

Bemessung von Trägerbohlwänden

– Gewölbewirkung bei Holzausfachungen –

von

Prof. Dr.-Ing. Otfried Beilke, Dipl.-Ing. Thomas Garbers, M. Eng. Anna Prüser

1. Einleitung

Trägerbohlwände werden häufig als Baugrubensicherung eingesetzt, für deren Ausfachung in der Regel Holzbohlen verwendet werden. In Deutschland erfolgt die Bemessung der Holzausfachung in der Regel mit einer Erddruckverteilung in Form einer Gleichstreckenlast. Grundsätzlich stellt sich jedoch die Frage, ob sich hinter der Trägerbohlwand eine Gewölbewirkung einstellt und dadurch wesentliche Teile des Erddrucks direkt in die Bohlträger eingeleitet werden. Dies würde zu einer Entlastung der Holzbohlen und damit zu einer wirtschaftlicheren Bemessung führen. Insbesondere im arabischen Raum, ohne eigene Holzressourcen, kann dies zu deutlichen Kosteneinsparungen führen. Dieser Bericht behandelt die Gewölbewirkung hinter einer Trägerbohlwand und geht auf Ergebnisse numerischer Analysen mit PLAXIS 3D ein.

2. Übliche Nachweisführung

In der Regel erfolgt für tiefe Trägerbohlwände zunächst die Ermittlung des aktiven Erddrucks nach COULOMB unter Berücksichtigung ebener Gleitflächen. Infolge der Steifigkeit der Wand sowie der Nachgiebigkeit der Stützungen wird dann eine Umlagerung des Erddrucks vorgenommen. Die Bemessung der Holzbohlen erfolgt dann mit der maximalen Erddruckordinate. Grundsätzlich wäre natürlich auch eine abschnittsweise Bemessung möglich, aber gerade bei tiefen Baugruben, wie sie im arabischen Raum häufig ausgeführt werden, ergibt sich als maßgebende Umlagerungsfigur häufig eine konstante Erddruckverteilung über einen großen Höhenbereich der Baugrubenwand (siehe Bild 1).

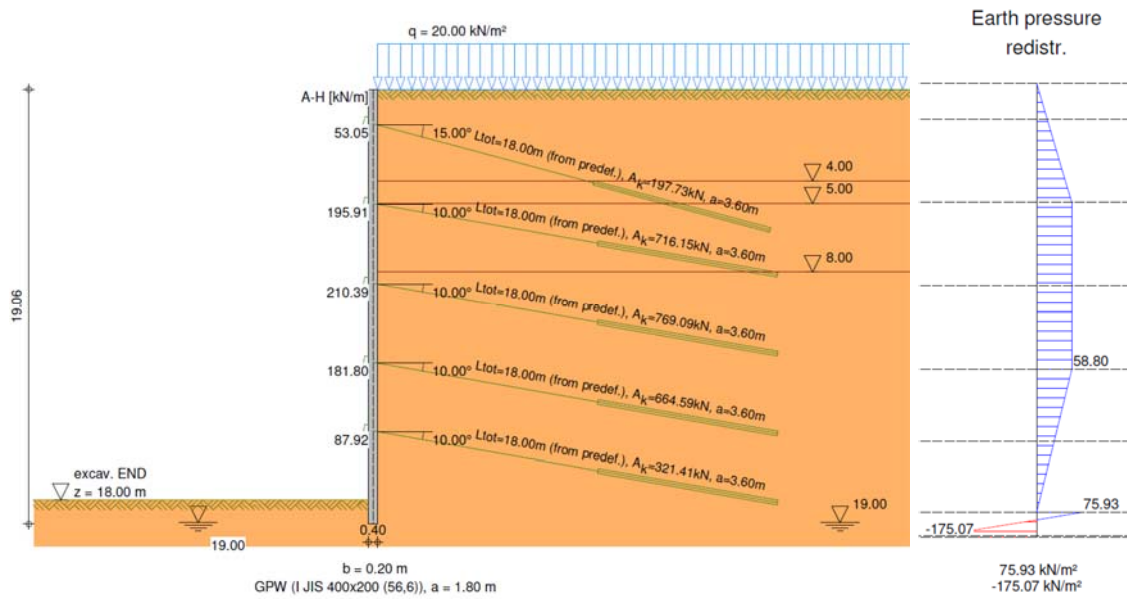


Bild 1 Umlagerungsfigur für eine mehrfachverankerte Baugrubenwand (BGU, 2016)

Die Bemessung der Holzbohlen erfolgt dann für die maximale (umgelagerte) aktive Erddruckordinate. Das übliche statische System für die Bemessung der Holzausfachung ist in Bild 2 dargestellt.

Statisches System:
Maßstab: 1:15

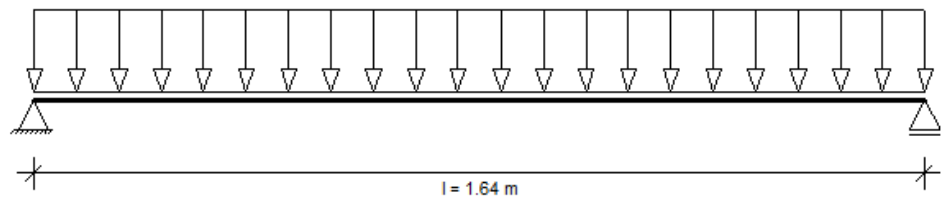


Bild 2 Häufig verwendetes statisches System zur Bemessung der Holzausfachung (BGU, 2016)

Unter Berücksichtigung der Auflagerung der Holzbohlen ergibt sich die Systemlänge zu

$$l_b = a_T - \frac{4}{5} b_T$$

$$l_b = 1,80 - \frac{4}{5} \cdot 0,2 = 1,64 \text{ m}$$

mit:

a_T = Achsabstand der Bohlträger, hier: $a_T = 1,8 \text{ m}$

b_T = Flanschbreite, hier: $b_T = 0,2 \text{ m}$

und damit das maßgebende Moment zur Bemessung zu

$$M_k = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{e_{a,k}^u \cdot l_b^2}{8}.$$

Sofern eine Gewölbewirkung hinter der Trägerbohlwand berücksichtigt werden kann, ist nach EAB ein doppelt dreiecksförmiger Erddruckansatz zulässig (Bild 3).

Static system:
Scale: 1:15

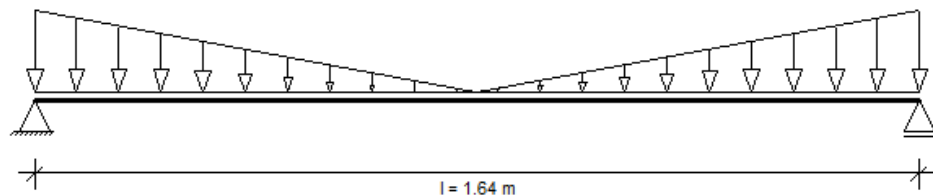


Bild 3 Berücksichtigung der Gewölbewirkung zur Bemessung der Holzausfachung (BGU, 2016)

In diesem Fall ergibt sich das maßgebende Moment zu

$$M_k = \frac{2 \cdot q \cdot l^2}{24} = \frac{e_{a,k}^u \cdot l_b^2}{12}.$$

Das maßgebende Moment zur Bemessung der Holzausfachung ist bei Berücksichtigung der Gewölbewirkung somit 1,5-fach kleiner.

3. Gewölbewirkung hinter Trägerbohlwänden

Die Annahmen zur horizontalen Gewölbewirkung hinter Trägerbohlwänden gehen auf Untersuchungen von WEISSENBACH (1977) zurück. Bild 4 zeigt die grundsätzlichen Annahmen zur möglichen Gewölbewirkung hinter Trägerbohlwänden. Durch die Nachgiebigkeit der Ausfachung beispielsweise durch die Art der Herstellung (Abgrabung ohne Stützung des Aushubs) oder Durchbiegung der Holzbohlen bei Beanspruchung, stellt sich eine Umlagerung der Erddruckspannungen in Richtung der Bohlträger ein (Bild 4b).

Ingenieurmäßig ist diese Annahme zunächst plausibel, eine quantitative Beurteilung ist jedoch nicht möglich. Außerdem können die Einflüsse einzelner Parameter nicht abschließend beurteilt werden.

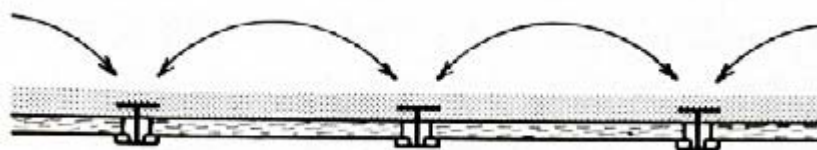


Bild 4a



Bild 4b

Bild 4 Bodengewölbe hinter den Bohlträgern (aus WEISSENBACH, 1977)

Nach WEISSENBACH (1977) bildet sich ein Bodengewölbe immer dann aus, wenn

- mitteldicht oder dicht gelagerter Sand bzw. steifer bis fester bindiger Boden ansteht,
- Bohlträger mit breiten Flanschen verwendet werden,
- die Bohlträger eingerammt werden,
- die Bohlträger für den Einbau höchstens bis zur halben Profilhöhe freigelegt werden und
- die Bohlen ohne Vorbiegung eingebaut werden (s.a. EA-B, EB 47).

Diese Forderungen scheinen zunächst plausibel. Es sind jedoch zusätzlich folgende Punkte zu berücksichtigen:

- auch in locker gelagerten Böden kann sich eine Umlagerung einstellen,
- die Größe der Kohäsion wird einen Einfluss auf die Umlagerung haben,
- auch bei Bohlträgern mit schmalen Flanschen wird sich eine Umlagerung einstellen,
- die Umlagerung wird vom Verhältnis Bohlträgerbreite zu Trägerabstand abhängen,
- auch bei eingerüttelten Trägern wird eine Umlagerung stattfinden und
- bei in Bohrlöchern eingestellten Trägern, hängt die Umlagerung von der Verfüllung des Bohrlochs ab.

Es können sich weitere Einflussfaktoren ergeben, auf diese wird hier zunächst nicht eingegangen.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurde geprüft, inwieweit sich auch bei einem locker oder locker bis mitteldicht gelagertem Boden eine Umlagerung einstellt. Dazu wurde ein Träger mit einer Flanschbreite von 300 mm modelliert und sowohl die Kohäsion als auch der Trägerabstand variiert.

4. Ergebnisse der numerischen Berechnungen

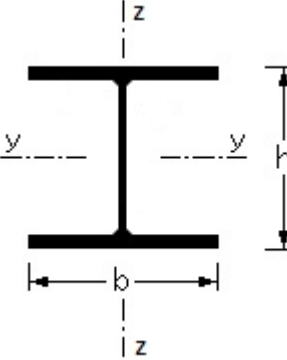
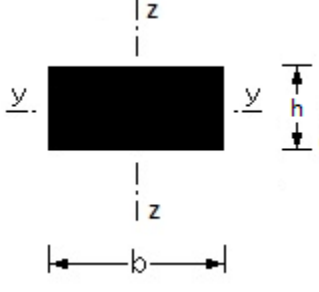
4.1 Allgemeines

Die Berechnungen wurden mit PLAXIS 3D durchgeführt und führen neben einem besseren Verständnis der auftretenden Gewölbewirkung auch zu einer quantitativen Beschreibung der Gewölbewirkung.

Zur Modellierung der Trägerbohlwand wurden Plattenelemente verwendet. Die Steifigkeit des Bohlträgers wurde dabei auf eine äquivalente Plattensteifigkeit umgerechnet.

Die Umrechnung ist in Tabelle 1 enthalten.

Tabelle 1 Querschnittswerte für die Berechnung mit PLAXIS 3D

HEB 300	Idealisierter Querschnitt
	
$h = 30 \text{ cm}$	$h \cong 21,6 \text{ cm}$
$b = 30 \text{ cm}$	$b = 30 \text{ cm}$
$A = 149 \text{ cm}^2$	$A = 648 \text{ cm}^2$
Trägheitsmoment	Trägheitsmoment
$I_y = 25.170 \text{ cm}^4$	$I_y' = 25.170 \text{ cm}^4$
Material	
$S 235 (St 37 - 2)$	
$f_{y,k} = 235,0 \text{ MN/m}^2$	
$\gamma = 78,50 \text{ kN/m}^3$	
$E = 210.000.000,0 \text{ kN/m}^2$	

Wesentlich für die Modellierung ist, dass für die Beschreibung des Bodens verwendete Stoffgesetz. Gute Erfahrungen wurden bei verschiedenen Projekten mit dem Hardening-Soil-Modell gemacht und die verwendeten Parameter auf der Basis von Erfahrungen festgelegt. Grundsätzlich handelt es sich um Parameter wie sie für einen locker bis mitteldichten Sand üblich sind. Wesentliche Parameter für die Berechnung des Gewölbeverhaltens sind die Steifigkeit des Bodens beschrieben mit $E_{50}^{ref} = 30.000 \text{ kN/m}^2$, der wirksame Winkel der inneren Reibung $\varphi'_k = 30^\circ$ und die Kohäsion c'_k . Die Größe der Kohäsion wurde bei den Berechnungen zwischen 1, 4, 6, 8 und 10 kN/m^2 variiert. Der Wert $c'_k = 1 \text{ kN/m}^2$ stellt dabei eine Art Mindestwert dar, da es ansonsten in PLAXIS häufig zu numerischen Schwierigkeiten kommt. Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung aller verwendeten Hardening-Soil-Parameter.

Tabelle 2 Verwendete Hardening-Soil-Parameter

Parameters für Hardening Soil Modell (HS)			
Material set	Model	Hardening Soil	-
Drainage type	Type	Drained	-
General properties			
Unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	11,0	[kN/m ³]
Unit weight below phreatic level	γ_{sat}	19,0	[kN/m ³]
Parameters			
Secant stiffness for CD triaxial test	E_{50}^{ref}	30000	[kN/m ²]
Tangent oedometer stiffness	E_{oed}^{ref}	30000	[kN/m ²]
Unloading/reloading stiffness	E_{ur}^{ref}	90000	[kN/m ²]
Power for stress level dependency of stiffness	m	0,55	-
Strength			
Cohesion	c'_{ref}	variable	[kN/m ²]
Friction angle	φ'	30,0	[°]
Dilatancy angle	ψ	0,0	[°]
Advanced Stiffness			
Poisson's ratio	ν'_{ur}	0,2	-
Reference stress for the stiffness parameters	P_{ref}	100	[kN/m ²]
Coefficient of earth pressure at rest	k_0^{nc}	$=1-\sin(\varphi')$	-
Failure ratio	R_f	0	-

4.2 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden zur anschaulichen Darstellung der Gewölbewirkung einmal drei Felder (Bild 5b) und einmal nur ein Feld (Bild 5a) abgebildet. Wobei es aus Gründen der Symmetrie grundsätzlich ausreichend ist, nur ein Feld zu modellieren.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse für einen eingespannten Bohlträger mit einer Aushubtiefe von 4 m. Grundsätzlich ergeben sich für alle Tiefen ähnliche Zusammenhänge. Dargestellt ist in den Bild 5a und 5b ein Schnitt in der Tiefe 2,5 m.

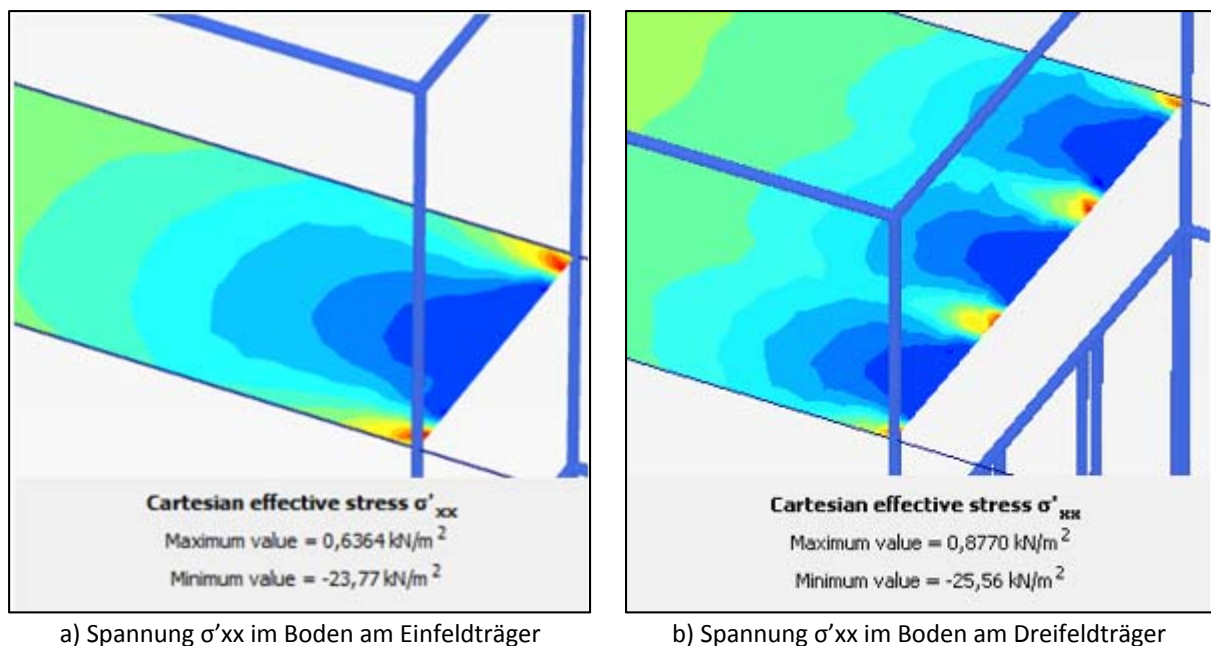


Bild 5 horizontale Spannungen σ'_{xx} für eine Kohäsion $c'_k = 4 \text{ kN/m}^2$,
Trägerabstand $a_T = 2 \text{ m}$

Die Gewölbewirkung ist sehr gut zu erkennen. Vor den Bohlträgern ergibt sich eine Spannungskonzentration (rot) und in Feldmitte im Bereich der Holzausfachung ergibt sich eine Entlastung (blau). Die in Bild 5 angegebenen Spannungswerte stellen Spannungsspitzen dar. Infolge der angesetzten Kohäsion können sich auch geringe Zugspannungen einstellen.

In Bild 6 ist die Gewölbewirkung für verschiedene Tiefen dargestellt. In 50 cm Schritten ist die Spannung σ'_{xx} zu sehen. In jedem Schnitt ist die Gewölbewirkung deutlich zu erkennen. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Spannungen mit zunehmender Tiefe ansteigen. So sind in einer Tiefe von 1,0 m die maximalen Spannungen vor dem Träger $5,5 \text{ kN/m}^2$ und in 3,5 m Tiefe $51,6 \text{ kN/m}^2$.

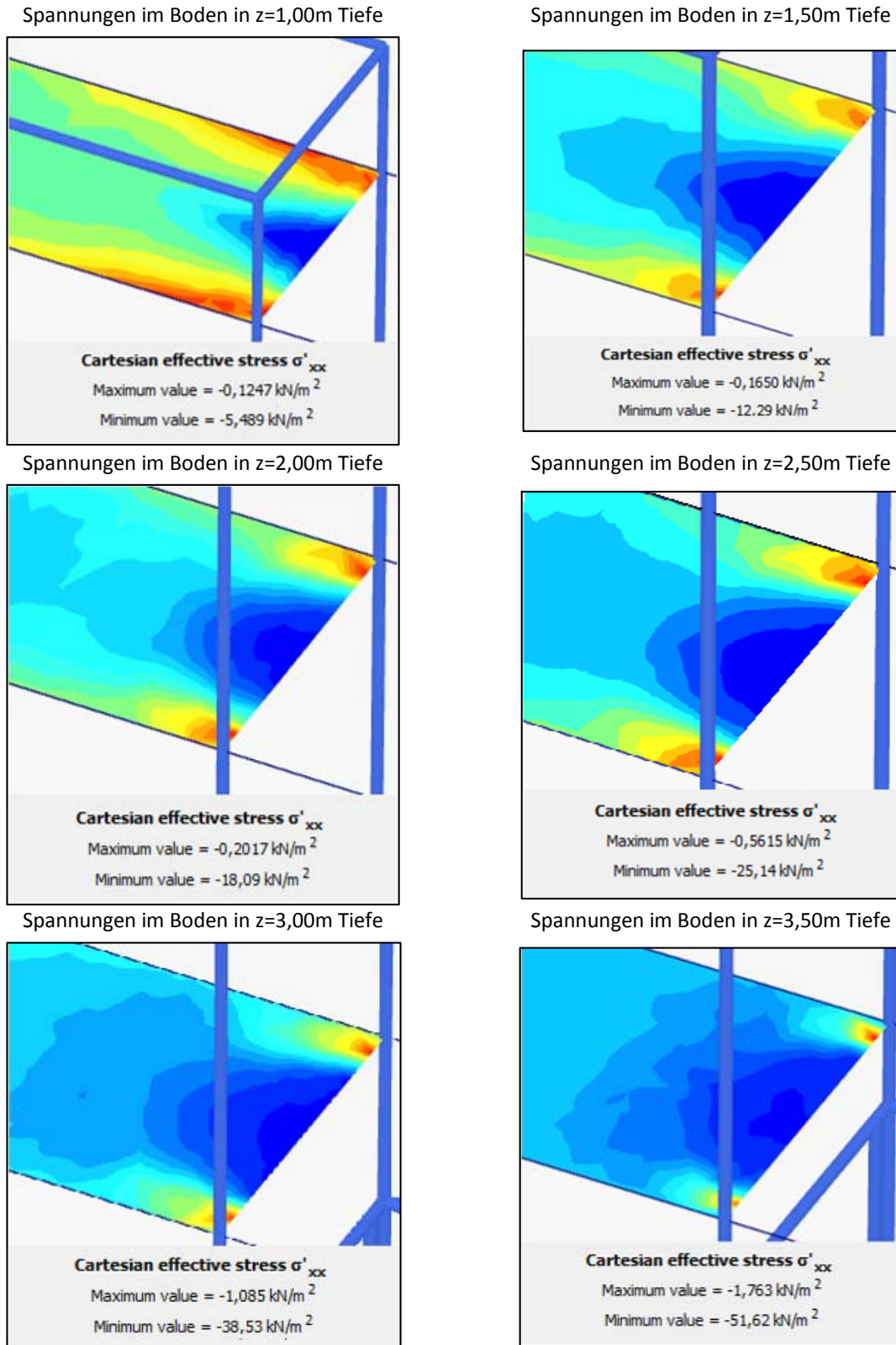


Bild 6 horizontale Spannungen σ'_{xx} in verschiedenen Tiefen
 Kohäsion $c'_k = 1 \text{ kN/m}^2$, Trägerabstand $a_T = 1,8 \text{ m}$

Zum besseren Verständnis der Spannungumlagerung wird ein Gewölbefaktor G_f eingeführt. Dieser Gewölbefaktor stellt das Verhältnis der nicht umgelagerten Erddruckspannung $e_{a,h}$ zur umgelagerten Spannung σ'_{xx} dar.

$$G_f = \frac{e_{a,h}}{\sigma'_{xx}}$$

In Bild 7 ist die Größe des berechneten Gewölbefaktors für einen Trägerabstand $a_T = 1,8$ m und einer Tiefe $z = 3$ m für verschiedene Größen der Kohäsion dargestellt.

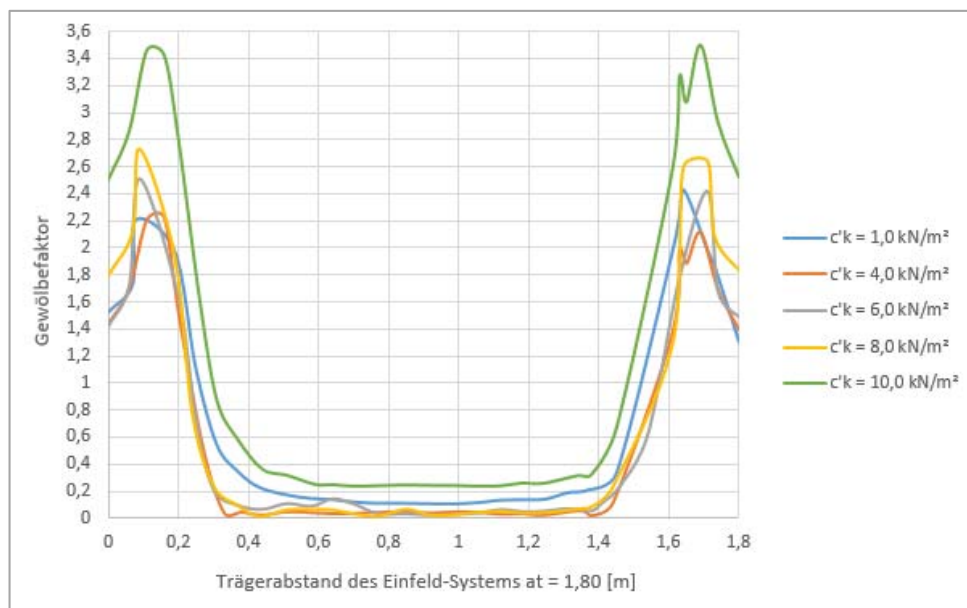


Bild 7 Gewölbefaktor in Abhängigkeit von der Kohäsion
 $a_T = 1,8$ m, Tiefe $z = 3$ m

Vor dem Bohlträger stellt sich ein Gewölbefaktor von ca. 1,5 bis 3 ein, d.h. die horizontale Bodenspannung ist ca. 1,5 bis 3-mal größer als der rechnerische horizontale Erddruck. Im Feldbereich und im Randbereich des Bohlträgers baut sich die Spannung sehr schnell ab und beträgt im mittleren Bereich nur maximal 20% der nicht umgelagerten Spannung.

Wie die Berechnungen zeigen, liegt ein doppelt dreieckförmiger Spannungsansatz für die Bemessung der Holzausfachung auf der sicheren Seite.

5. Schlussfolgerungen

Aus den numerischen Analysen ergeben sich folgende wesentlichen Schlussfolgerungen

- auch für locker bis mitteldicht gelagerte Böden ergibt sich eine deutliche Gewölbewirkung,
- die Kohäsion hat einen deutlichen Einfluss auf die Größe der Gewölbewirkung,
- aus numerischen Gründen wurde eine Mindestkohäsion von 1 kN/m^2 verwendet,
- eine Kohäsion von 1 kN/m^2 kann bei den meisten Sandböden ohne weiteres angesetzt werden,
- eine geringe Kohäsion ergibt sich bereits bei kleinen Schluffanteilen oder bei erdfeuchten Sanden (scheinbare Kohäsion),
- es ergeben sich für alle üblichen Trägerabstände (untersuchte Bandbreite 1,6 m bis 2,2 m) deutliche Gewölbewirkungen,
- auch für Träger mit schmalen Flanschen ergibt sich eine Gewölbewirkung,
- als Gewölbefaktor (Spannungserhöhung) kann vor dem Bohlträger ein Wert zwischen 1,5 und 3 angenommen werden und
- für die üblichen Randbedingungen ist eine (doppelt) dreiecksförmige Spannungsverteilung zur Bemessung der Holzausfachung zulässig.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass ein (doppelt) dreiecksförmiger Spannungsansatz für die Bemessung der Holzausfachung immer noch auf der sicheren Seite liegt. Die EAB fordert, dass bei Berücksichtigung der Gewölbewirkung auch der vertikale Erddruckanteil bei der Bemessung der Holzbohlen berücksichtigt wird. Diese Forderung erscheint zunächst willkürlich, da die Berücksichtigung der horizontalen Gewölbewirkung zunächst unabhängig von dem vertikalen Erddrücken ist. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Holzbohlen durch den durchgehenden Einbau gegen ein Verdrehen gesichert sind. Außerdem werden auch die vertikalen Erddrücke durch die Spannungskonzentration vor den Bohlträgern direkt über die Bohlträger in die Baugrubenwand eingeleitet. Die Forderung bei einer Berücksichtigung der Gewölbewir-

kung auch die vertikalen Anteile des Erddrucks bei der Bemessung der Holzausfachung zu berücksichtigen, erscheint stark auf der sicheren Seite liegend.

Bei tiefen Baugruben erfolgt der Einbau der Bohlträger häufig in vorgebohrte Löcher. Sofern der Ringraum wieder mit Boden verfüllt wird, erscheint eine Gewölbewirkung möglich. Es ist lediglich die Aufnahme der Gewölbedruckspannungen vor dem Träger nachzuweisen sowie die auftretenden Verformungen zu beurteilen.

Es sind weitere Untersuchungen vorgesehen, um alle Einflussfaktoren zu erfassen und beurteilen zu können.

6. Literaturverzeichnis

- | | | |
|----------------|------|--|
| BGU | 2016 | Central Body Work Shop, Kuwait City, Technical Report „H-Beam Shoring“
BGU Ingenieure GmbH, Hannover – Oldenburg, (internal report) |
| EAB | 2012 | Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, 5. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin |
| PRÜSER, A. | 2016 | Untersuchungen zur Gewölbewirkung bei aufgelösten Baugrubenwänden
Masterarbeit, Jade Hochschule Oldenburg |
| TERZAGHI, K. | 1954 | Theoretische Bodenmechanik, Springer Verlag, Berlin |
| WEIßENBACH, A. | 1977 | Baugruben Teil III, Berechnungsverfahren, Ernst & Sohn Verlag, Berlin |