

Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit eines Einzelpfahls

Programm: GEO5 Pfahl

Datei: Demo_manual_16.gpi

Ziel dieses Ingenieurhandbuchs ist es, die Verwendung des Programms GEO5 - PFAHL zur Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit eines Einzelpfahls zu erläutern.

Spezifikation der Eingabe der Aufgabe

Die allgemeine Eingabe der Aufgabe ist im Kapitel (12. *Pfahlgründungen - Einführung*) beschrieben. Führen Sie alle Berechnungen für die horizontale Tragfähigkeit eines Einzelpfahls gemäß der vorherigen Aufgabe in Kapitel 13. *Berechnung der vertikalen Tragfähigkeit eines Einzelpfahls* durch. Das Ergebnis der Lastkomponenten $N_1, M_{y,1}, H_{x,1}$ wirkt in der Ebene des Pfahlkopfes. Die Pfahldimensionierung führen Sie gemäß EN 1992-1 durch.

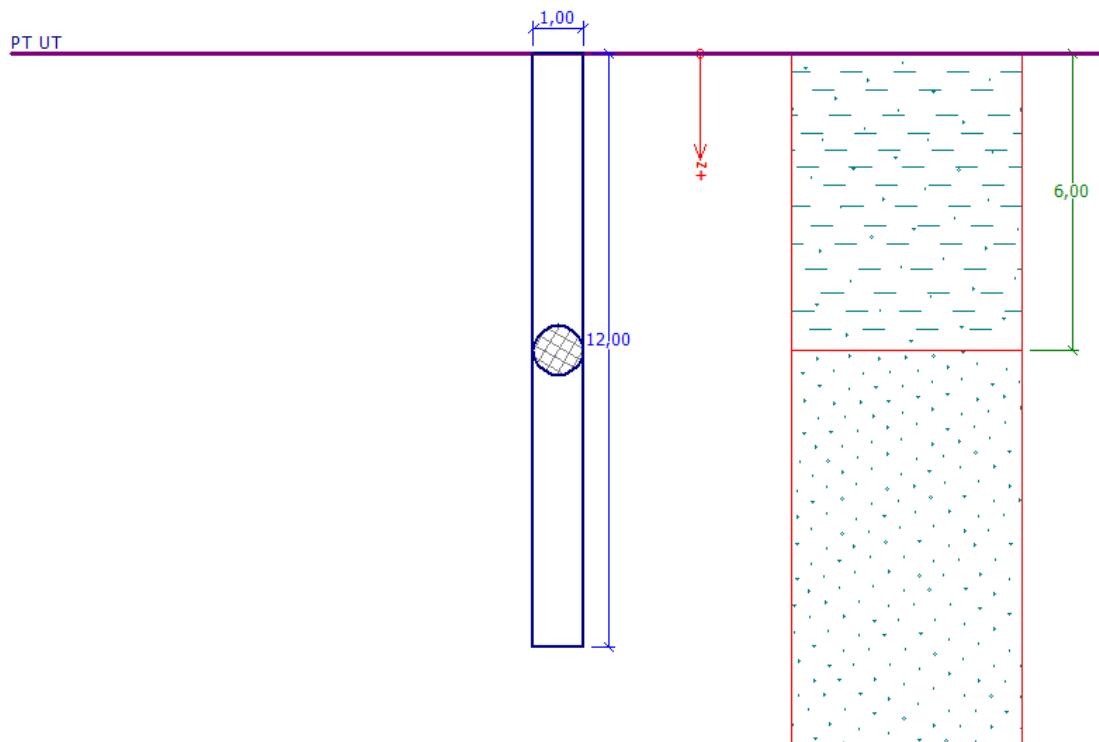


Diagramm der Eingabe der Aufgabe – Einzelpfahl

Lösung

Um diese Aufgabe zu berechnen, verwenden wir das Programm GEO5 - PFAHL. Im folgenden Text werden wir schrittweise die Lösung des Beispiels beschreiben.

Der quer belastete Pfahl wird nach der Finite-Elemente-Methode als ein Balken gelöst, der auf dem elastischen Winkler-Untergrund (elastischer Halbraum) positioniert ist. Die Bodenparameter entlang der Pfahllänge sind durch den horizontalen Bettungsmodul k_h charakterisiert.

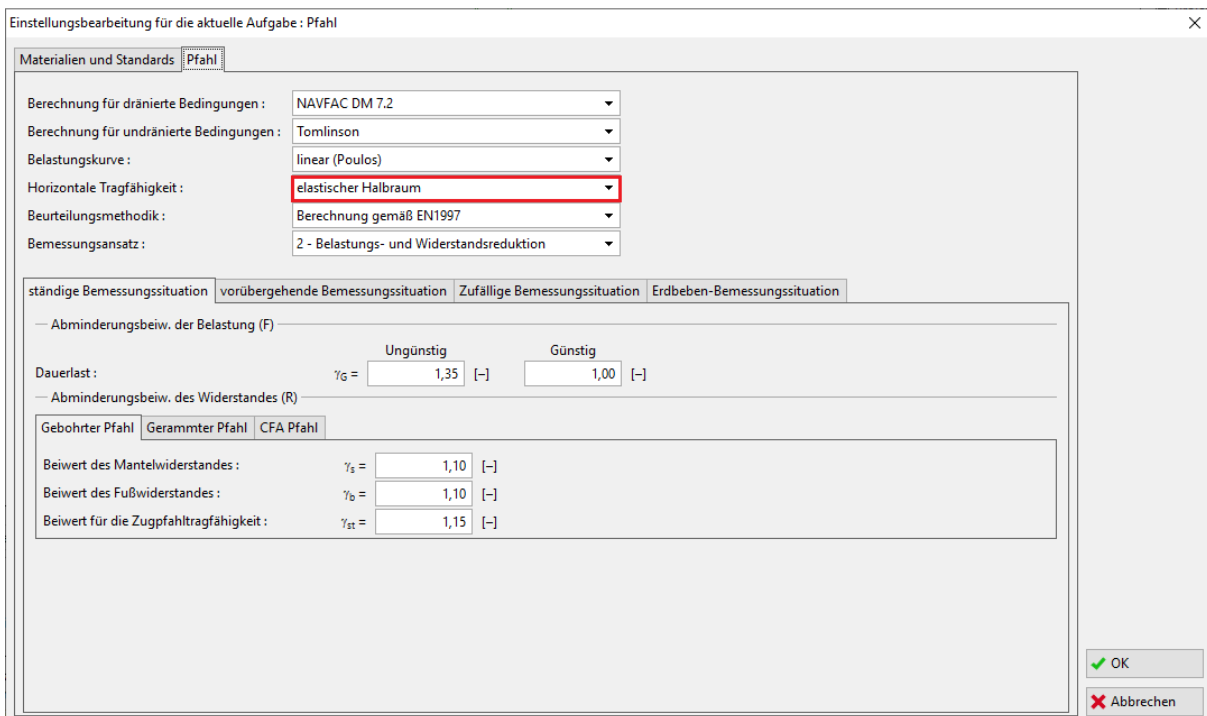
Das Programm enthält verschiedene Optionen zur Bestimmung des Bettungsmoduls. Methoden mit linearem Verlauf (Linear, Matlock und Reese) eignen sich für kohäsionslose Böden, Methoden mit konstantem Verlauf (Konstant, Vesic) eher für kohäsive Böden. Die Berechnungsmethode des Moduls k_h nach 73SN 73 1004 wird dann beide Methoden kombinieren.

Im ersten Teil dieses Kapitels werden wir eine Berechnung mit einem konstanten Bettungsmodul durchführen, im zweiten Teil werden wir die Unterschiede bei Verwendung anderer Methoden vergleichen.

Eingabevorgang:

Öffnen Sie im Programm "Pfahl" die Datei aus dem Handbuch Nr. 13. Klicken Sie zunächst im Fenster "Einstellung" auf die Schaltfläche "Bearbeiten" und überprüfen Sie, ob die Methode zur Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit als "elastischer Halbraum" eingestellt ist.

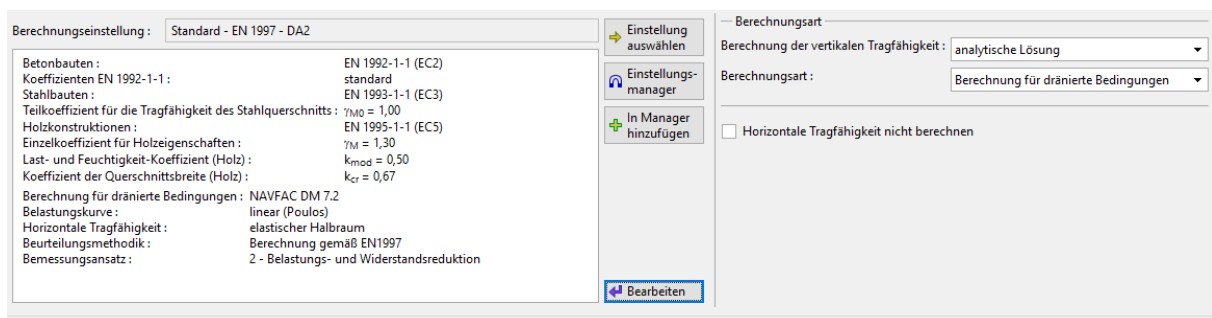
Hinweis: Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der horizontalen Pfahltragfähigkeit ist die sogenannte [Broms-Methode](#), die für die Lösung der Pfähle in einer homogenen Umgebung geeignet ist (siehe Hilfe zum Programm - F1).



Dialogbox „Einstellungsbearbeitung für die aktuelle Aufgabe“

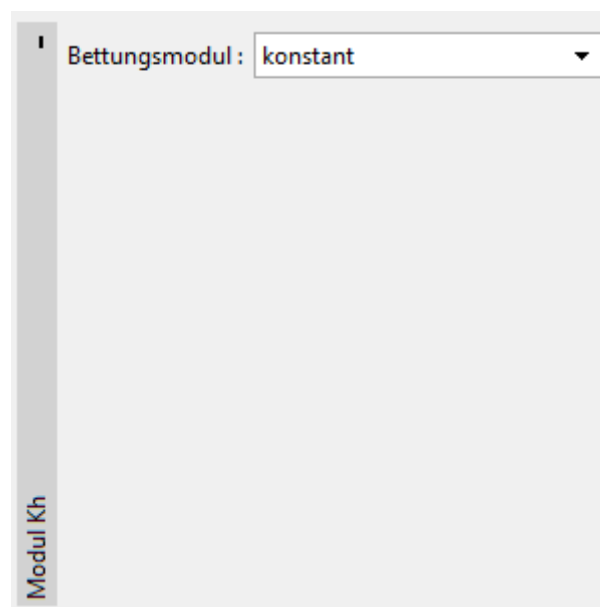
Andere Berechnungseinstellungen wie die Werte der eingegebenen Belastungen und das geologische Profil, einschließlich der grundlegenden Festigkeitsparameter der Böden, bleiben unverändert.

Im Fenster "Einstellung" deaktivieren wir auch die Option "Horizontale Tragfähigkeit nicht berechnen".



Fenster „Einstellung“

Dann gehen wir zum Fenster "Modul Kh", wo wir die Methode "Konstant" auswählen.



Fenster „Modul k_h “

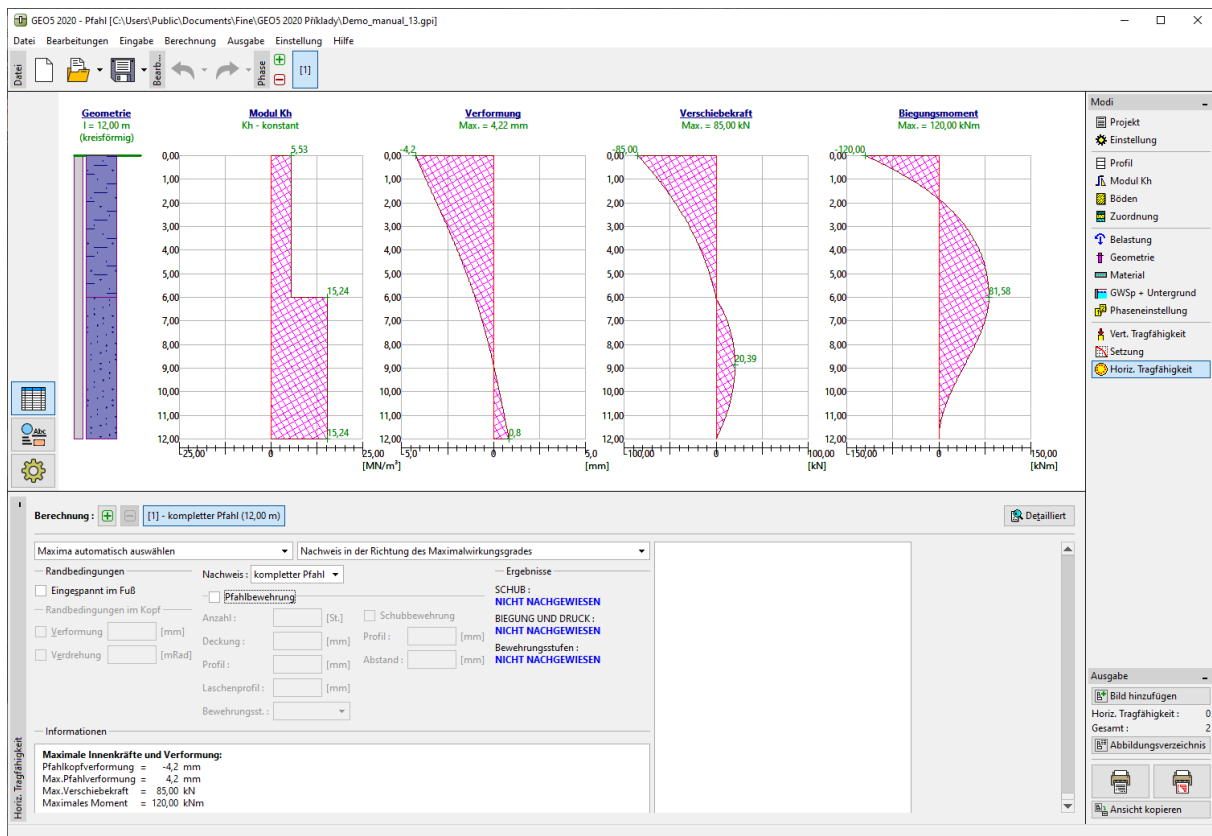
Hinweis: Der konstante Verlauf des horizontalen Bettungsmoduls hängt vom Verformungsmodul des Bodens E_{def} [MPa] und der reduzierten Breite des Pfahls r [m] ab (weitere Informationen in der Programmhilfe - F1).

Dann geben wir im Fenster "Böden" den Wert des Verteilungswinkels $\beta [-]$ im Bereich $\frac{\varphi_{ef}}{4} - \varphi_{ef}$ ein. Dieser Beiwert wird daher in Abhängigkeit von der Größe des Winkels der inneren Reibung des Bodens bestimmt (weitere Informationen in der Programmhilfe - F1).

Boden (Spezifikation, Zuordnung)	Wichte $\gamma [kN/m^3]$	Winkel der inneren Reibung $\varphi_{ef} [^\circ]$	Verteilungswinkel $\beta [^\circ]$	Bodentyp
F4, feste Konsistenz	18,5	24,5	10,0	kohäsiv
S3, mittel abgelegt	17,5	29,5	15,0	kohäsionslose

Tabelle mit der Bodenparametern – Horizontale Tragfähigkeit des Einzelpfahls

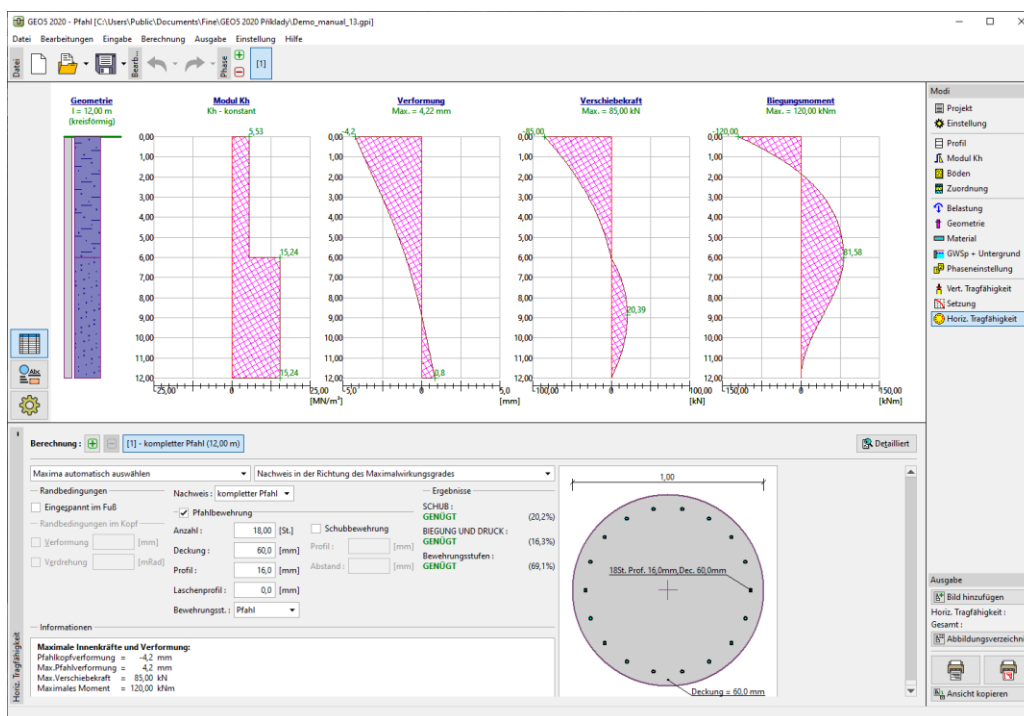
Wir wechseln nun zum Fenster "Horizontale Tragfähigkeit", wo wir den Wert der maximalen horizontalen Verformung am Pfahlkopf, die Verläufe der inneren Kräfte entlang der Pfahllänge und die Ergebnisse der Pfahldimensionierung bestimmen, um die Bewehrung in Richtung der maximalen Wirkung zu bewerten.



Fenster „Horizontale Tragfähigkeit“ – Nachweis für konstanten Verlauf des Moduls k_h

Hinweis: Die Randbedingung für die Einspannung im Fuß wird hauptsächlich bei Stützpfehlern am Fels oder am halbfelsigen Untergrund modelliert (in diesem Fall ist es nicht so). Randbedingungen im Pfahlkopf werden bei Verwendung der sogenannten Verformungslast betrachtet, wenn im Programm nur die Drehung und Verformung am Pfahlkopf eingegeben werden, nicht die Kraftbelastung (mehr siehe Programmhilfe - F1).

In diesem Fenster werden wir auch die Pfahlbewehrung dimensionieren. Wir werden eine tragende Längsbewehrung entwerfen - **18 Stück Ø 16 mm** und eine minimale Deckung von **60 mm** entsprechend dem Grad des Einflusses der XC1-Umgebung.



Fenster „Horizontale Tragfähigkeit“ - Dimensionierung

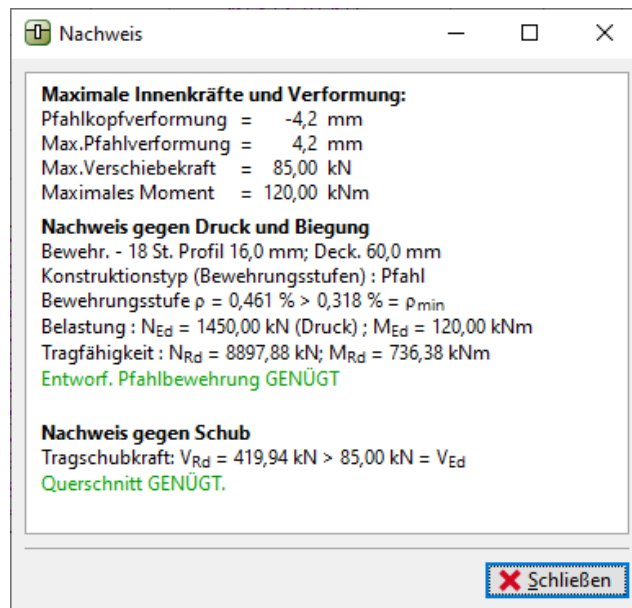
Der Bewehrungsgrad eines quer belasteten Einzelpfahls im gelösten Fall wird gemäß CSN EN 1536: Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten - Bohrpfähle (Tabelle 4 - Mindestbewehrung von Pfählen) betrachtet. Dies wird durch Auswahl der Option "Pfahl" in das Programm eingegeben.

Querschnittsfläche des Pfahlschafts: $A_c [m^2]$	Fläche der Längsbewehrung: $A_s [m^2]$
$A_c \leq 0,5 m^2$	$A_s \geq 0,5 \% \cdot A_c$
$0,5 m^2 < A_c \leq 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,0025 m^2$
$A_c > 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,25 \% \cdot A_c$

„CSN EN 1536: Tabelle 4 – Mindestbewehrung von Pfählen“

Hinweis: Für die Druckpfähle ist es geeignet, den Bewehrungsgrad als "Säule" und für Zugpfähle als "Balken" zu verwenden. Für die Kombination von vertikalen und Querlasten schreibt CSN EN 1536 den Mindestbewehrungsgrad von Bohrpfählen entsprechend dem Verhältnis von Betonfläche und Bewehrungsfläche vor (weitere Informationen in der Programmhilfe - F1).

In den Ergebnissen der Pfahldimensionierung kontrollieren wir die Verwendung des Pfahlquerschnitts auf Biegung und die Bedingung für den Mindestbewehrungsgrad (mithilfe der Schaltfläche "Detailliert").



Dialogbox – „Nachweis (detailliert)“

Berechnungsergebnisse

Im Rahmen der Überprüfung eines quer belasteten Einzelpfahls interessieren uns die Verläufe der inneren Kräfte entlang der Pfahllänge, die maximale Verformung und die Verwendung des Pfahlquerschnitts. Für einen **konstanten Verlauf** des horizontalen Bettungsmoduls k_h gehen die resultierenden Werte wie folgt auf:

– Maximale Pfahlverformung:	$u_{\max} = 4,2 \text{ mm} .$	
– Maximale Schubkraft:	$Q_{\max} = 85,0 \text{ kN} .$	
– Maximaler Biegemoment:	$M_{\max} = 120,0 \text{ kNm} .$	
– Tragfähigkeit der Stahlbetonpfahl (Druck + Bieg.)	16,3 %	GENÜGT
– Tragfähigkeit der Stahlbetonpfahl (Schub):	20,2 %	GENÜGT
– Bewehrungsstufe des Pfahls:	69,1 %	GENÜGT

Vergleich der Ergebnisse verschiedener Methoden zur Bestimmung des Bettungsmoduls

Die Werte und der Verlauf des horizontalen Bettungsmoduls k_h unterscheiden sich aufgrund verschiedener Berechnungsmethoden und Eingabeparameter der Böden, die ihn beeinflussen:

- **KONSTANT:** Verteilungswinkel β [–],
- **LINEAR (Bowles):** Verteilungswinkel β [–],
Koeffizient k $[MN/m^3]$ nach Bodentyp,
- **gemäß CSN 73 1004:** kohäsiver, bzw. kohäsionsloser Boden,
horizontaler Kompressionsmodul n_h $[MN/m^3]$,
- **gemäß VESIC:** Elastizitätsmodul E $[MPa]$.

Wenn wir die Methode der Berechnung des horizontalen Bettungsmoduls ändern, müssen wir dem Programm andere Bodenparameter hinzufügen (weitere Informationen in der Programmhilfe - F1). In einzelnen Berechnungen geben wir die Eingabewerte wie folgt in das Programm ein:

Bettungsmodul $k_h \left[MN/m^3 \right]$	Verteilungswinkel $\beta \left[- \right]$	Koeffizient $k \left[MN/m^3 \right]$	Elastizitätsmodul $E \left[MPa \right]$	Horizontaler Kompressionsmodul $n_h \left[MN/m^3 \right]$
KONSTANT	10 – F4	---	---	---
	15 – S3			
LINEAR (Bowles)	10 – F4	60 – F4	---	---
	15 – S3	150 – S3		
gemäß CSN 73 1004	Kohäsiver Boden – Klasse F4			---
	Kohäsionsloser Boden – Klasse S3			4,5 – S3
gemäß VESIC	---	---	5,0 – F4	---
			15,5 – S3	

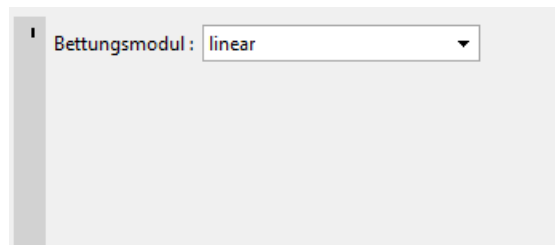
Übersichtstabelle mit Bodenparametern für die horizontale Tragfähigkeit des Einzelpfahls

Nun kehren wir zur Eingabe der Eingangsdaten zurück, ändern immer die entsprechende Berechnungsmethode des horizontalen Bettungsmoduls im Fenster "Modul Kh" und ergänzen wir dann die verbleibenden Bodenparameter. Wir werden das Verfahren für die folgenden Methoden durchführen:

- durch den linearen Verlauf (*gemäß Bowles*),
- *gemäß* CSN 73 1004,
- *gemäß* Vesic.

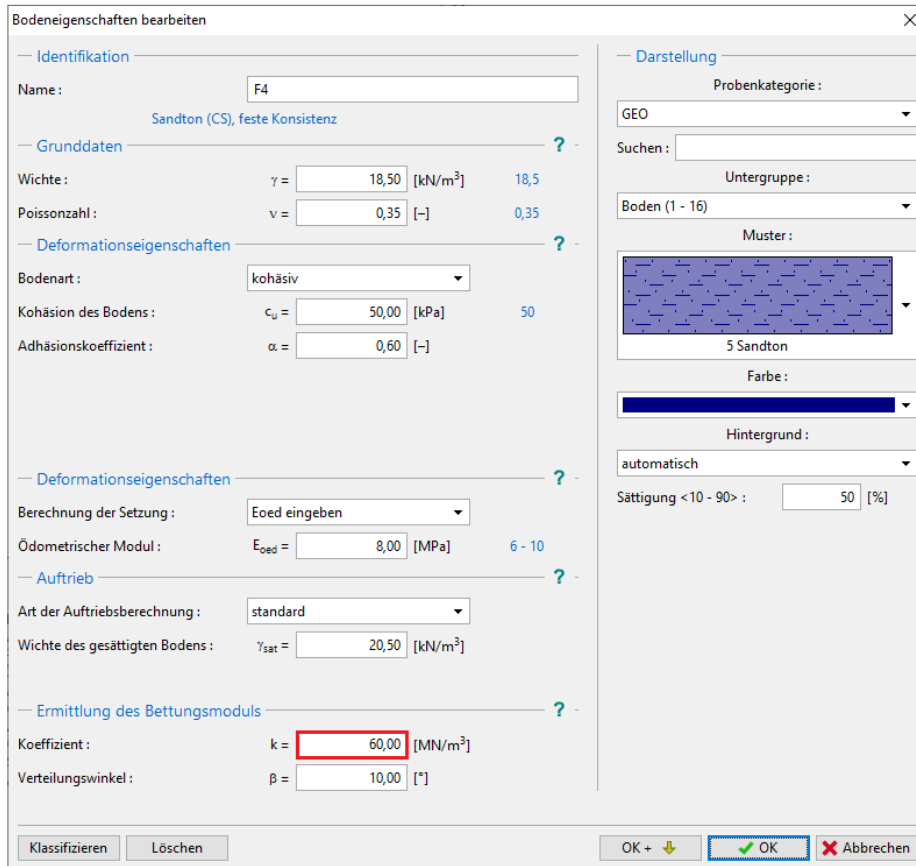
Linearen Verlauf (*gemäß* Bowles)

Zuerst kehren wir zum Fenster "Modul Kh" zurück, wo wir die Einstellung auf "linear" ändern.



Fenster „Modul Kh“

Dann wählen wir im Fenster "Böden" den Boden "Klasse F4 - feste Konsistenz". Klicken Sie auf die Schaltfläche "Bearbeiten" und ändern Sie den Koeffizienten k auf 60 MN/m^3 .



Bodeneigenschaften bearbeiten

— Identifikation —

Name: F4

Sandton (CS), feste Konsistenz

— Grunddaten —

Wichte: $\gamma = 18,50 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ 18,5

Poissonzahl: $\nu = 0,35 \text{ [-]}$ 0,35

— Deformationseigenschaften —

Bodenart: kohäsiv

Kohäsion des Bodens: $c_u = 50,00 \text{ [kPa]}$ 50

Adhäsionskoeffizient: $\alpha = 0,60 \text{ [-]}$

— Deformationseigenschaften —

Berechnung der Setzung: Eoed eingeben

Ödometrischer Modul: $E_{oed} = 8,00 \text{ [MPa]}$ 6 - 10

— Auftrieb —

Art der Auftriebsberechnung: standard

Wichte des gesättigten Bodens: $\gamma_{sat} = 20,50 \text{ [kN/m}^3\text{]}$

— Ermittlung des Bettungsmoduls —

Koeffizient: $k = 60,00 \text{ [MN/m}^3\text{]}$

Verteilungswinkel: $\beta = 10,00 \text{ [°]}$

— Darstellung —

Probenkategorie: GEO

Suchen:

Untergruppe: Boden (1 - 16)

Muster: 5 Sandton

Farbe:

Hintergrund: automatisch

Sättigung <10 - 90>: 50 [%]

Klassifizieren Löschen OK + OK Abbrechen

Fenster „Böden“ – Bodeneigenschaften bearbeiten (F4)

Wir werden dasselbe für Böden der Klasse S3 tun. In diesem Fall setzen wir den Koeffizienten k auf 150 MN/m^3 .

Bodeneigenschaften bearbeiten

Identifikation

Name: S3

Sand mit Beimischung des feinkörnigen Bodens (S-F), mitteldicht

Grunddaten

Wichte: $\gamma = 17,50 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ 17,5

Poissonzahl: $\nu = 0,30 \text{ [-]}$ 0,30

Deformationseigenschaften

Bodenart: kohäsionslos

Winkel der inneren Reibung: $\phi_{ef} = 29,50 \text{ [°]}$ 28 - 31

Reibungswinkel am Pfahlmantel: berechnen

Koeffizient des Bodenseitendruckes: berechnen

Deformationseigenschaften

Berechnung der Setzung: Eoed eingeben

Ödometrischer Modul: $E_{oed} = 21,00 \text{ [MPa]}$ 16 - 26

Auftrieb

Art der Auftriebsberechnung: standard

Wichte des gesättigten Bodens: $\gamma_{sat} = 19,50 \text{ [kN/m}^3\text{]}$

Ermittlung des Bettungsmoduls

Koeffizient: $k = 150,00 \text{ [MN/m}^3\text{]}$

Verteilungswinkel: $\beta = 15,00 \text{ [°]}$

Darstellung

Probenkategorie: GEO

Suchen:

Untergruppe: Boden (1 - 16)

Muster: 9 Sand

Farbe:

Hintergrund: automatisch

Sättigung <10 - 90>: 50 [%]

Klassifizieren

Löschen

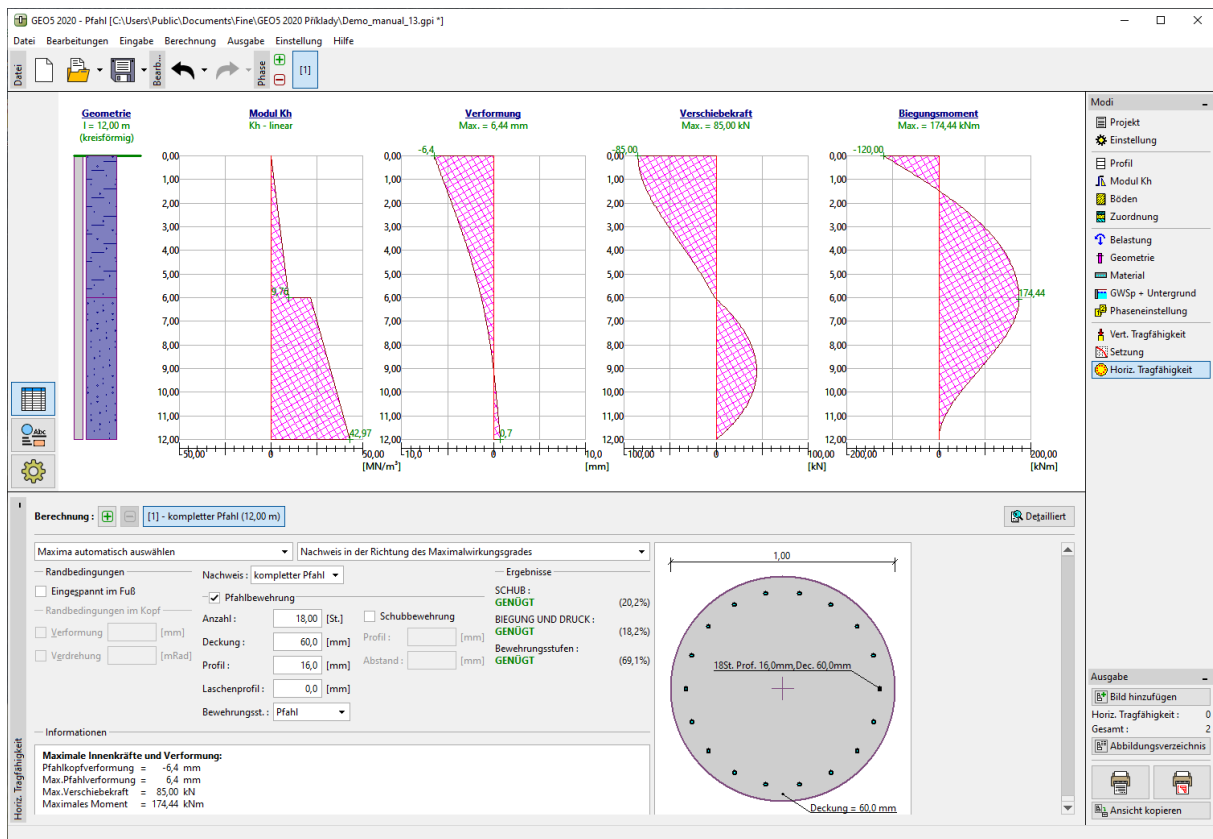
OK + ↕

OK

Abbrechen

Fenster „Böden“ – Bodeneigenschaften bearbeiten (S3)

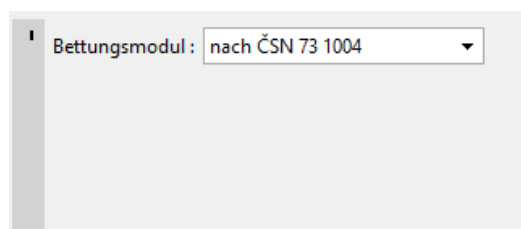
Nun gehen wir zum Fenster "Horizontale Tragfähigkeit" über, wo wir die Ergebnisse der Berechnung sehen können.



Fenster „Horizontale Tragfähigkeit“ – linearer Verlauf des horizontalen Bettungsmoduls k_h , Verformung und innere Kräfte entlang der Pfahllänge

Gemäß CSN 73 1004

Wir werden wieder zum Fenster "Modul Kh" wechseln, wo wir diesmal die Option "nach CSN 73 1004" wählen.



Fenster „Modul Kh“

Es ist nun notwendig, das horizontale Kompressibilitätsmodul für kohäsionslose Boden S3 im Fenster "Böden" einzustellen. Wir werden den Wert des Moduls auf 4,50 MN/m³ einstellen.

Bodeneigenschaften bearbeiten

Identifikation

Name :

Sand mit Beimischung des feinkörnigen Bodens (S-F), mitteldicht

Grunddaten

Wichte : $\gamma =$ [kN/m³] 17,5

Poissonzahl : $\nu =$ [-] 0,30

Deformationseigenschaften

Bodenart :

Winkel der inneren Reibung : $\phi_{ef} =$ [°] 28 - 31

Reibungswinkel am Pfahlmantel :

Koeffizient des Bodenseitendruckes :

Deformationseigenschaften

Berechnung der Setzung :

Ödometrischer Modul : $E_{oed} =$ [MPa] 16 - 26

Auftrieb

Art der Auftriebsberechnung :

Wichte des gesättigten Bodens : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

Ermittlung des Bettungsmoduls

Bodenart :

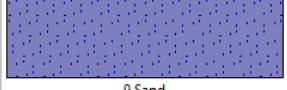
Horizontaler Steifemodul : $n_h =$ [MN/m³]

Darstellung

Probenkategorie :

Suchen :

Untergruppe :

Muster : 

9 Sand

Farbe :

Hintergrund :

Sättigung <10 - 90> : [%]

Klassifizieren

Löschen

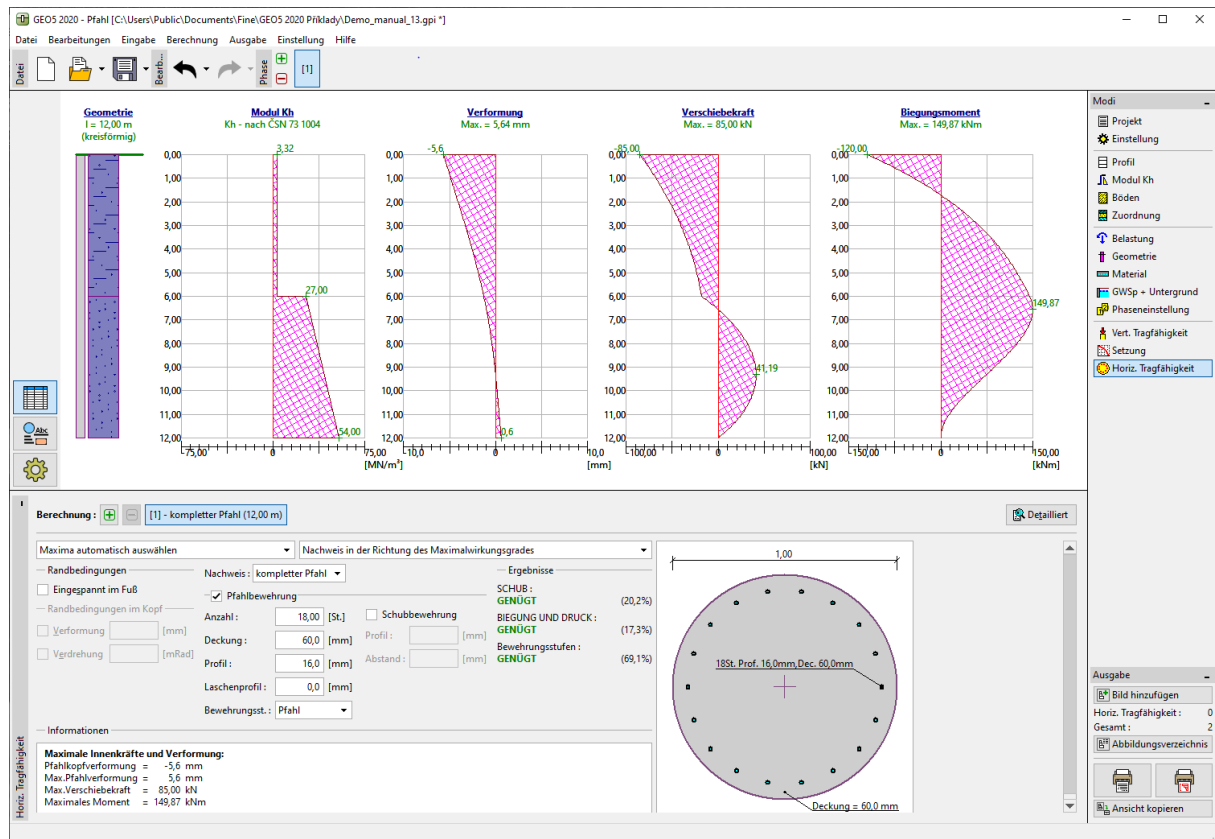
OK +

OK

Abbrechen

Fenster „Böden“ – Bodeneigenschaften bearbeiten (S3)

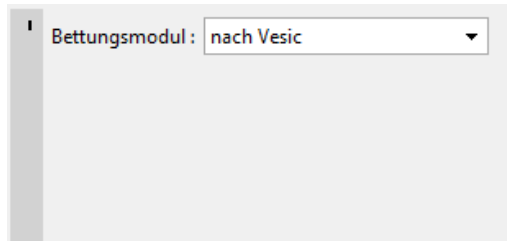
Die Berechnungsergebnisse können jetzt im Fenster "Horizontale Tragfähigkeit" angezeigt werden.



Fenster „Horizontale Tragfähigkeit“ - Verlauf des horizontalen Bettungsmoduls nach CSN 73 1004, Verformung und inneren Kräfte entlang der Pfahlänge

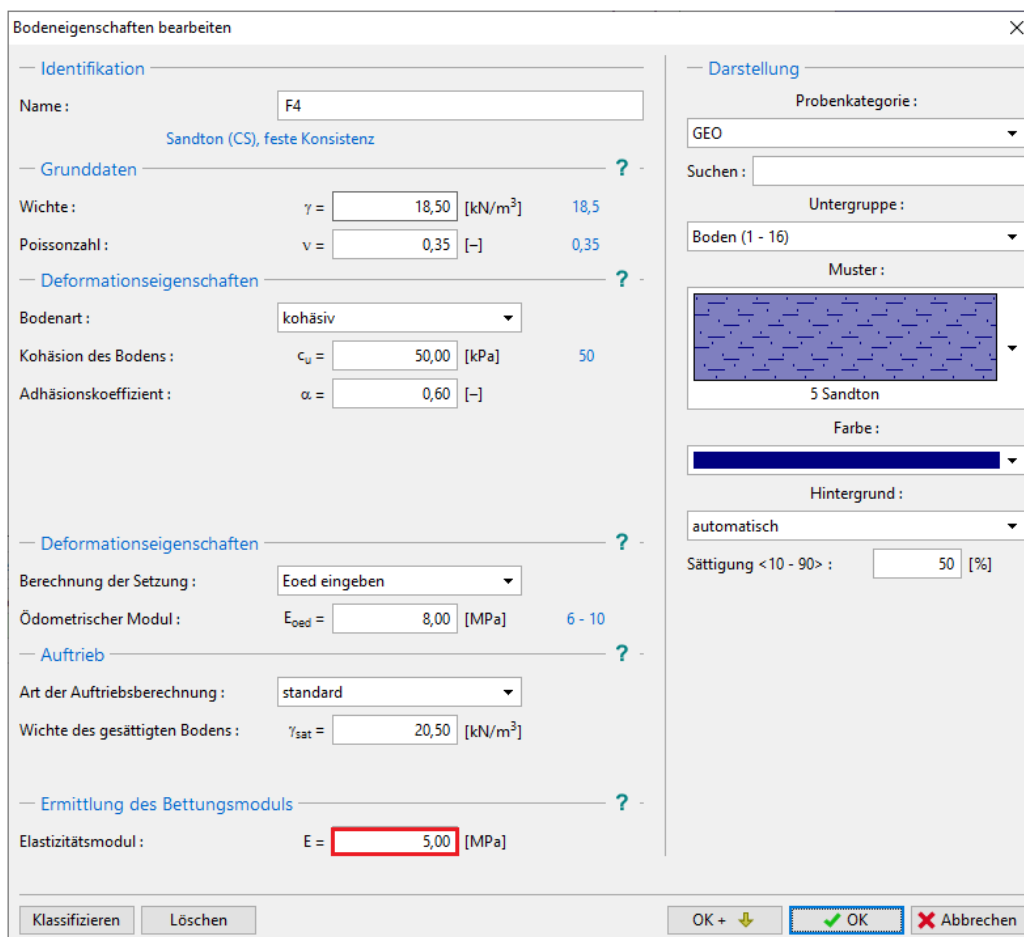
Gemäß Vesic

Wir werden das Fenster "Modul Kh" wieder öffnen, wo wir diesmal die Berechnungsmethode "nach Vesic" wählen.



Fenster „Modul Kh“

Im Fenster "Böden" muss nun für beide Böden der Elastizitätsmodul E eingestellt werden. Für Boden F4 werden wir den Wert des Moduls auf 5 MPa einstellen.



Fenster „Böden“ – Bodeneigenschaften bearbeiten

Wir werden den Wert des Moduls auch für Boden S3 einstellen. In diesem Fall werden wir den Wert auf 15,50 MPa einstellen.

Bodeneigenschaften bearbeiten

Identifikation

Name: S3
Sand mit Beimischung des feinkörnigen Bodens (S-F), mitteldicht

Grunddaten

Wichte: $\gamma = 17,50$ [kN/m³] 17,5
Poissonzahl: $\nu = 0,30$ [-] 0,30

Deformationseigenschaften

Bodenart: kohäsionslos
Winkel der inneren Reibung: $\varphi_{ef} = 29,50$ [°] 28 - 31
Reibungswinkel am Pfahlmantel: berechnen
Koeffizient des Bodenseitendruckes: berechnen

Deformationseigenschaften

Berechnung der Setzung: Eoed eingeben
Ödometrischer Modul: $E_{oed} = 21,00$ [MPa] 16 - 26

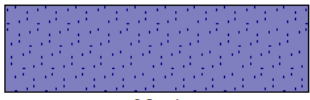
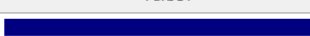
Auftrieb

Art der Auftriebsberechnung: standard
Wichte des gesättigten Bodens: $\gamma_{sat} = 19,50$ [kN/m³]

Ermittlung des Bettungsmoduls


Elastizitätsmodul: $E = 15,50$ [MPa]


Darstellung


Probenkategorie: GEO
Suchen:
Untergruppe: Boden (1 - 16)
Muster:  9 Sand
Farbe: 
Hintergrund: automatisch
Sättigung <10 - 90>: 50 [%]

Klassifizieren

Löschen

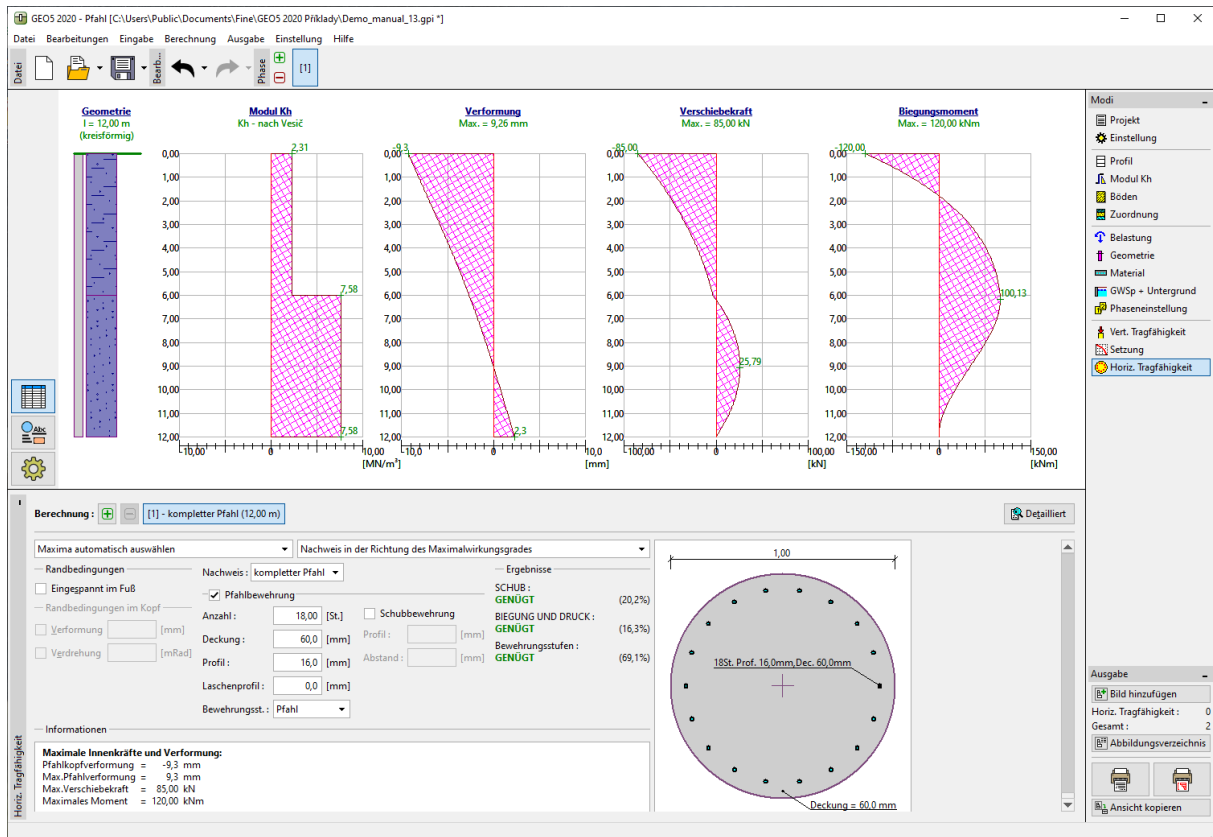
OK + 

OK 

Abbrechen 

Fenster „Böden“ – Bearbeitung der Bodeneinstellung (S3)

Die Ergebnisse der Berechnung können jetzt im Fenster "Horizontale Tragfähigkeit" angezeigt werden.



Fenster „Horizontale Tragfähigkeit“ - Der Verlauf des horizontalen Bettungsmoduls k_h nach Vesic, Verformung und innerer Kräfte entlang der Pfahllänge

Ergebnisse der Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit eines Einzelpfahls

Die Ergebnisse der Berechnung der horizontalen Tragfähigkeit eines Einzelpfahls in Abhängigkeit von der Berechnungsmethode des horizontalen Bettungsmoduls k_h sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Bettungsmodul $k_h \text{ [MN/m}^3\text{]}$	Maximale Pfahlverformung $u_{\max} \text{ [mm]}$	Maximaler Biegemoment $M_{\max} \text{ [kNm]}$	Verwendung von Stahlbetonpfahl für die Tragfähigkeit (Druck + Biegung) [%]
KONSTANT	4,2	120,0	16,3
LINEAR (Bowles)	6,4	174,44	18,2
Gemäß CSN 73 1004	5,6	149,87	17,3
Gemäß VESIC	9,3	120,0	16,3

Zusammenfassung der Ergebnisse - Horizontale Tragfähigkeit und Dimensionierung eines Einzelpfahls

Schlussfolgerung

Aus den Berechnungsergebnissen können wir erkennen, dass die beobachteten Werte der Schnittgrößen entlang der Pfahllänge und der maximalen Verformungen am Pfahlkopf leicht unterschiedlich sind, aber der Einfluss der gewählten Methode der Berechnung des Bettungsmoduls ist nicht entscheidend.