

### Beispiel 6.3 Berechnung eines Bauwerks auf nichtlinearem Baugrund

#### 1 Aufgabenstellung

Nachfolgend wird das neue Iterationsverfahren benutzt, um das Verhalten des Fundaments auf nichtlinearem Baugrund mit Einfluss der Bauwerkssteifigkeit zu untersuchen. Das vorhergehende Beispiel 6.2 mit den Bildern 6.11 und 6.12 wird hier mit einigen Änderungen gewählt, um die Berechnung eines Bauwerks auf nichtlinearem Baugrund zu zeigen.

Bei der Decke wird eine Plattendicke von 22 [cm] mit Skew-Panelled Stäben gewählt. Diese ist gleichförmig belastet mit 11.8 [kN/m<sup>2</sup>]. Als Fundament dient eine Gründungsplatte mit Löchern. Die Größen der Stäbe, Stützen und des Fundaments bleiben wie im Beispiel 6.2.

#### 2 Bodenkennwerte

Bei diesen Berechnungen werden zwei Baugrundmodelle untersucht:

- Bettungsmodulverfahren
- Steifemodulverfahren

Die Fundamentgründung liegt auf einem gleichmäßigen Untergrund mit 10 [m] Mächtigkeit. Der Bodentyp wird repräsentiert durch den Steifemodul  $E_s$  für das Steifemodulverfahren. Dies führt zu dem Bettungsmodul  $k_s$  für das Bettungsmodulverfahren. Tabelle 6.7 zeigt zwei unterschiedliche Bodentypen, die in dieser Untersuchung mit den Bodeneigenschaften  $E_s$  und  $k_s$  behandelt werden. Die zwei Modelltypen für den Boden werden gewählt, um das Verhalten von weichem und steifem Boden zu zeigen. Als *Poissonzahl* wird  $\nu_s = 0.3$  [-] für beide Modelltypen gesetzt.

Tabelle 6.7 Bodeneigenschaften für zwei unterschiedliche Bodentypen

Bodentyp	$k_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{ult}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Weicher Boden	4 000	18 000	200
Steifer Boden	40 000	180 000	400

### 3 Berechnung

Um die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der linearen und nichtlinearen Baugrundanalyse mit und ohne Interaktion des Überbaus für die zwei Baugrundmodelle zu zeigen, wird das Fundament für die beiden Bodentypen vier mal wie folgt berechnet:

- 1) Platte auf linearem Baugrund ohne Einfluss der Bauwerkssteifigkeit
- 2) Platte auf nichtlinearem Baugrund ohne Einfluss der Bauwerkssteifigkeit
- 3) Platte auf linearem Baugrund mit Einfluss der Bauwerkssteifigkeit
- 4) Platte auf nichtlinearem Baugrund mit Einfluss der Bauwerkssteifigkeit

Das Fundament wird in 504 quadratische Elemente mit jeweils 1.25 [m] × 1.25 [m] Fläche unterteilt. Die typische Decke eines Stockwerks wird in 100 quadratische Elemente mit jeweils 1.00 [m] × 1.00 [m] Fläche unterteilt, um die Plattendicke zu repräsentieren. Die Plattenelemente werden mit 140 Stabelementen verbunden, um die Skew-Pannelled Stäbe darzustellen. Bei der Berechnung des Fundaments ohne Interaktion des Überbaus erhält man die Fundamentaflasten aus den Deckenreaktionen infolge Lasten auf die Decke mit starren Lagern (Tabelle 6.8).

Tabelle 6.8 Lasten auf das Fundament ohne Interaktion des Überbaus

Punkt	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Last [kN]	480	1085	975	3000	2630	2270

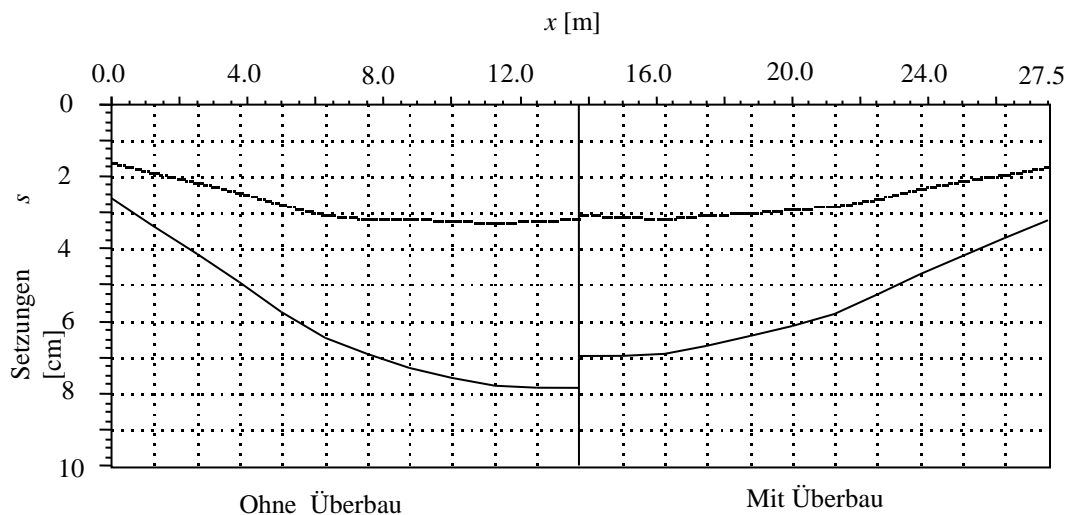
Mit dem Steifemodulverfahren erhält man die Anfangsbettung  $k_{ti}$  durch die lineare Berechnung des Fundaments (Gl. 6.24). Beim Bettungsmodulverfahren ist die Anfangsbettung  $k_t$  gleich dem Bettungsmodul  $k_s$ .

Bei dem gewählten System ist der Baugrund horizontal geschichtet. Ferner sind sowohl der Grundriss als auch die Lasten symmetrisch angeordnet. Diese zweiachsige Symmetrie in Form und Lastgeometrie bezüglich der  $x$ - und  $y$ -Achse wird genutzt, indem nur ein Viertel des Bauwerks berechnet wird.

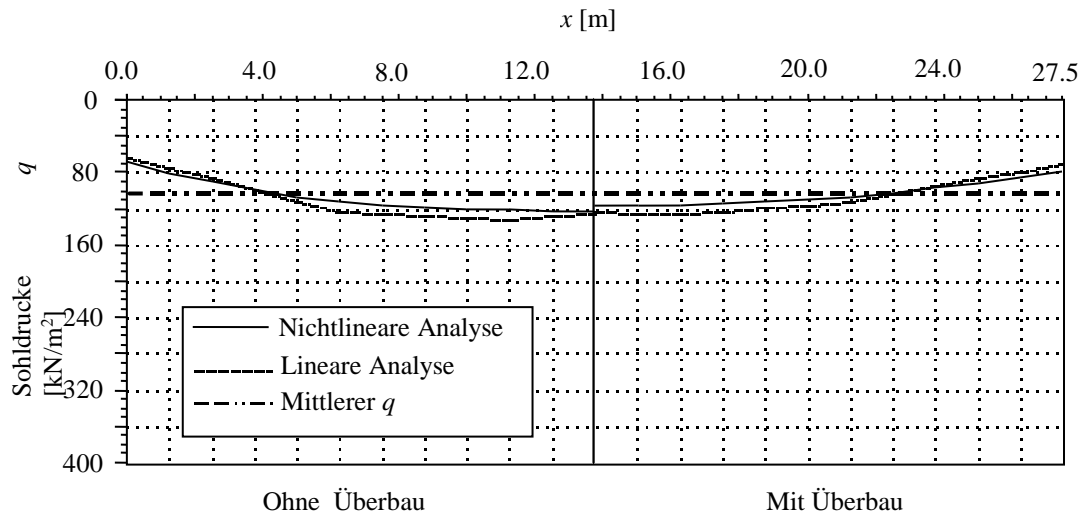
#### 4 Ergebnisse und Diskussion

Die Bilder 6.14 bis 6.25 zeigen die Verteilung der Setzungen, Sohldrücke und Momente im Schnitt I von Bild 6.12 für 16 Berechnungsfälle. Allgemein kann man aus diesen Bildern für die beiden untersuchten Modelle und Bodentypen Folgendes erkennen:

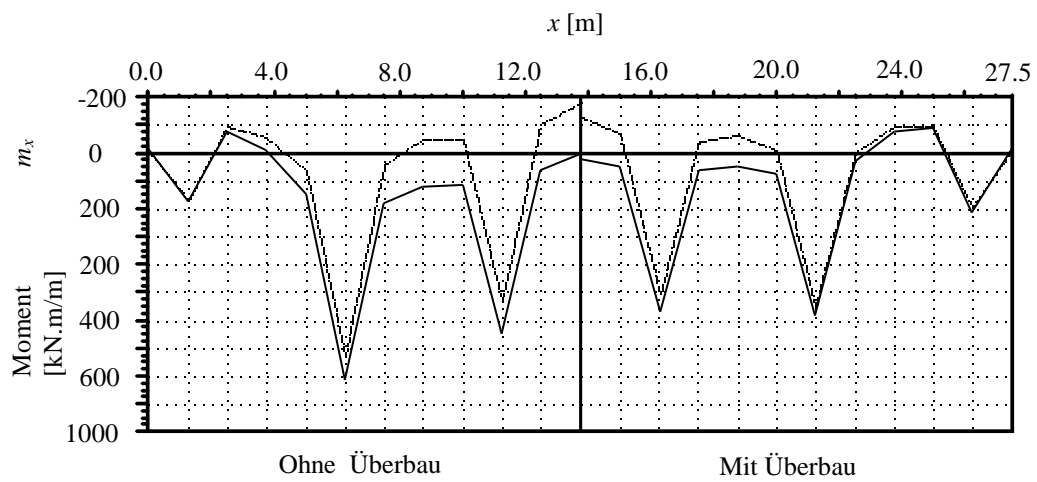
- Die Setzungen sind bei nichtlinearen Berechnungen mit oder ohne Interaktion des Überbaus unter allen Knoten des Fundaments größer als bei linearen Analysen
- Bei der nichtlinearen Berechnung wird der Sohldruck durch Senkung seines Wertes unter den Stützen und Steigerung des Wertes im Feld zwischen den Stützen verändert. Dies führt zur Annäherung des Sohldrucks an die mittlere Sohlpressung unter dem Fundament, insbesondere bei weichem Boden
- Durch die Umverteilung des Sohldrucks unter dem Fundament ist bei der nichtlinearen Analyse das Stützenmoment größer geworden, während das Feldmoment kleiner wurde
- Die maximalen Setzungen, Sohldrücke und Momente aus der Berechnung mit Interaktion des Überbaus sind kleiner als aus der Berechnung ohne Interaktion



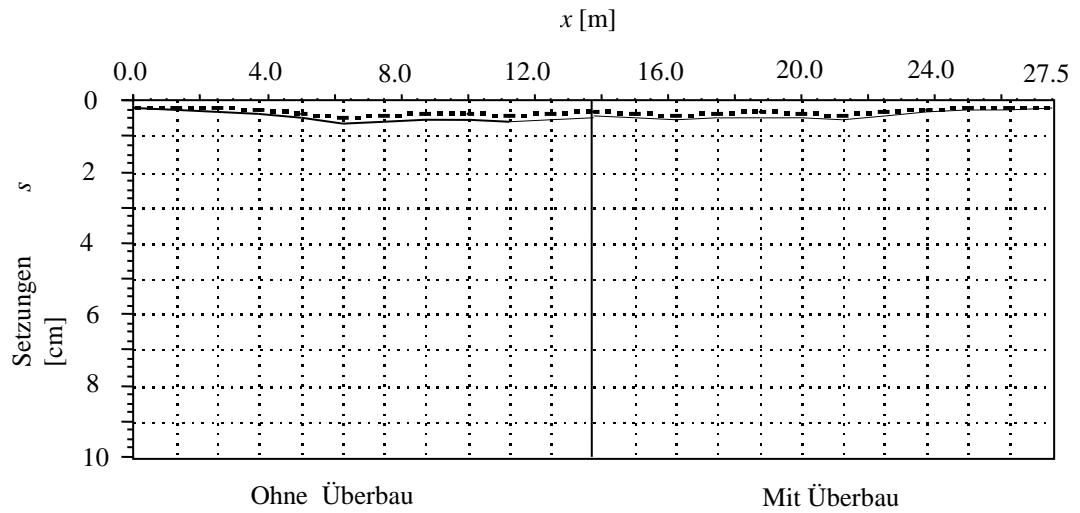
**Bild 6.14** Setzungen  $s$  [cm] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - weicher Boden)



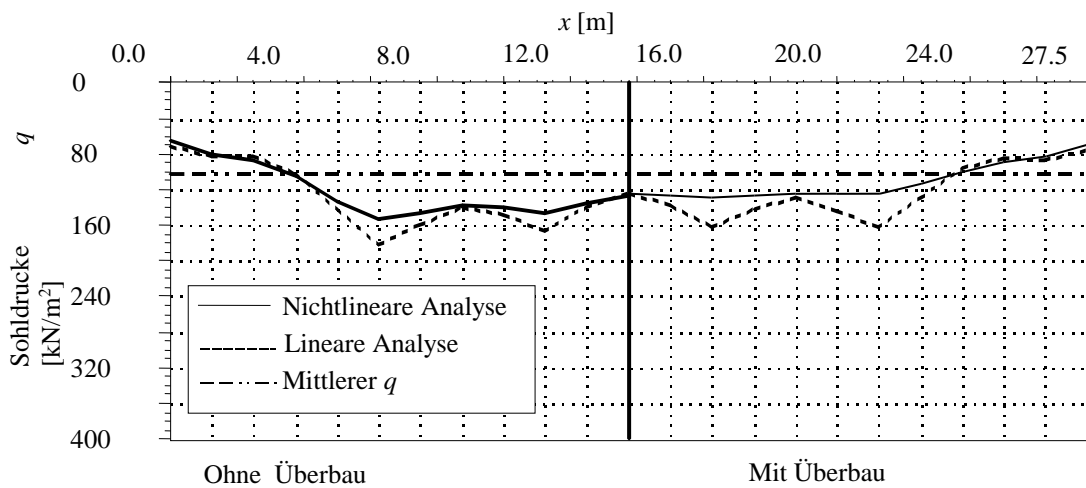
**Bild 6.15** Sohldruck  $q$  [ $\text{kN/m}^2$ ] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - weicher Boden)



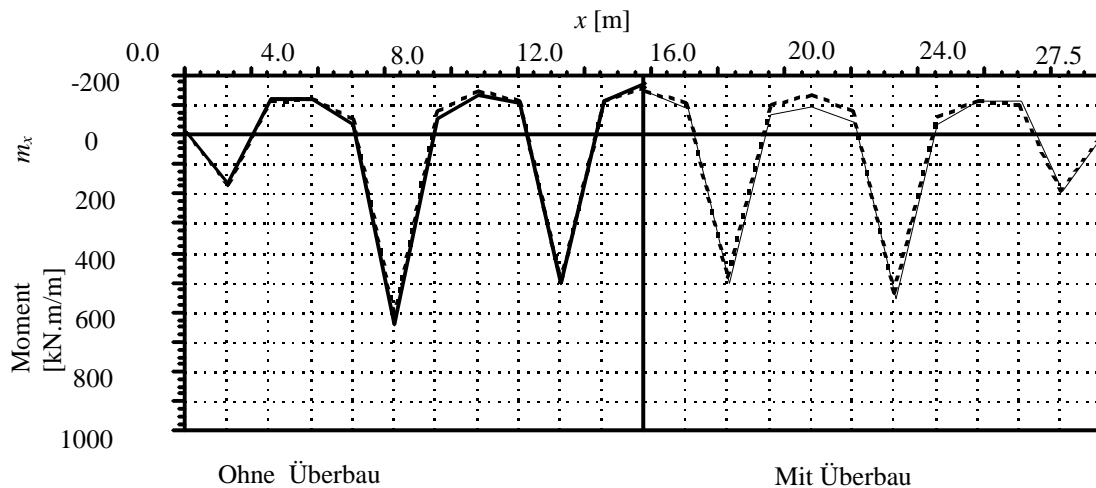
**Bild 6.16** Moment  $m_x$  [ $\text{kN.m/m}$ ] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - weicher Boden)



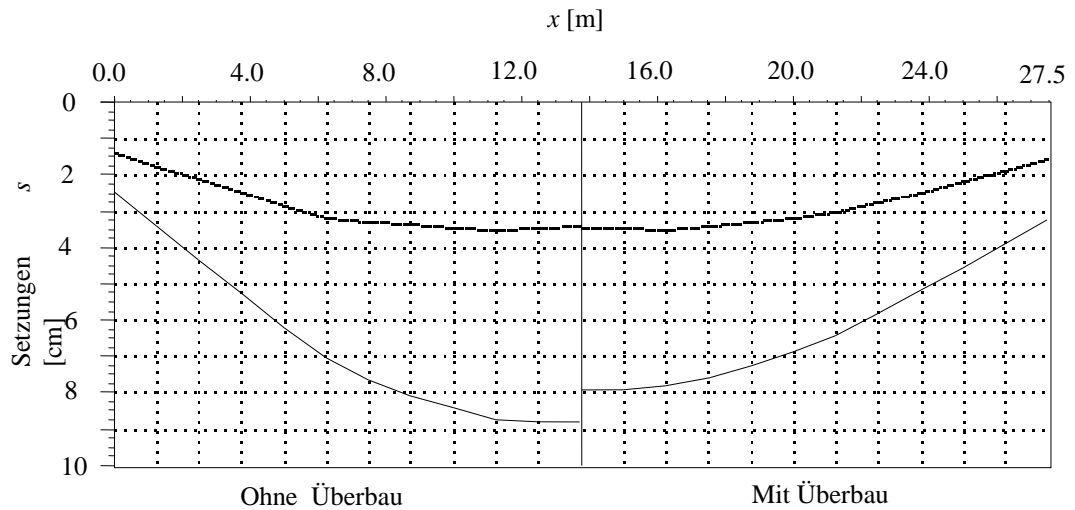
**Bild 6.17** Setzung  $s$  [cm] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - steifer Boden)



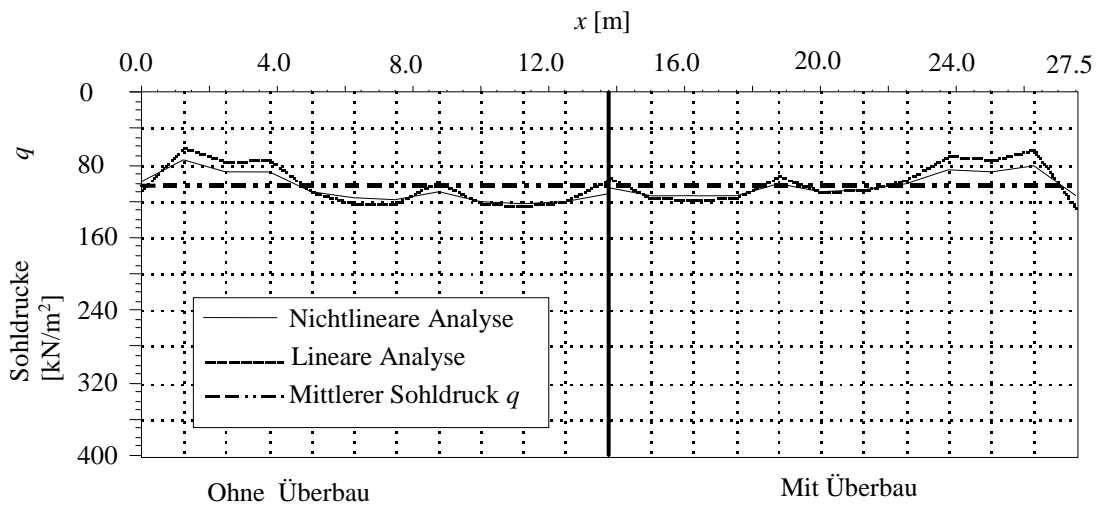
**Bild 6.18** Sohldruck  $q$  [ $\text{kN/m}^2$ ] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - steifer Boden)



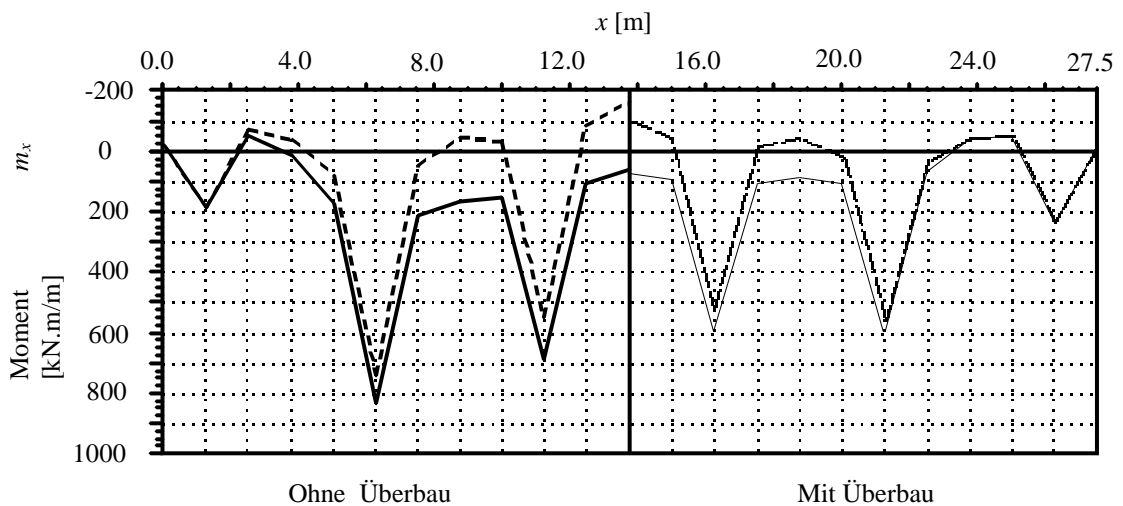
**Bild 6.19** Moment  $m_x$  [ $\text{kN.m/m}$ ] im Schnitt I (Bettungsmodulverfahren - steifer Boden)



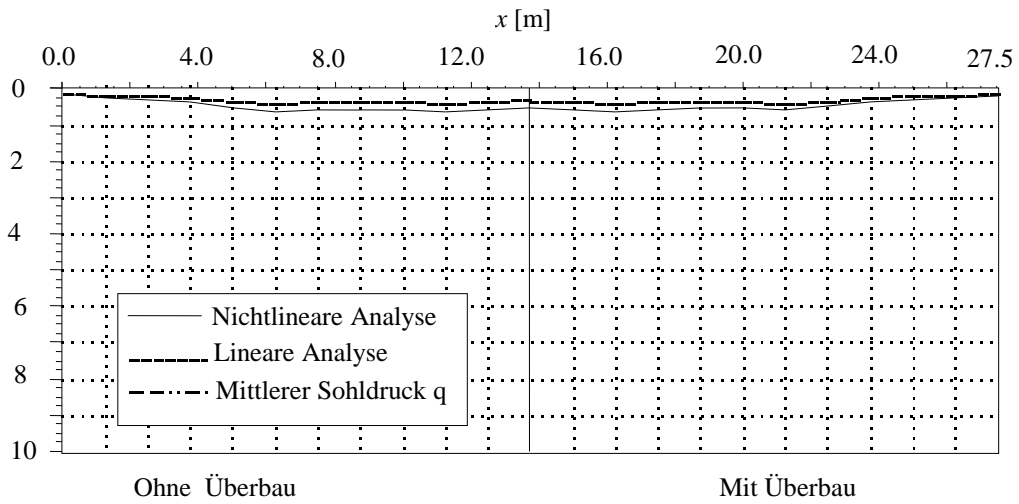
**Bild 6.20** Setzung  $s$  [cm] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - weicher Boden)



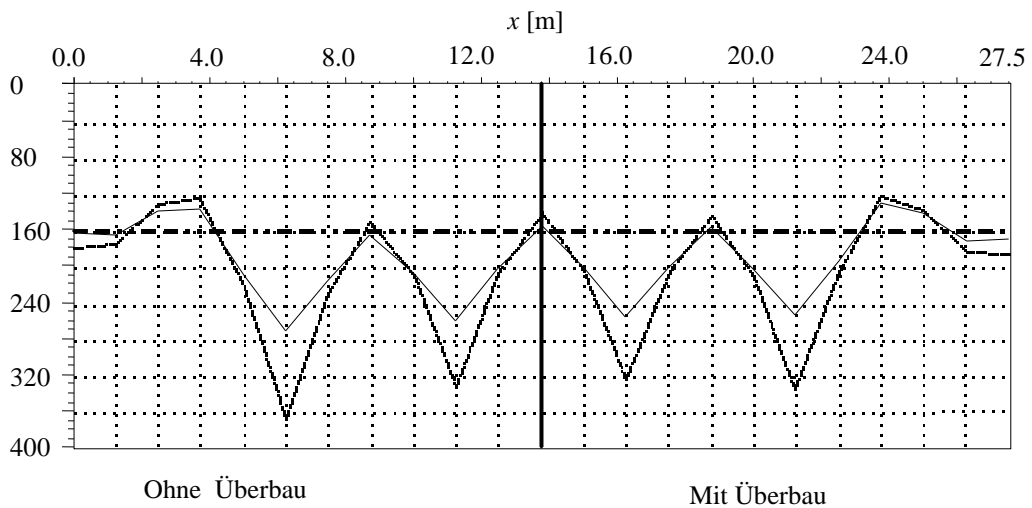
**Bild 6.21** Sohldruck  $q$  [ $\text{kN/m}^2$ ] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - weicher Boden)



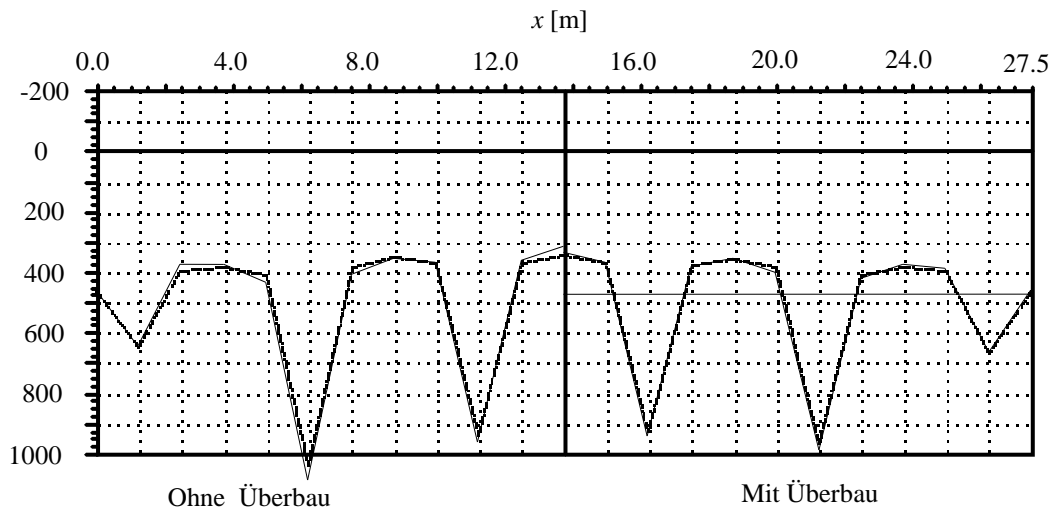
**Bild 6.22** Moment  $m_x$  [ $\text{kN.m/m}$ ] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - weicher Boden)



**Bild 6.23** Setzung  $s$  [cm] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - steifer Boden)



**Bild 6.24** Sohldruck  $q$  [kN/m<sup>2</sup>] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - steifer Boden)



**Bild 6.25** Moment  $m_x$  [kN.m/m] im Schnitt I (Steifemodulverfahren - steifer Boden)

In den nachfolgenden Tabellen 6.9 bis 6.12 werden die maximalen Setzungen, Sohldrücke unter den Stützen, Stützmente und Feldmomente und deren Unterschiede  $\Delta$  wiedergegeben.

Tabelle 6.9 Vergleich der maximalen Setzungen *max.s*

System Baugrund/ Bauwerk	Setzungs- berechnung	Setzung	weicher Boden $E_s = 18\ 000$ [kN/m <sup>2</sup> ]		steifer Boden $E_s = 180\ 000$ [kN/m <sup>2</sup> ]	
			Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren	Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren
ohne Interaktion	linear	$s_{ln}$ [cm]	3.27	3.51	0.45	0.44
	nichtlinear	$s_{nl}$ [cm]	7.85	8.81	0.62	0.64
	$\Delta = 100 \times (s_{nl} - s_{ln}) / s_{ln}$ [%]		140	151	38	46
mit Interaktion	linear	$s_{ln}$ [cm]	3.15	3.50	0.41	0.42
	nichtlinear	$s_{nl}$ [cm]	6.94	7.93	0.54	0.58
	$\Delta = 100 \times (s_{nl} - s_{ln}) / s_{ln}$ [%]		120	126	32	38

Tabelle 6.10 Vergleich der Sohldrücke  $q$  unter der Stütze

System Baugrund/ Bauwerk	Setzungs- berechnung	Sohldruck	weicher Boden $E_s = 18\ 000$ [kN/m <sup>2</sup> ]		steifer Boden $E_s = 180\ 000$ [kN/m <sup>2</sup> ]	
			Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren	Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren
ohne Interaktion	linear	$q_{ln}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	131	126	182	310
	nichtlinear	$q_{nl}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	122	122	152	212
	$\Delta = 100 \times (q_{nl} - q_{ln}) / q_{ln}$ [%]		-7	-3	-17	-32
mit Interaktion	Linear	$q_{ln}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	126	119	163	276
	nichtlinear	$q_{nl}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	115	114	139	196
	$\Delta = 100 \times (q_{nl} - q_{ln}) / q_{ln}$ [%]		-9	-4	-15	-29



Tabelle 6.11 Vergleich der Stützmente  $m_x$

System Baugrund/ Bauwerk	Setzungs- berechnung	Stütz- mente	weicher Boden $E_s = 18\,000$ [kN/m <sup>2</sup> ]		steifer Boden $E_s = 180\,000$ [kN/m <sup>2</sup> ]	
			Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren	Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren
ohne Interaktion	linear	$m_{ln}$ [kN.m/m]	725	742	609	557
	nichtlinear	$m_{nl}$ [kN.m/m]	812	836	638	613
	$\Delta = 100 \cdot (m_{nl} - m_{ln}) / m_{ln}$ [%]		12	13	5	10
mit Interaktion	linear	$m_{ln}$ [kN.m/m]	554	558	528	490
	nichtlinear	$m_{nl}$ [kN.m/m]	587	596	538	517
	$\Delta = 100 \cdot (m_{nl} - m_{ln}) / m_{ln}$ [%]		6	7	2	6

Tabelle 6.12 Vergleich der Feldmente  $m_x$

System Baugrund/ Bauwerk	Setzungs- berechnung	Feld- mente	weicher Boden $E_s = 18\,000$ [kN/m <sup>2</sup> ]		steifer Boden $E_s = 180\,000$ [kN/m <sup>2</sup> ]	
			Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren	Bettungs- modul- verfahren	Steife- modul- verfahren
ohne Interaktion	linear	$m_{ln}$ [kN.m/m]	-184	-161	-162	-136
	nichtlinear	$m_{nl}$ [kN.m/m]	3.84	62	-178	-157
	$\Delta = 100 \cdot (m_{nl} - m_{ln}) / m_{ln}$ [%]		102	139	10	15
mit Interaktion	linear	$m_{ln}$ [kN.m/m]	-125	-104	-153	-128
	nichtlinear	$m_{nl}$ [kN.m/m]	22	74	-159	-138
	$\Delta = 100 \cdot (m_{nl} - m_{ln}) / m_{ln}$ [%]		118	171	4	9

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

**Setzung (Tabelle 6.9)**

Die maximale nichtlineare Setzung ist für weiche Böden größer als die maximale lineare Setzung für die Berechnungen mit und ohne Interaktion des Überbaus. Bei steifen Böden sind sie kleiner.

**Sohldruck (Tabelle 6.10)**

Für Böden mit linearem Setzungsverhalten ist der Sohldruck bei weichen Böden größer als bei Böden mit nichtlinearem Setzungsverhalten (unter der Stütze). Es ist klar, dass die Sohldruckverteilung für Bettungsmodulverfahren und Steifemodulverfahren bezüglich ihrer Form nicht ähnlich ist. Der Sohldruck unter der Stütze ist bei steifem Boden mit dem Steifemodulverfahren größer als mit dem Bettungsmodulverfahren. Im Gegensatz hierzu ist es bei weichem Boden umgekehrt.

**Biegemomente (Tabellen 6.11 und 6.12)**

Bei Verwendung linearer oder nichtlinearer Setzungsberechnungen sind die Stützmomente für steifen Boden, die Werte der Stützmomente ähnlich (mit und ohne Interaktion des Überbaus).

Bei weichen Böden gibt es keine großen Unterschiede bei den Stützmomenten zwischen linearem und nichtlinearem Setzungsverhalten. Bei den Feldmomenten ist der Unterschied größer. Die Ergebnisse im Schnitt I der Bilder 6.24 bis 6.25 zeigen auch, dass sich im Feld zwischen den Stützen das Feldmoment von negativen zu positiven Werten bei der nichtlinearen Berechnung des Fundaments geändert hat.