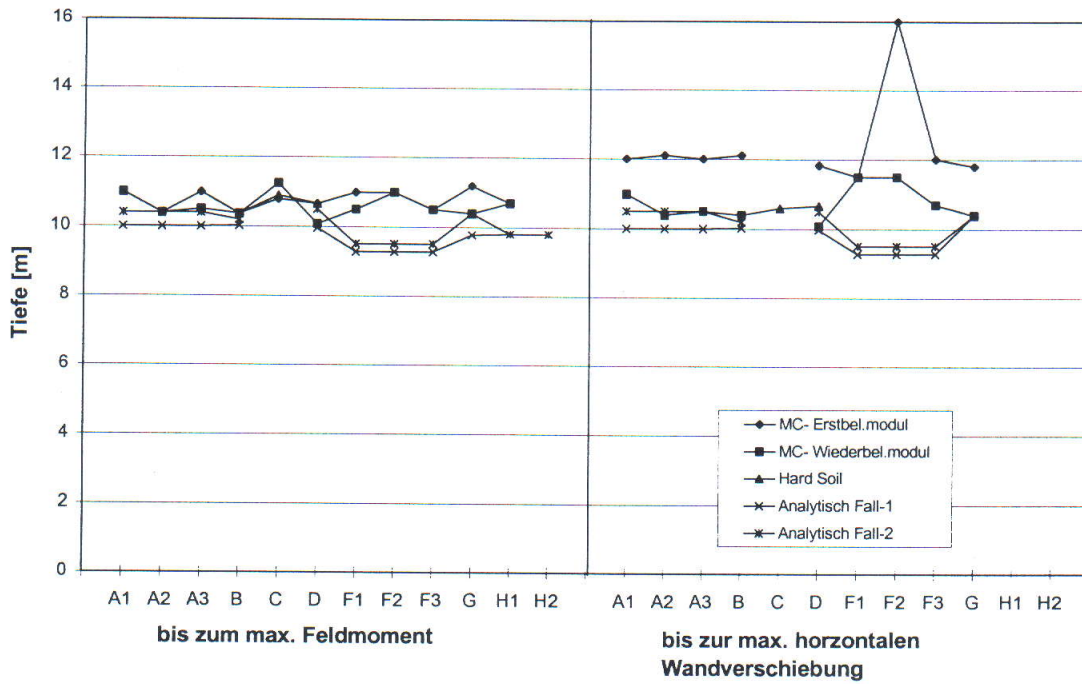
b) Biegemomente der Wand



c) Erddruckkräfte

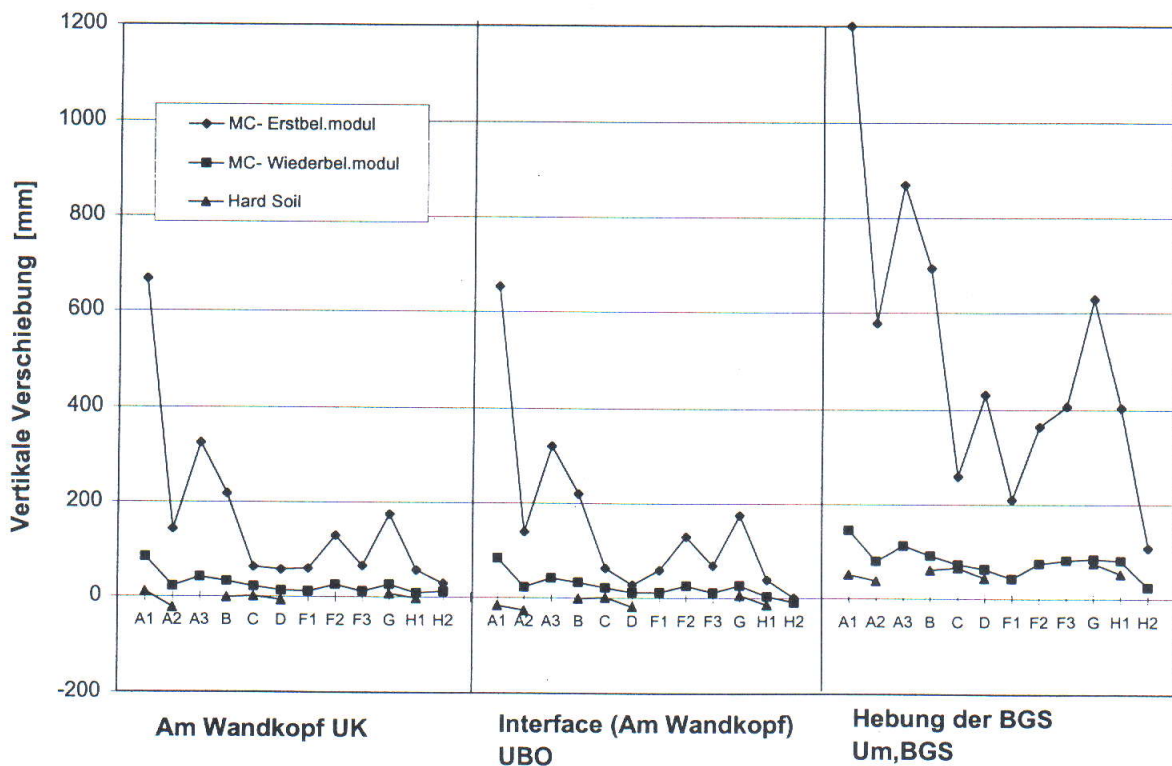


d) Tiefe des maximalen Feldmomentes bzw. der maximalen horizontalen Wandverschiebung

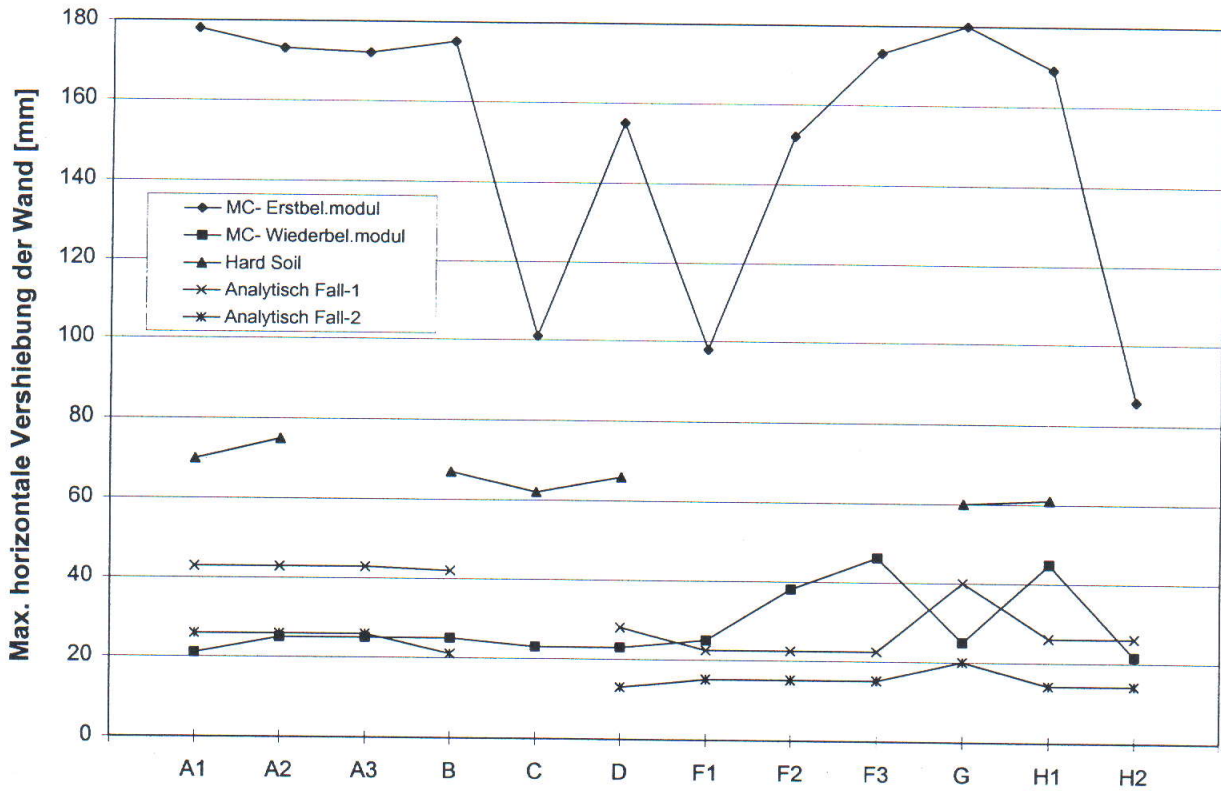


3.6 Verschiebungen: Lehm - Vollaushub

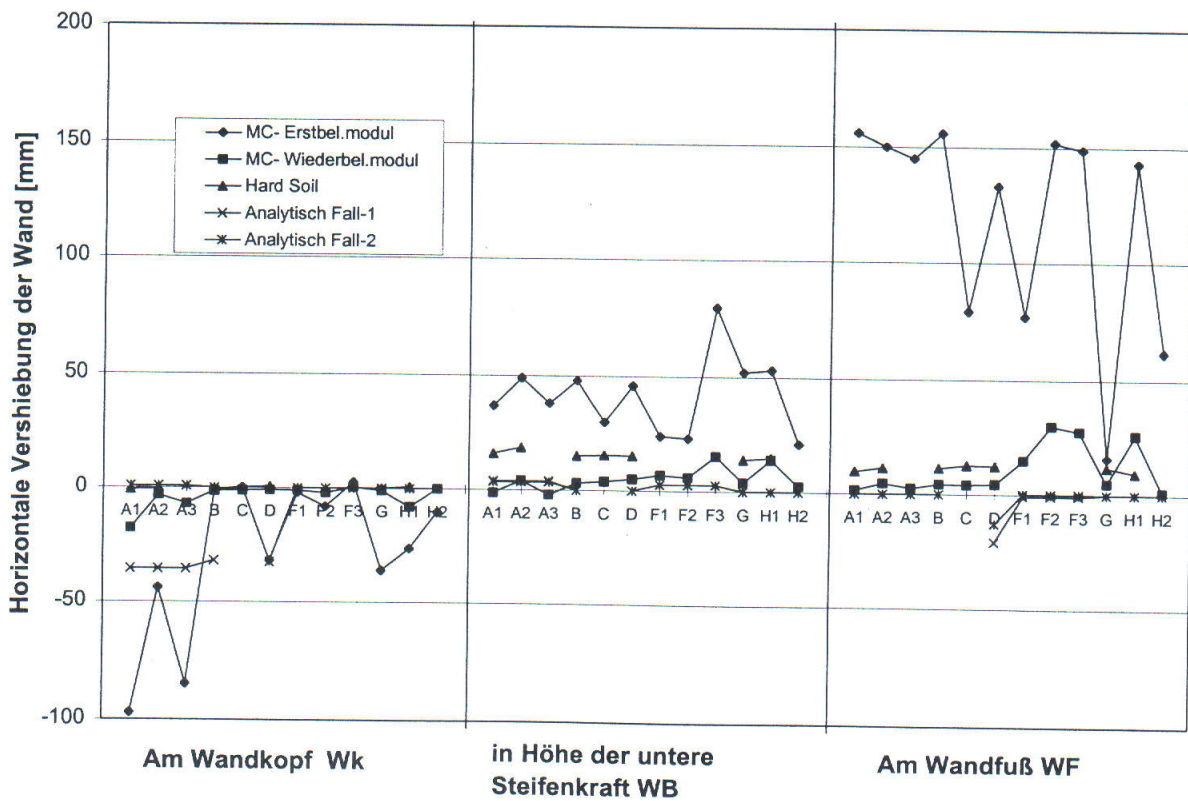
a) Vertikalverschiebung am Wandkopf und Hebung der BGS



b) Maximale horizontale Wandverschiebung

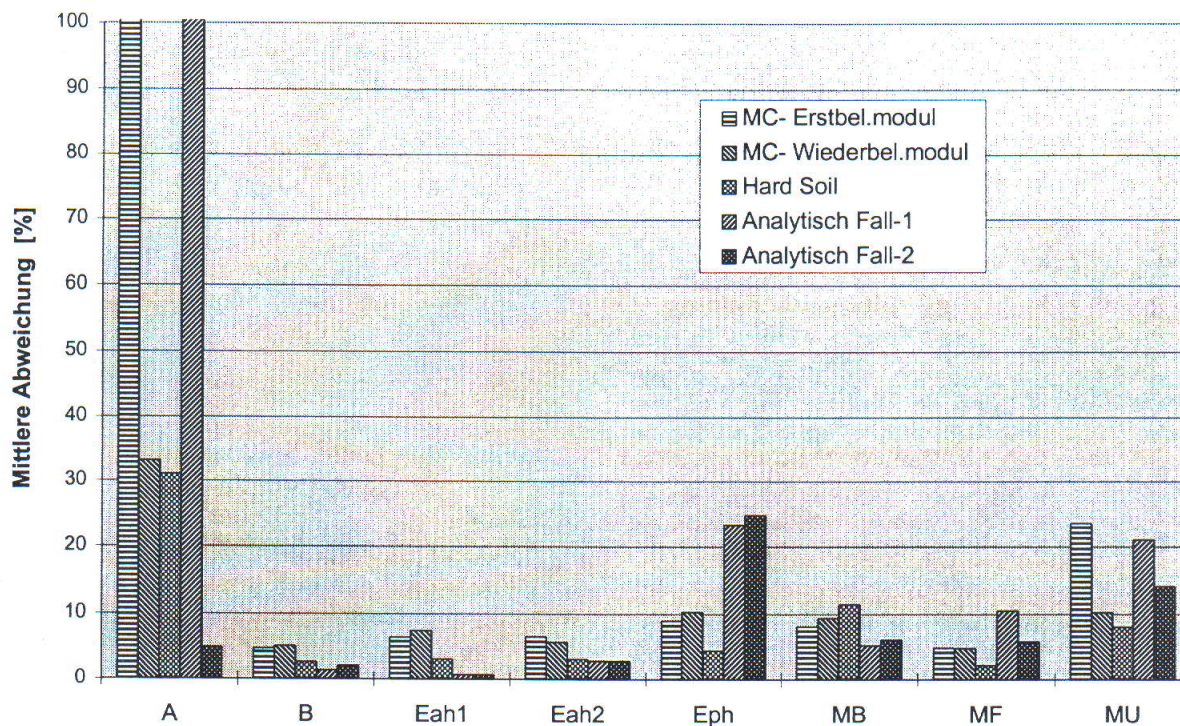


c) Horizontale Wandverschiebungen

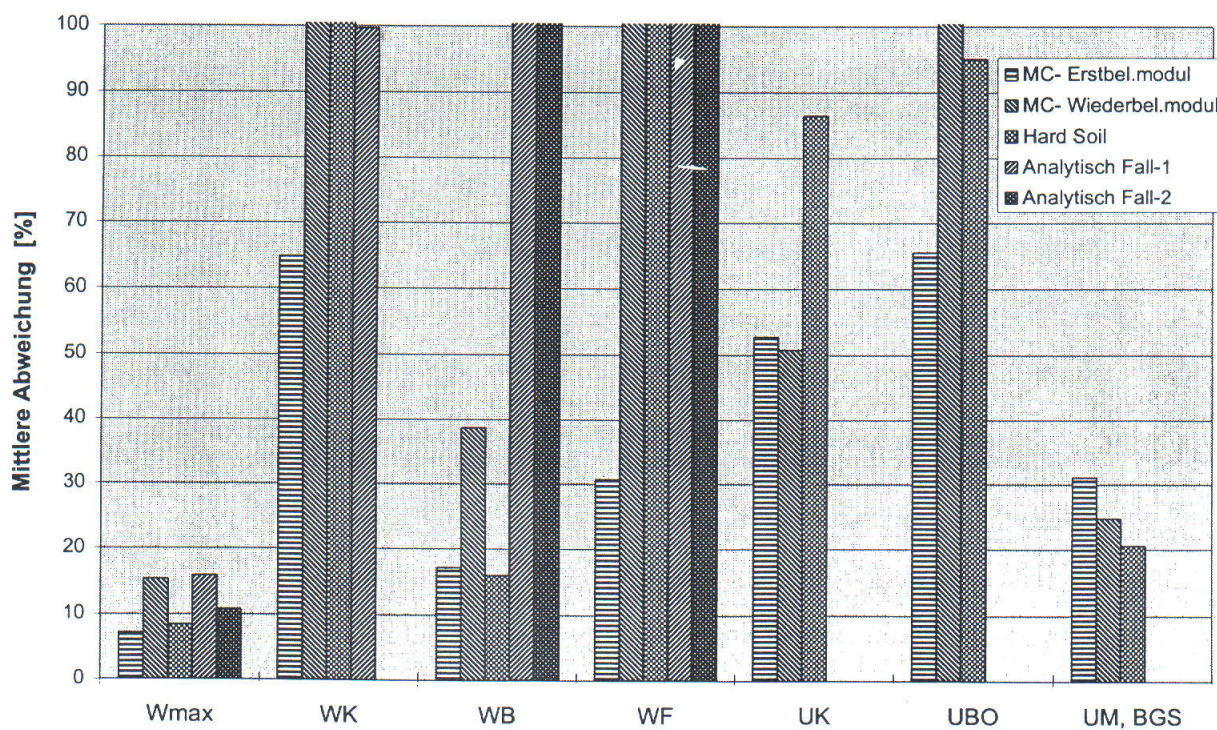


3.7 Mittlere Abweichung der Berechnungsergebnisse vom jeweiligen Mittelwert für die Bodenart Sand

a) Erddruckkräfte und Schnittgrößen

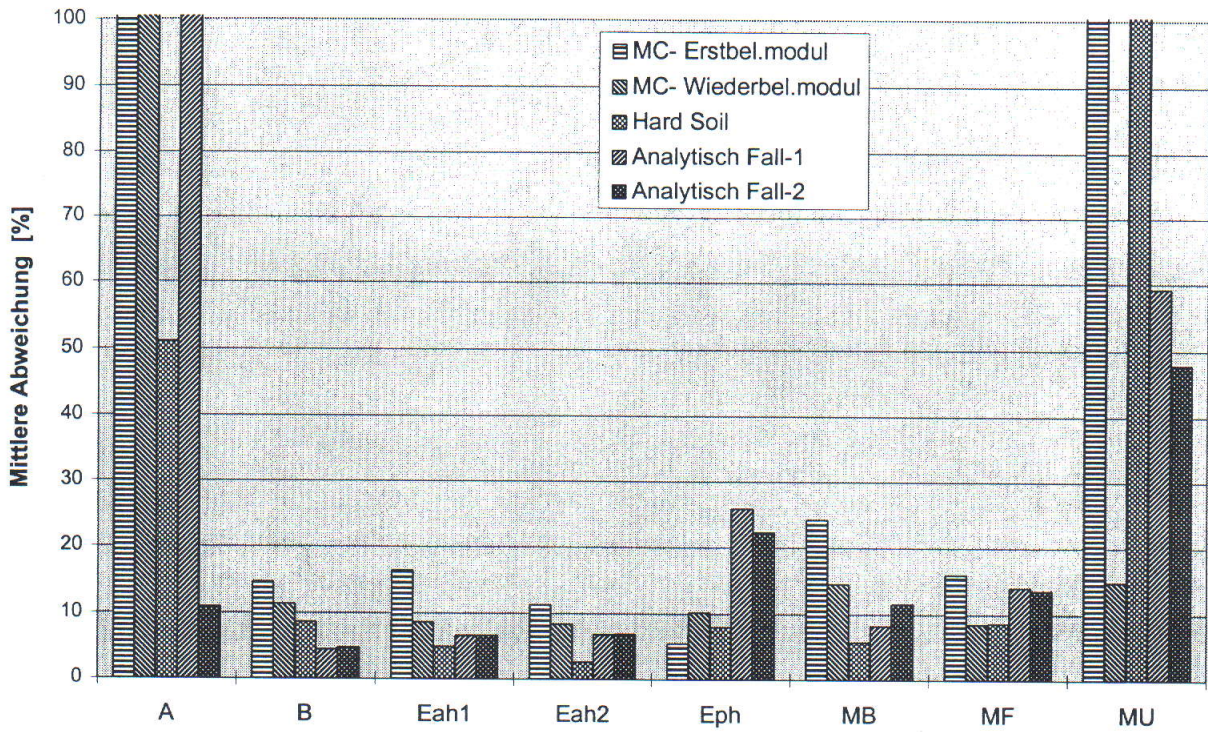


b) Verschiebungen

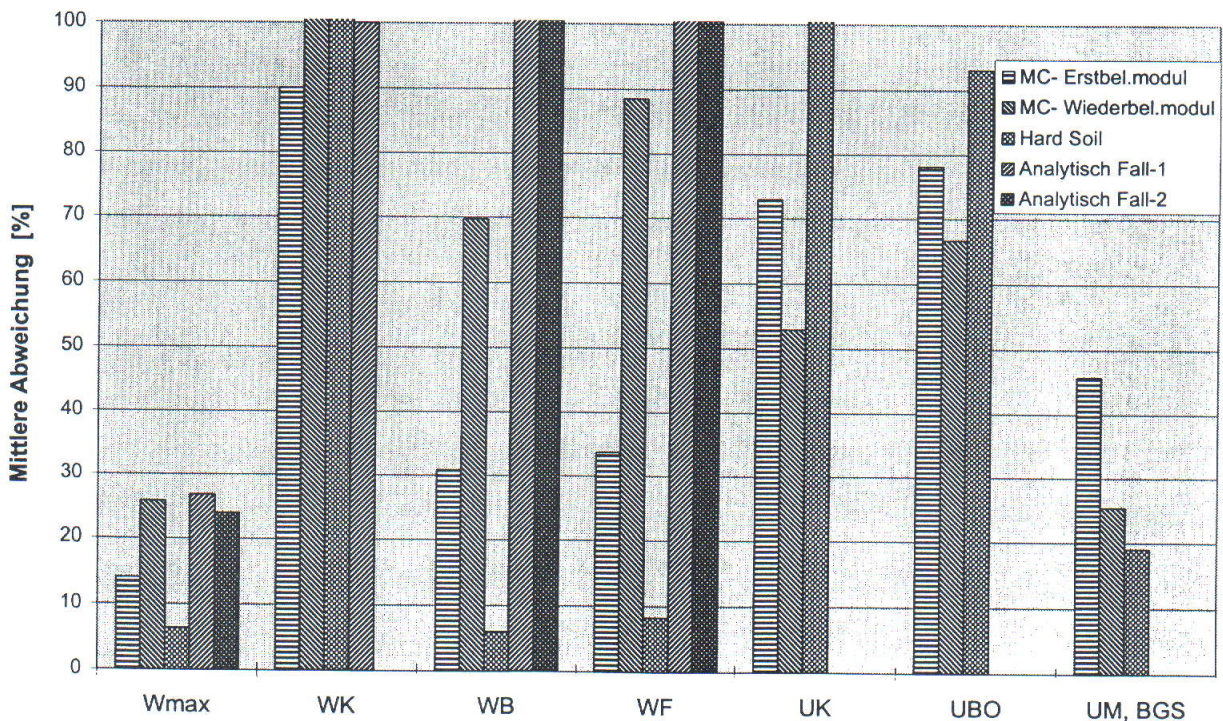


3.8 Mittlere Abweichung der Berechnungsergebnisse vom jeweiligen Mittelwert für die Bodenart Lehm

a) Erddruckkräfte und Schnittgrößen



b) Verschiebungen



3.9 Bewertung

Den Darstellungen nach Abschnitt 3.7 und 3.8 liegt zugrunde

$$\text{mittlere Abweichung [\%]} = \frac{\text{Betrag der Abweichung vom Mittelwert}}{\text{Mittelwert}} \times 100$$

Bei Abweichungen größer als 100% wurden diese in den Diagrammen nur bis 100 % dargestellt (Abweichungen bis zu Maximum 300 % in der Bodenart Sand und 2500 % in Lehm sind vorhanden)

Zusammenfassend kann folgende Bewertung vorgenommen werden:

- Die Abweichungen in den Berechnungsergebnissen sind von den unterschiedlichen Stoffgesetzen und Bodenkenngrößen abhängig.
- Im allgemeinen gibt es relativ gute Übereinstimmung in der Berechnung der Steifenkraft B , der Erddruckkraft und des Moments (mit Ausnahme einzelner Extremwerte).
- Es liegt auch eine gute Übereinstimmung in den maximalen horizontalen Wandverformungen vor, außer wenn mit dem einfachen Stoffansatz nach Mohr-Coulomb gerechnet wurde.
- Die Tiefe z_b Geländeoberfläche, in der die maximale horizontale Wandverformung bzw. das maximale Feldmoment auftritt, ist unabhängig von den Berechnungen und von den verwendeten Stoffgesetzen fast überall gleich.
- Dagegen sind die Abweichungen besonders bei den vertikalen Verformungen sehr groß.
- Die festgestellten Abweichungen der Ergebnisse sind i.d.R. begründet in:
 - a) unterschiedliche Netzausschnittgröße und Elementanzahl;
 - b) unterschiedliche Knotenanzahl in einem Element;
 - c) unterschiedliche Wandsteifigkeit;
 - d) unterschiedlich abgeleitete Elastizitätsmoduln.

4 Hinweise zu Erwartungen des Arbeitskreises „Baugruben“ an den Arbeitskreis AK 1.6 „Numerik in der Geotechnik“

4.1 Zusammenarbeit

Der Arbeitskreis „Baugruben“ ist zuständig für alle Fragen im Zusammenhang mit Standsicherheitsnachweisen für Baugrubenkonstruktionen. Der Schwerpunkt liegt dabei sicherlich auf herkömmliche analytische Berechnungsverfahren, wie sie auch in Zukunft überwiegend bei praktischen Baugrubenberechnungen zur Anwendung kommen werden. Dies beinhaltet auch Sicherheitsanforderungen im Zusammenhang mit Nachweisen zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Baugruben. Insofern sollte sich eine zukünftige Ausgabe der EAB auch mit dem Einsatz von numerischen Verfahren bei der Berechnung von Baugruben befassen.

Bezüglich einer Zusammenarbeit und Arbeitsteilung mit den AK 1.6 wird vom AK „Baugruben“ begünstigt, wenn der AK 1.6 Empfehlungen zu möglichst vielen numerischen Fragen im Zusammenhang mit Baugrubenberechnungen herausgibt.

Empfehlungen zur sicherheitstechnischen Behandlung dieser Verfahren auch im Zusammenhang mit herkömmlichen Berechnungsverfahren sollten aber weitgehend in der EAB behandelt werden, soweit sie nicht ohnehin in der übergeordneten DIN 1054-neu und später ggf. in EN 1997-1 enthalten sein werden.

4.2 Gedankensammlung des Arbeitskreises „Baugruben“ für die Erarbeitung von Empfehlungen zum Einsatz numerischer Berechnungsverfahren bei Standsicherheitsnachweisen für Baugrubenkonstruktionen

Unabhängig von den derzeit vom AK 1.6 erarbeiteten Empfehlungen „Baugruben“ hat sich der Arbeitskreis „Baugruben“ bereits vor einiger Zeit Gedanken über Empfehlungsinhalte gemacht, die im Zusammenhang mit dem Thema geregelt sein sollten, bzw. über die Empfehlungen erwünscht wären. Dabei sollte so viel wie möglich von dem zuständigen Fachausschuß „Numerik“ behandelt werden. Der AK „Baugruben“ sieht seine Aufgabe im Sinne der Ausführungen von Abschnitt 4.1.

Nachfolgend ist die Gedankensammlung nochmals aufgelistet, wobei anzumerken ist, daß ein Großteil der Punkte bereits in unterschiedlicher Empfehlungsdichte in dem vorliegenden Ka-

pitel 3 „Baugruben“ des AK 1.6 wiederzufinden ist. Der Arbeitskreis „Baugruben“ möchte damit zur weiteren Diskussion beitragen.

4.2.1 Anforderungen an numerische Programme

- a) *Welche Verfahren sind auf Baugruben anwendbar ?*
 - Finite-Elemente-Methode
 - Differenzen-Methode
 - Randelemente-Methode
- b) *Leistungsanforderungen:*
 - Darstellung des Primärspannungszustandes
 - Modellierung des Baugrubenaushubs
 - Berechnung mit effektiven und Porenwasserdruckspannungen
 - Abbildung der Baugrubenwände durch Wand- bzw. Balkenelemente und damit Angabemöglichkeit von Schnittgrößen
 - Abbildung von Ankern und Steifen
 - Modellierung der Kontaktfuge Wand-Boden mit Angabe von Wandreibung
 - Darstellungsmöglichkeit der Erd- und Wasserdrücke auf die Wand
- c) *Soffgesetze und Empfehlungen für deren Eignung bei Baugrubenberechnungen:*
 - Einfaches Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb
 - Überkonsolidierte bindige und nichtbindige Böden unter Berücksichtigung von Erst- und Entlastungsvorgängen
 - Normalkonsolidierte bindige Böden unter Berücksichtigung von Erst- und Entlastungsvorgängen
- d) *Darstellungsmöglichkeiten der Berechnungsergebnisse:*
 - Auflisten, was ein Programm an Ergebnisdarstellungen für Baugrubenberechnungen können muß

4.2.2 Berechnungsansätze

- a) *Allgemeines zum Berechnungsablauf:*
 - Abmessungen der Konstruktionselemente vorschätzen
- b) *Modellbildung:*
 - bei Trägerbohlwänden
 - bei der Kraftübertragung der Verpressanker auf den Boden
- c) *Primärspannungszustand:*
 - Erdruhedruck aus Bodeneigengewicht

- Erdruhedruck aus vorhandenen Gebäuden

d) *Spezielle FEM-Probleme:*

- Inaktivsetzen der Aushubelemente
- Grundwasserabsenkung
- Erd- und Wasserdrücke

e) *Ermittlung der Schnittgrößen:*

4.2.3 Nachweis der Bauwerksabmessungen

a) *Ausgangswerte für die Bemessung:*

- Berechnung mit charakteristischen Bodenkenngrößen

b) *Nachweis des Erdaufagers:*

- Spannungen zur Gesamtkraft integrieren
- konventionelle Berechnung als Kontrolle

c) *Bemessung der Wand auf weitere Einzelteile (Steifen und Anker):*

- Schnittgrößen aus Numerik
- Bemessung konventionell nach EAB

4.2.4 Nachweis der Gesamtstandsicherheit

a) *Ausgangswerte für die Bemessung:*

- Berechnung mit charakteristischen Bodenkenngrößen
- Berechnung mit Bemessungswerten der Bodenkenngrößen

b) *Geländebruch:*

c) *Tiefe Gleitfuge:*

d) *Aufbruch der Baugrubensohle:*

Dafür muss eine Einordnung der numerischen Ergebnisse gefunden werden.

4.2.5 Nachweise bei besonderen Randbedingungen

a) *Verankerte Baugrubenwände*

b) *Baugruben mit besonderem Grundriss*

c) *Baugruben neben Bauwerken*

d) *Baugruben im Wasser*

e) *Baugruben in nicht standfestem Fels*

4.2.6 Anforderungen an die Ausgabedokumentation

Was muss in einer Baugrubenstatik mit numerischen Verfahren ausgegeben werden, damit sie z. B. auch prüfbar ist durch Plausibilitätskontrollen und Vergleichsrechnungen ?

4.2.7 Gebrauchstauglichkeitsnachweise und Verformungsprognosen

- a) Anbinden an herkömmliche Berechnung; bei Einhaltung bestimmter Sicherheiten i.d.R. nur kleine Verformungen.
- b) Deutlich machen, daß treffsichere Verformungsprognosen noch nicht möglich sind; nur wenn die Stoffparameter an Messungen mit vergleichbaren Randbedingungen kalibriert sind.
- c) Aber gutes Verfahren, um verformungswirksame Konstruktionsformen bzw. -elemente durch Parameterstudien im Vergleich zu untersuchen und daran die Baugrubenkonstruktion zu optimieren.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
AK 1.6 "Numerik in der Geotechnik"

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert

Beiträge zum Workshop

**VERFORMUNGSPROGNOSE FÜR
TIEFE BAUGRUBEN**

16. und 17. März 2000

Stuttgart

Redaktion
H.F. Schweiger
Institut für Bodenmechanik und Grundbau
Arbeitsgruppe Numerische Geotechnik
Technische Universität Graz