

1 Steifemodulverfahren mit geschichtetem Boden

1.1 Bettungsmodulverfahren

Beim Bettungsmodulverfahren wird der Boden durch ein Federsystem ersetzt. Das Modell geht davon aus, dass die Federn keine Verbindung untereinander haben. Eine Belastung des Bauwerks auf dem Baugrund verursacht nur in der Feder unter der Last eine Verformung. Die aus der Federkonstante resultierenden Durchbiegungen der Bodenplatte stimmen nicht mit der zu erwartenden Setzungsmulde überein.

Der Bettungsmodul ist keine Baugrundkonstante, da er von der Bauwerksgeometrie bzw. der Größe und dem Angriffspunkt der Lasten abhängig ist. Besonders an Bauwerksrändern oder unter konzentrierten Lasten wirkt der Boden mit einem erhöhten effektiven Bettungsmodul, so dass bei der praktischen Anwendung in diesen Bereichen der Bettungsmodul oftmals um den Faktor 2 bis 4 vergrößert wird.

Der große Vorteil des Bettungsmodulverfahrens liegt darin begründet, dass die Berechnung, falls keine Zugspannungen in der Bodenfuge vorliegen, linear durchgeführt werden kann. Die Nachweisschnittgrößen dürfen also durch Überlagerung der Lastfallergebnisse ermittelt werden.

Demgegenüber steht die Unsicherheit, eine realistische Verteilung des Bettungsmoduls zu finden.

1.2 Steifemodulverfahren

Beim Steifemodulverfahren wird iterativ eine Verteilung des effektiven Bettungsmoduls ermittelt, so dass die Verformungen des Bauwerks in der Bodenfuge mit der Setzungsmulde aus den Bodenpressungen übereinstimmen.

Die Durchbiegungen der Flächenpositionen werden zunächst unter Annahme einer Verteilung des Bettungsmoduls berechnet. Aus den sich daraus ergebenden Bodenpressungen wird mit dem verwendeten Bodenmodell die Setzungsmulde ermittelt.

Die angenommenen Bettungsmoduln werden dann solange iterativ angepasst, bis die Durchbiegungen hinreichend genau der Setzungsmulde entsprechen.

Grundlage der Bodenberechnung ist die Kenntnis der Setzungsmulde, die sich für eine Einzelast bzw. eine kreisförmige Last ausbildet. Die Setzungsmulde der Flächenpositionen ergibt sich dann durch Überlagerung dieser Grundzustände, so dass beliebige Geometrien und Laststellungen vorliegen können.

Zur Berechnung der Setzungen eines elastischen (unendlichen) Halbraums reicht die Angabe des Verformungsmoduls aus. Die Setzungsmulde lässt sich nach den Formeln von Boussinesq berechnen [1].

1.3 Boden mit mehreren Schichten

In natürlichen Böden sind die das Verformungsverhalten des Materials kennzeichnenden Größen auf Grund der Inhomogenitäten in den seltensten Fällen konstant.

Um realistischere Setzungen zu erhalten, können beim geschichteten Boden mehrere horizontal verlaufende Bodenschichten mit unterschiedlichen Stoffparametern verwendet werden.

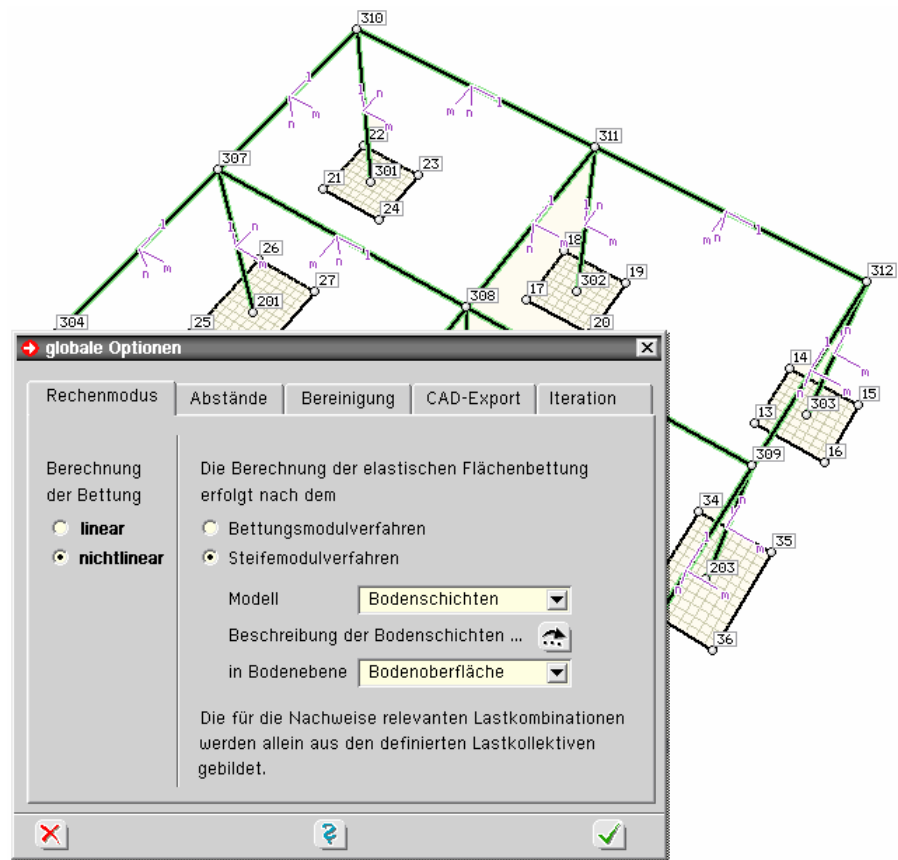
Die Schichten unterscheiden sich in ihrer Dicke und den elastischen Eigenschaften, die durch die Querkontraktionszahl (Poissonzahl) und dem E-Modul beschrieben werden.

Der E-Modul kann abhängig von den vom Bodenmechaniker ermittelten Bodenkennwerten als Elastizitätsmodul E , Steifemodul E_s oder Verformungsmodul E_v (auch Rechenmodul) eingegeben werden. An die letzte Schicht schließt sich eine unnachgiebige Schicht an.

	Elastizitätsmodul E	Steifemodul E_s	Verformungsmodul E_v
E	1	$E = \frac{1-\nu-2\cdot\nu^2}{1-\nu} \cdot E_s$	$E = (1-\nu^2) \cdot E_v$
E_s	$E_s = \frac{1-\nu}{1-\nu-2\cdot\nu^2} \cdot E$	1	$E_s = \frac{(1-\nu) \cdot (1-\nu^2)}{1-\nu-2\cdot\nu^2} \cdot E_v$
E_v	$E_v = \frac{1}{1-\nu^2} \cdot E$	$E_v = \frac{1-\nu-2\cdot\nu^2}{(1-\nu) \cdot (1-\nu^2)} \cdot E_s$	1

Besonderheiten bei der Berechnung in *4H-ALF3D* (Faltwerk)

Bei der Berechnung mit dem Steifemodulverfahren im Faltwerkprogramm *4H-ALF3D* ist zu beachten, dass das Bodenmodell nur bei Positionen einer wählbaren Ebene zur Anwendung kommt.



Positionen außerhalb dieser Ebene werden mit dem Bettungsmodulverfahren und dem angegebenen Bettungsmodul C_{bz} behandelt.

Mit den Bettungszahlen C_{rx} und C_{ry} in der Ebene kann eine kontinuierliche Festhaltung durch Flächenfedern als eine Art Reibung modelliert werden, ohne Punkt- bzw. Linienfedern verwenden zu müssen. Diese Federn werden bei allen Bodenmodellen (Bettungsmodulverfahren und Steifemodulverfahren) zusätzlich zu den Bettungsmoduln angesetzt.

Beispiel: Starres Fundament auf geschichtetem Untergrund

Eine starre Platte mit exzentrischer Einzellast (142.000 kN) wurde mit dem Programm 4H-FUND berechnet. Die Setzungsrechnung erfolgt hier unter Anwendung geschlossener Formeln entspr. DIN 4019:2015-05.

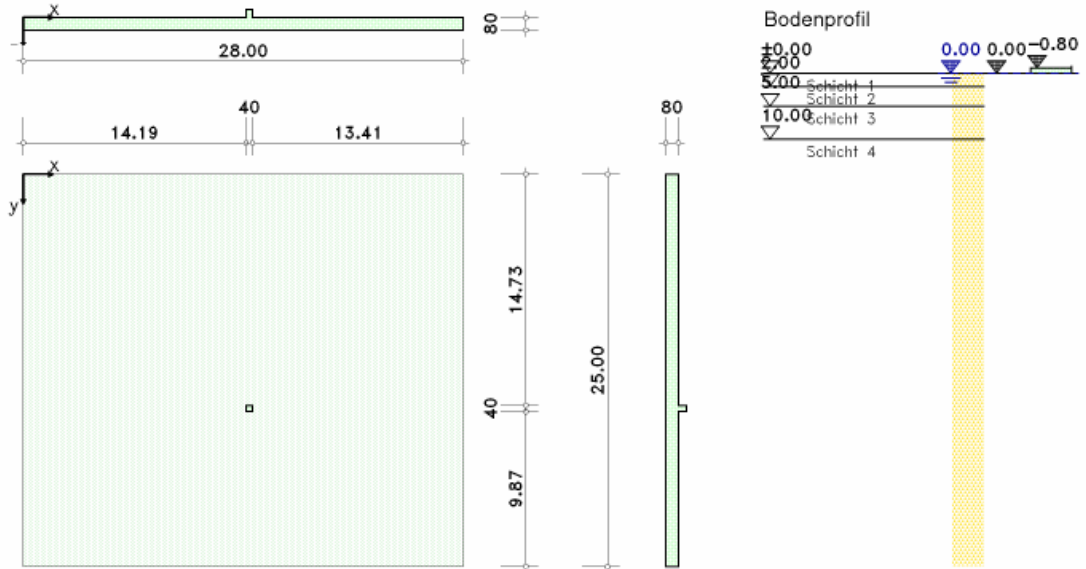
FUNDAMENT

4H-FUND Version: 12/2022-11

Einzelfundament

Äußere Standsicherheit nach DIN EN 1997-1:2014-03 mit NA-Deutschland
Ergänzende Regeln nach DIN 1054:2021-04, DIN 4019:2015-05

Maßstab 1:400



1. Bodensituation

Die Einbindetiefe des Fundamentes beträgt $t = 0.00$ m.

1.1. Bezeichnung und Kennwerte der Bodenschichten

Hinweis: Die Dicke der letzten Schicht wird als unendlich angenommen.

Schicht	d m	z m	γ kN/m³	γ^* kN/m³	φ °	c_k kN/m²	E_m MN/m²	δ_p °
Schicht 1	2.00	0.00	19.00	9.00	32.0	---	25.20	auto
Schicht 2	3.00	2.00	19.00	9.00	32.0	---	27.50	auto
Schicht 3	5.00	5.00	19.00	9.00	32.0	---	31.40	auto
Schicht 4	20.00	10.00	19.00	9.00	32.0	---	44.40	auto

z - Kote an Oberkante der Schicht γ - Wichte γ^* - Wichte unter Auftrieb φ - Reibungswinkel

c_k - char. Kohäsion des drainierten Bodens E_m - mittl. Zusammendrückungsmodul δ_p - Wandreibungswinkel auf der passiven Seite

4.2.2. Ermittlung von Setzungsbeiwerten und Setzungsanteilen je Bodenschicht

Beiwert f für Setzung unter dem kennzeichnenden Punkt nach [3], Bnd. 2, Tab. 4

Beiwerte f_x/f_y für Schiefstellung eines starren Fundamentes nach [4], Abb. 19

Setzungsanteile aus mittlerer Last $s_{m,i} = \sigma_0' b_y (f_i - f_{i-1}) / E_{m,i}$

Setzungsanteile aus $M_{0,y}$ $s_{x,i} = b_x/2 \cdot M_{0,y} / (E_{m,i} b_y b_x^2) (f_{x,i} - f_{x,i-1})$

Setzungsanteile aus $M_{0,x}$ $s_{y,i} = b_y/2 \cdot M_{0,x} / (E_{m,i} b_x b_y^2) (f_{y,i} - f_{y,i-1})$

LK 1:

$\sigma_0' = 202.86$ kN/m²

$M_{0,x} = 345060.00$ kNm

$M_{0,y} = -55380.00$ kNm

Kote m	z m	f -	f_x -	f_y -	S_m cm	S_x cm	S_y cm
2.00	2.00	0.079	0.879	0.981	1.58	-0.14	0.96
5.00	5.00	0.178	1.410	1.558	1.83	-0.08	0.52
10.00	10.00	0.295	2.295	2.519	1.88	-0.11	0.75
30.00	30.00	0.547	3.463	3.726	2.88	-0.10	0.67

4.2.3. Resultierende Setzungen und Schiefstellung je LK

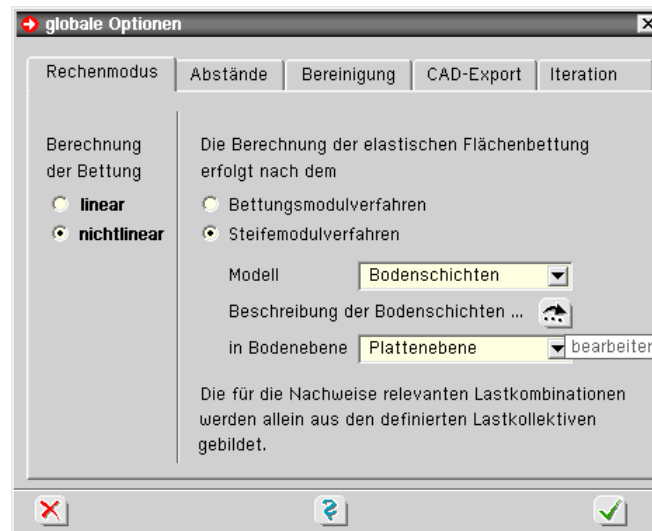
$s_1 = \Sigma(s_{m,i} + s_{x,i} + s_{y,i})$ $s_2 = \Sigma(s_{m,i} + s_{x,i} + s_{y,i})$ $s_3 = \Sigma(s_{m,i} + s_{x,i} + s_{y,i})$ $s_4 = \Sigma(s_{m,i} + s_{x,i} + s_{y,i})$ $s_5 = \Sigma s_{m,i}$

$\tan \alpha_x = 2 \Sigma s_{y,i} / b_y$ $\tan \alpha_y = 2 \Sigma s_{x,i} / b_x$



LK	S1 cm	S2 cm	S3 cm	S4 cm	S5 cm	S_{max} cm	α_x °	α_y °
1	4.9	5.7	11.5	10.7	8.2	11.5	0.1	-0.0

Zur Berechnung mit *##-ALFA* werden die Bodenschichten unter *globale Optionen*, Register *Rechenmodus*, Button *Beschreibung der Bodenschichten...* eingegeben.

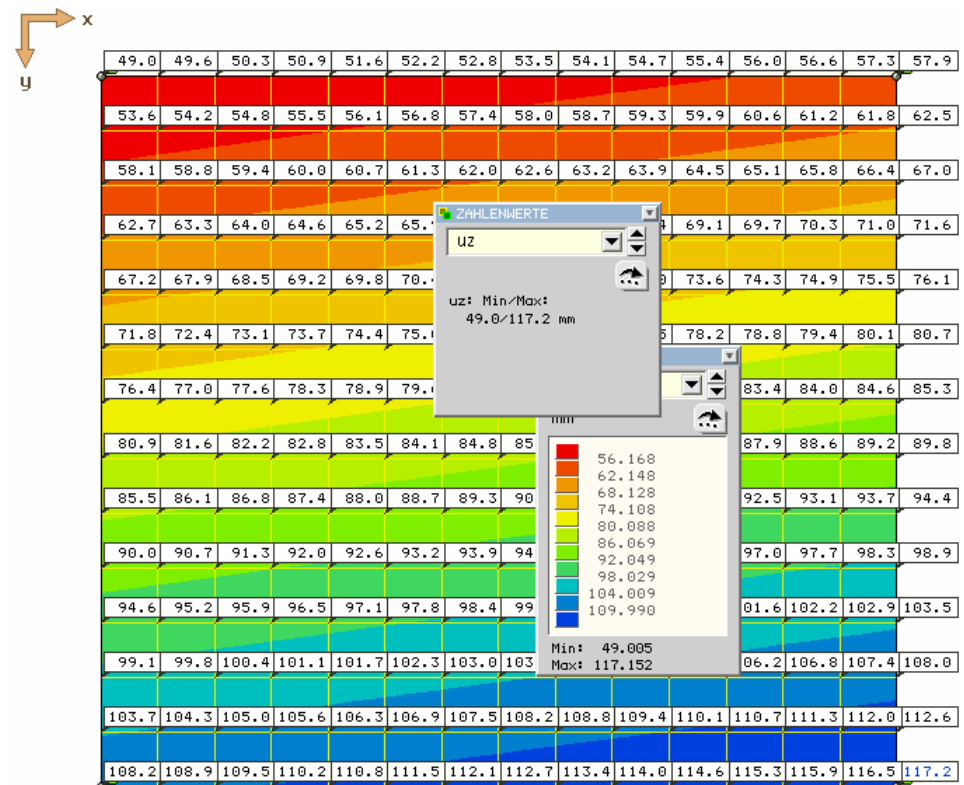


Art des Elastizitätsmoduls: Verformungsmodul

	E-Modul kN/m ²	ν -	Dicke m	Beschreibung
1:	25200.00	0.300	2.000	Schicht 1
2:	27500.00	0.300	3.000	Schicht 2
3:	31400.00	0.300	5.000	Schicht 3
4:	44400.00	0.300	20.000	Schicht 4

neu →

Die von *##-ALFA* (in mm) errechneten Setzungen in den Eckpunkten stimmen sehr gut mit denen von *##-FUND* (in cm) überein.



1.6

Beispiel: Einachsig ausgesteiftes Fundament auf horizontal geschichtetem Untergrund

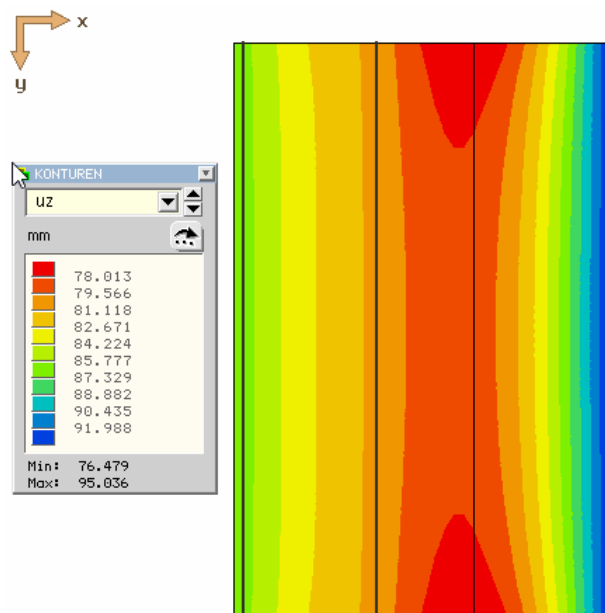
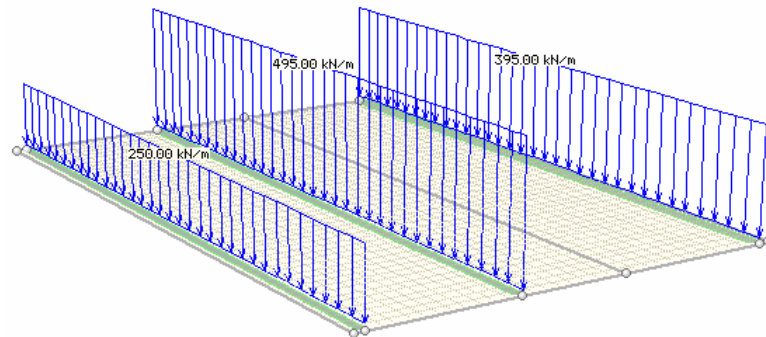
Das Beispiel ist dem Grundbau-Taschenbuch, fünfte Auflage, Teil 3 (Bsp. 6.2.2) entnommen. Der Untergrund besteht aus drei nachgiebigen Schichten.

Art des Elastizitätsmoduls ☒ Elastizitätsmodul ☐

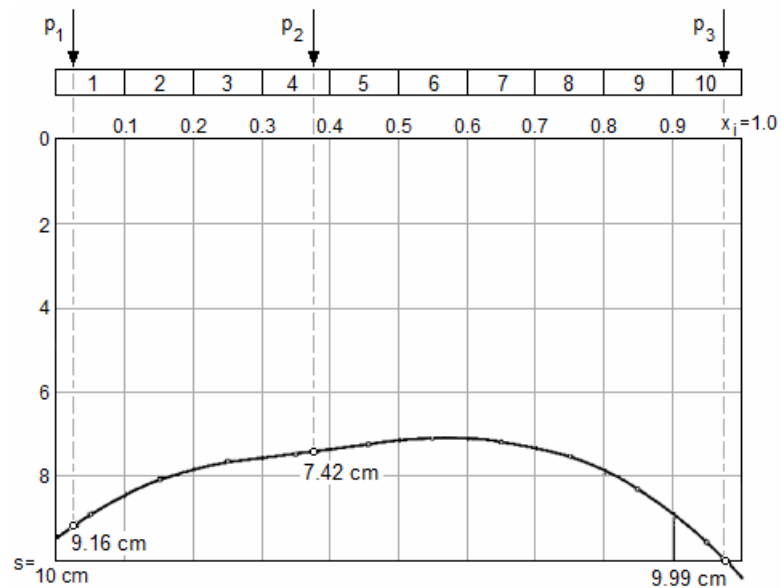
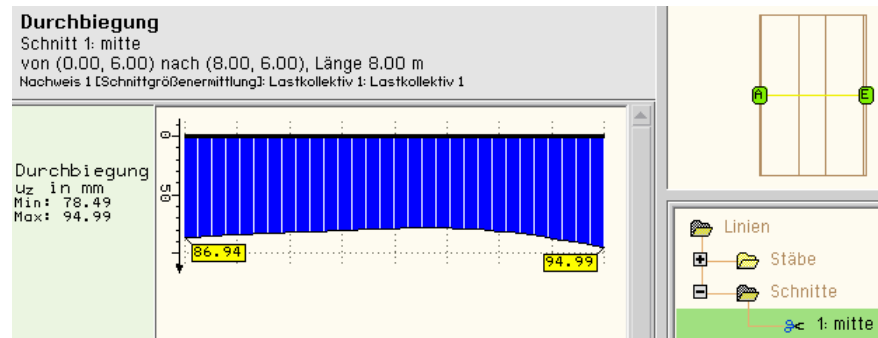
	E-Modul kN/m ²	ν -	Dicke m	Beschreibung
1:	5000.00	0.000	3.500	Schluff sandig
2:	8000.00	0.000	2.500	Ton
3:	11000.00	0.000	1.500	Ton sandig

neu →

Die Belastung setzt sich aus den Lastfällen Gleichlast (8.4 kN/m^2), den drei Linienlasten (s. unten) und der Summe aus Aushub (-25 kN/m^2) und Auftrieb (-14 kN/m^2) zusammen.



Die von #ALFA errechneten Durchbiegungen im mittleren Schnitt (in mm) stimmen recht gut mit den in der Literatur dargestellten Werten (in cm) überein.

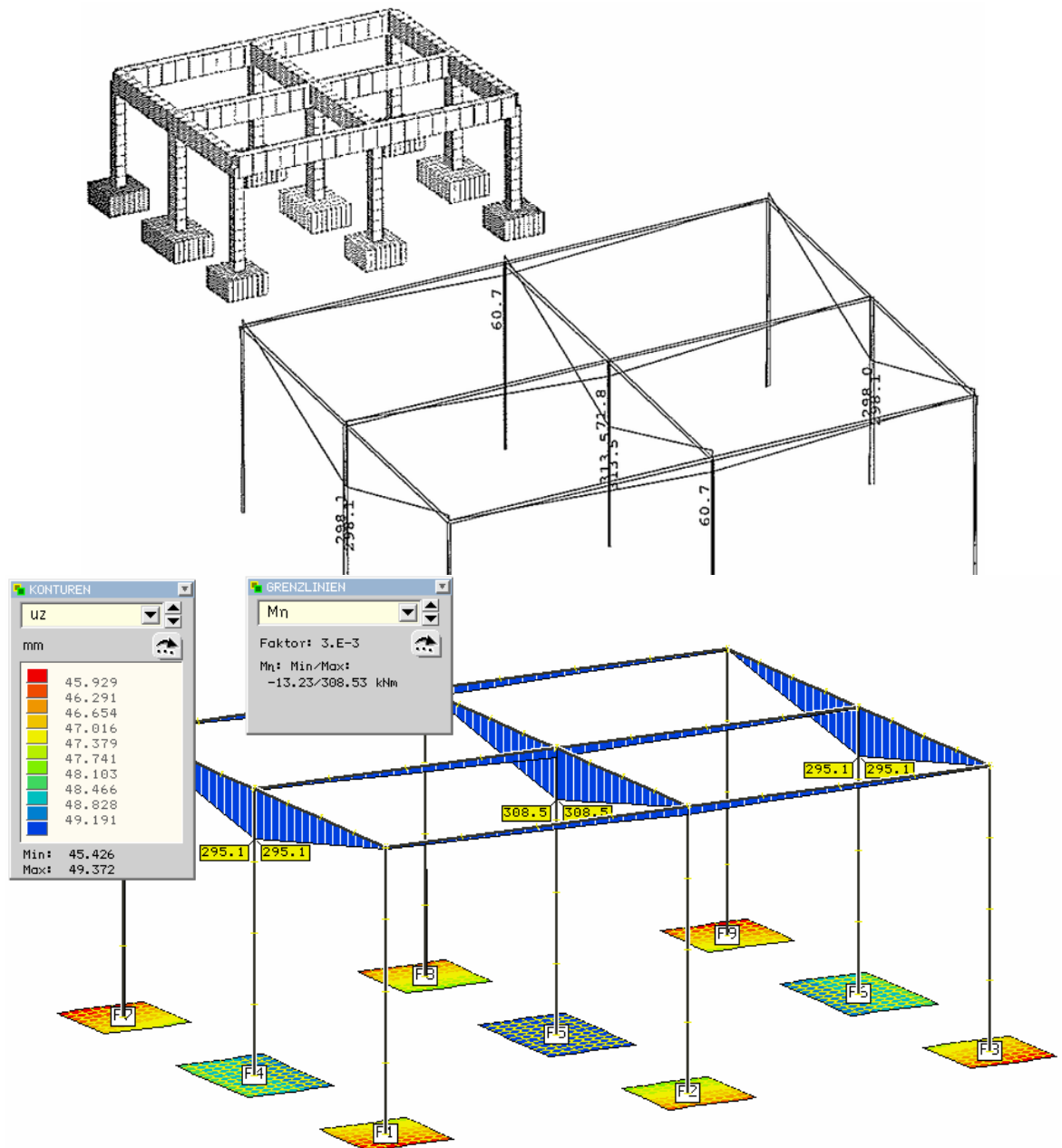


Beispiel: Faltwerk, Gruppe von Einzelfundamenten mit Überbau

Das Beispiel ist dem DIN Fachbericht 130, 1. Aufl. 2003 (Bsp. 8.1), entnommen.

Eine Gruppe von neun Einzelfundamenten wird über einen Überbau belastet. Die Setzungen der einzelnen Fundamente beeinflussen sich gegenseitig. In der Literatur werden drei Ausführungen des Überbaus auf unterschiedlich geschichtetem Boden untersucht.

Die Ergebnisse lassen sich mit #H-ALF3D sehr gut reproduzieren.



Der Vergleich der vertikalen Setzungen (in mm) der Fundamente zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Fundament	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Heft 130	45.46	46.13	45.46	47.55	48.31	47.55	45.46	46.13	45.46
4H-ALF3D	46.55	47.08	46.55	48.75	49.37	48.75	46.55	47.08	46.55

- /1/ J. Boussinesq: Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Gauthier-Villars, 1885
- /2/ J.C. Small, J.R. Booker: „Finite layer analysis of layered elastic materials using a flexibility approach. Part 2 - Circular and rectangular loadings“, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 23, May 1986
- /3/ Ulrich Smolczyk (Herausgeber): Grundbau-Taschenbuch, fünfte Auflage, Teil 3, Ernst & Sohn, 1997
- /4/ D. Fischer: Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk - Zulässige Setzungsdifferenzen sowie Beanspruchungen von Bauwerk und Gründung, Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 21, Oktober 2009
- /5/ DIN Fachbericht 130: Wechselwirkung Baugrund/Bauwerk bei Flachgründungen, 1. Auflage 2003, Beuth Verlag GmbH