

Statische Berechnung von Baugrubenwänden

– Nachweis in vertikaler Richtung –

von

Prof. Dr.-Ing. Otfried Beilke und Dr.-Ing. Armin Doster

1. Einleitung

Für Baugrubenwände erfolgt die statische Bemessung in der Regel in zwei Schritten.

Zunächst wird die erforderliche Einbindelänge über die horizontal wirkenden Kräfte ermittelt. In einem zweiten Schritt werden dann die Nachweise in vertikaler Richtung geführt. Die grundsätzliche Nachweisführung ist in der EAB Empfehlungen EB 9 und EB 84 geregelt.

Im Zuge der Berechnung verschiedener Baugrubenwände, wie beispielsweise mehrfach verankerte Trägerbohlwände oder mehrfach verankerte Bohrpfehlwände, sind wiederholt Fragen zum Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit aufgetreten.

2. Nachweis der mobilisierten vertikalen Kräfte (EB 9)

Zur Berechnung der Erddruckkräfte ist eine Annahme zum Wandreibungswinkel erforderlich. Im Zuge einer statischen Berechnung ist dementsprechend zu prüfen, ob der gewählte Wandreibungswinkel auch tatsächlich auftritt.

Bei der Wahl des Wandreibungswinkels wird zunächst eine günstige Annahme getroffen, d.h. es wird in der Regel der größtmögliche positive Wandreibungswinkel für die Berechnung des aktiven Erddrucks gewählt. Dies führt zu den „kleinsten“ Einwirkungen. Für die Ermittlung des Erdwiderstandes wird der größtmögliche negative Wandreibungswinkel angesetzt. Damit ergeben sich die größten Erdwiderstände und damit die kleinsten (möglichen) Einbindetiefen, Biegemomente und Ankerkräfte.

In einem zweiten Schritt sind die Annahmen zur Größe der Wandreibungswinkel zu prüfen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wandverformungen in der Regel immer ausreichend groß sind, um den positiven aktiven Wandreibungswinkel zu mobilisieren. Die Mobilisierung des passiven Erddrucks und damit des passiven Wandreibungswinkels erfordert deutlich größere Verformungen.

Anmerkung: Wesentlich ist die Größe des tatsächlich wirkenden Erdwiderstandes, d.h. des im Gebrauchszustand mobilisierten Erdwiderstandes $E_{ph,k}$.

Im Ergebnis ist nachzuweisen, dass die Summe der von oben nach unten vertikalen Kräfte gleich oder größer ist als die vertikale Komponente der unteren Auflagerkraft

$$V_k = \sum V_{k,i} \geq B_{v,k} .$$

Die Summe der vertikalen Kräfte ergibt sich allgemein zu

$$V_k = G_k + E_{av,k} + A_{v,k} + F_{v,k} .$$

Die Kraftwirkungen sind in Bild 1 dargestellt.

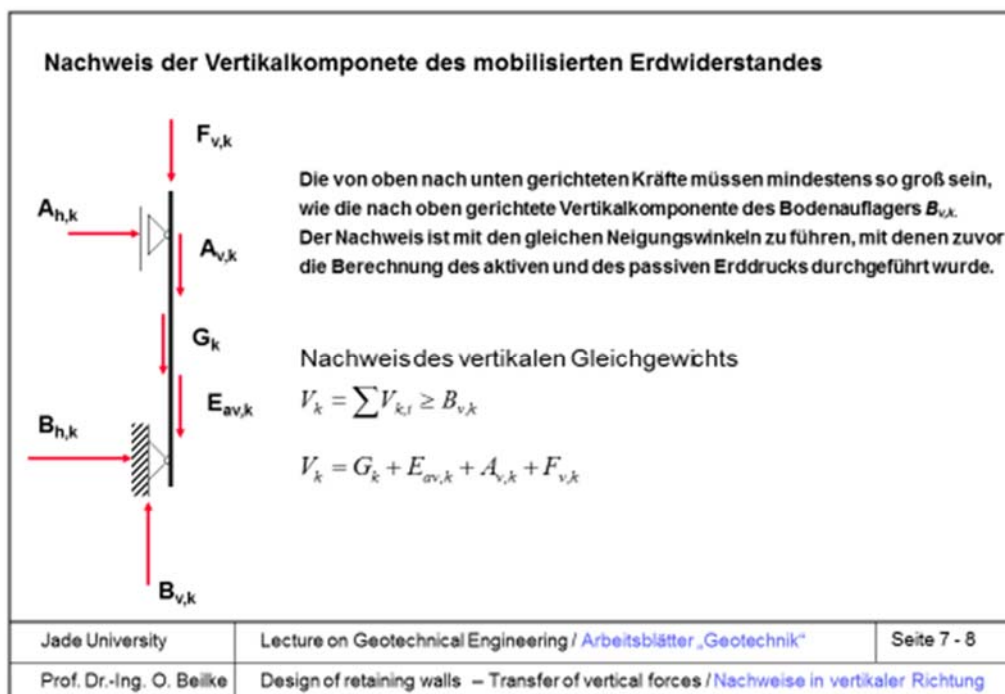


Bild 1 Nachweis des vertikalen Gleichgewichts

Der Nachweis des vertikalen Gleichgewichts stellt sicher, dass die Summe der von oben nach unten wirkenden vertikalen Kräfte die Mobilisierung der unteren Auflagerkraft $\sum V_k \geq B_{v,k}$ ermöglicht. Aus statischer Sicht stellt der Sonderfall $\sum V_k = B_{v,k}$ dabei die Einhaltung der Gleichgewichtsbedingung $\sum V = 0$ dar. Die Gleichgewichtsbedingungen $\sum H = 0$ und $\sum M = 0$ werden bei der Ermittlung der Auflagerkräfte bzw. der Längenermittlung verwendet und damit eingehalten.

Die untere Auflagerkraft B_k entspricht dabei anschaulich dem mobilisierten Erdwiderstand $\text{mob } E_{p,k}$

$$B_k = \text{mob } E_{p,k} .$$

Die vertikale Komponente $B_{v,k}$ lässt sich einfach aus der horizontalen Komponente berechnen

$$B_{v,k} = B_{h,k} \cdot \tan \delta_{p,k}$$

mit:

$\delta_{p,k}$ für gekrümmte Gleitflächen, auch wenn mit ebenen Gleitflächen gerechnet wurde.

Die Forderung $\delta_{p,k}$ für gekrümmte Gleitflächen zu berechnen, auch wenn der Erdwiderstand mit ebenen Gleitflächen ermittelt wurden, ist im Sinne einer statischen Berechnung nicht konsistent. Sofern der Nachweis $\sum V_k \geq B_{v,k}$ nicht erfüllt wird, muss der Wandreibungswinkel reduziert werden. Formal müsste dann der Wandreibungswinkel für die Erddruckermittlung mit ebenen Gleitflächen und der Wandreibungswinkel für die Ermittlung von $B_{v,k}$ mit gekrümmte Gleitflächen angepasst werden.

Für eingespannte Baugrubenwände ist zusätzlich die Ersatzkraft C nach BLUM zu berücksichtigen. Da $0,5 \times C_k$ oberhalb des theoretischen Spundwandfußpunktes F wirkt, sind die vertikalen Kräfte um $0,5 \times C_{v,k}$ zu erhöhen. Gleichzeitig ist die untere Auflagerkraft um $0,5 \times C_{v,k}$ zu verringern. Hier stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Größe der auftretenden Verformungen. Auf der passiven Seite und damit oberhalb des theoretischen Fußpunktes wird von einem Wandreibungswinkel $\delta_{p,k}$ ausgegangen. Unterhalb des theoretischen Fußpunktes wird üblicherweise $\delta_{c,k}$ angesetzt, wobei $\delta_{c,k}$ in der Regel kleiner ist als $\delta_{p,k}$. Diese Annahme ist grundsätzlich plausibel, da sich unterhalb des theoretischen Fußpunktes nur kleine Verformungen einstellen werden. Es ergibt sich

$$V_k = G_k + E_{av,k} + A_{v,k} + F_{v,k} + \frac{1}{2} \cdot C_{h,k} \cdot \tan \delta_{c,k} \geq \left(B_{h,k} - \frac{1}{2} \cdot C_{h,k} \right) \cdot \tan \delta_{p,k} .$$

mit:

$\delta_c \leq 1/3 \cdot \varphi'_k$, da die Verformungen im Bereich des theoretischen Fußpunktes klein sind.

Sofern der Nachweis des vertikalen Gleichgewichts nicht erfüllt wird, d.h. theoretisch zeigt die resultierende Kraft nach oben, was mechanisch nicht möglich ist, ist die Größe des gewählten passiven Wandreibungswinkels zu reduzieren. Im Ergebnis führt dies zur Einhaltung des vertikalen Gleichgewichts, aber auch zu einer Reduzierung des horizontalen passiven Erddrucks $E_{ph,k}$ und damit zu einer Vergrößerung der Einbindelänge und zu einer Vergrößerung der Schnittgrößen. Im Prinzip erfolgt eine schrittweise Annäherung an den maßgebenden passiven Erddruck ausgehend von dem günstigsten Fall, d.h. kleiner aktiver Erddruck und großer passiver Erddruck. Die Kenntnis dieser Vorgehensweise ist insofern besonders zu beachten, da im Bauwesen häufig zunächst ein auf der sicheren Seite liegender Ansatz gewählt wird und dann eine Optimierung erfolgt.

3. Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit (EB 84)

Der Nachweis der mobilisierten vertikalen Kräfte geht von relativ kleinen nach unten gerichteten Kräften V_k aus. Bei relativ großen nach unten gerichteten Kräften wird der Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit maßgebend. Beide Nachweise sind unabhängig voneinander zu führen.

Bei dem Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit ist nachzuweisen, dass die vertikalen Kräfte V_k von der Baugrubenwand über Mantelreibung und Spitzendruck abgetragen werden können. Das Tragverhalten der Wand im Fußbereich ist dann eher pfahlartig. Es ist die Grenzzustandsbedingung

$$V_d \leq R_d$$

einzuhalten. Es ist der Nachweis des Grenzzustandes ULS als GEO-2-Nachweis zu führen, mit den Bemessungswerte der Einwirkungen V_d und den Bemessungswerten der Widerstände R_d .

Die Einwirkungen ergeben sich aus äußeren Lasten $F_{v,k}$, dem Eigengewicht G_k , den vertikalen Anteilen aus Ankerkräften $A_{v,k}$ und der vertikalen aktiven Erddruckkomponente $E_{av,k}$. Bei der vertikalen Erddruckkomponente ist zu berücksichtigen, dass diese als Einwirkung bis zum theoretischen Fußpunkt F anzusetzen ist.

Die Widerstände ergeben sich aus der Reibung auf der Baugrubenseite (Seite des passiven Erddrucks), aus dem Fußwiderstand $q_{b,k}$ und ggf. aus Reibungsanteilen infolge einer

tiefer geführten Wand. Für den tiefer geführten Teil darf Reibung auf der aktiven und auf der passiven Seite angesetzt werden.

Anmerkung: In der EAB EB 84 heißt es hierzu „Bei Schlitzwänden oder Spundwänden darf eine Mantelreibung in den Bereichen als Widerstand angesetzt werden, in denen sie auf der gesamten Länge der Baugrube oder in einzelnen Teilen gestaffelt aus konstruktiven Gründen über das statisch erforderliche Maß hinaus verlängert werden.“ Diese Passage ist insofern missverständlich, als dass Bohrpfehlwände nicht aufgeführt sind.

Für den Ansatz der Reibung auf der passiven Seite sind zwei verschiedene Ansätze möglich:

- a) Ansatz von Mantelreibung $q_{s,k}$ multipliziert mit der Mantelfläche A_s oder
- b) Ansatz des vertikalen Anteils von $E_{p,k}$

In Bild 2 ist der Ansatz der Kräfte in horizontaler und vertikaler Richtung dargestellt. Zusätzlich ist der Nachweis des Grenzzustandes dargestellt.

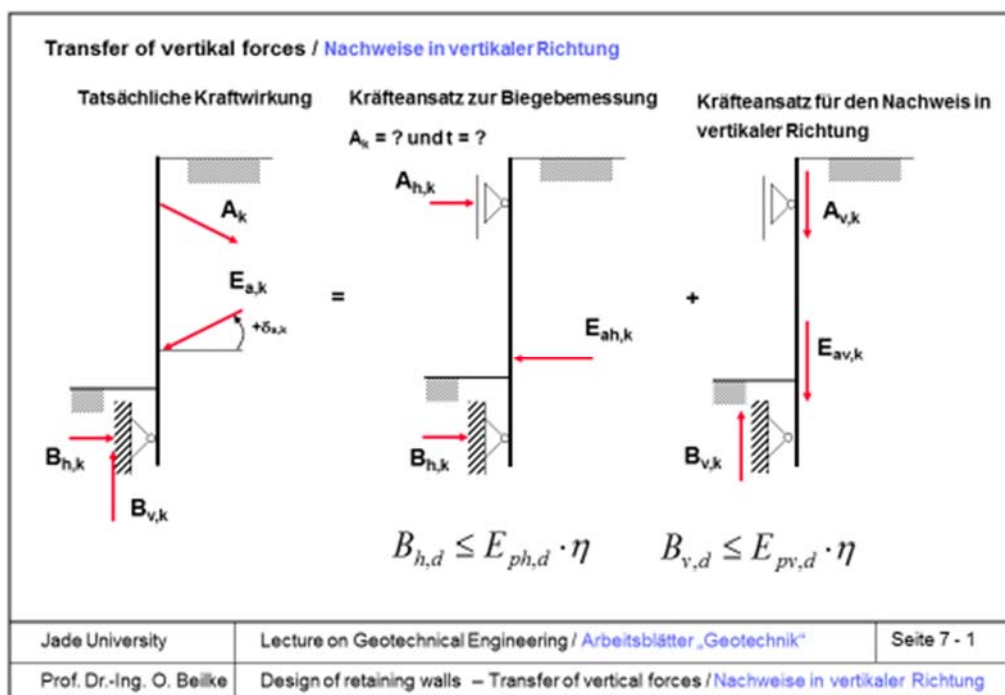


Bild 2 Nachweiskonzept in horizontaler und vertikaler Richtung

Die Nachweise ergeben sich unter Berücksichtigung eines Anpassungsfaktors η (s. a. EB 14, 22, 23 25 und 26) zur Reduzierung der auftretenden Verformungen im Erdwiderstandsbereich zu

$$B_{h,d} \leq E_{ph,d} \cdot \eta$$

und

$$B_{v,d} \leq E_{pv,d} \cdot \eta.$$

Für eingespannte Wände ist zusätzlich die vertikale Komponente der Ersatzkraft C zu berücksichtigen. Aufgrund der „großen“ von oben nach unten gerichteten vertikalen Kräfte kann davon ausgegangen werden, dass $C_{v,k}$ von unten nach oben gerichtet wirkt. Die vertikale Komponente ergibt sich damit zu

$$C_{v,k} = C_{h,k} \cdot \tan \delta_{C,k}$$

mit:

$$\text{bis zu } \delta_{C,k} = -2/3 \cdot \varphi_k'$$

4. Sicherheitsniveau in horizontaler und in vertikaler Richtung

Zur besseren Anschauung wird zusätzlich eine Betrachtung des Sicherheitsniveaus vorgenommen. Zunächst wird das Sicherheitsniveau unter Ansatz von $E_{pv,d}$ ermittelt.

Mit den Bemessungswerten der horizontalen Einwirkungen

$$B_{h,d} = B_{Gh,k} \cdot \gamma_G + B_{Qh,k} \cdot \gamma_Q$$

und den Bemessungswerte der Widerstände

$$E_{ph,d} = \frac{E_{ph,k}}{\gamma_{R,e}}$$

ergibt sich unter Berücksichtigung einer temporären Bemessungssituation (Baugrube, BS-T) mit den Teilsicherheiten

$$\gamma_G = 1,2; \gamma_Q = 1,3 \text{ und } \gamma_{R,e} = 1,3$$

sowie einer Verteilung von 90% ständigen und 10% veränderlichen Einwirkungen folgenden Sicherheitsniveaus

$$(0,9 \cdot \gamma_G + 0,1 \cdot \gamma_Q) \cdot \gamma_{R,e} = (0,9 \cdot 1,2 + 0,1 \cdot 1,3) \cdot 1,3 = 1,573.$$

Für die Betrachtung der vertikalen Richtung ergibt sich analog

$$B_{v,d} = B_{Gv,k} \cdot \gamma_G + B_{Qv,k} \cdot \gamma_Q,$$

$$E_{pv,d} = \frac{E_{pv,k}}{\gamma_{R,e}}$$

und

$$(0,9 \cdot \gamma_G + 0,1 \cdot \gamma_Q) \cdot \gamma_{R,e} = (0,9 \cdot 1,2 + 0,1 \cdot 1,3) \cdot 1,3 = 1,573.$$

Sofern die Vorgehensweise der EAB zum Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von $B_{v,k}$ verwendet wird, ergibt sich aus dem Nachweis des Erdauflegers (horizontales Gleichgewicht)

$$B_{h,d} = E_{ph,d} \Rightarrow B_{Gh,k} \cdot \gamma_G + B_{Qh,k} \cdot \gamma_Q = \frac{E_{ph,k}}{\gamma_{R,e}}$$

$$\Rightarrow B_{h,k} = \frac{E_{ph,k}}{\gamma_{R,e} \cdot \gamma_{G/Q}}$$

$$\text{mit: } R_{v,k} = B_{v,k} = B_{h,k} \cdot \tan \delta_{p,k} = \frac{E_{ph,k}}{\gamma_{R,e} \cdot \gamma_{G/Q}} \cdot \tan \delta_{p,k}.$$

Aus dem Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit

$$B_{v,d} = R_{v,d}$$

ergibt sich

$$\Rightarrow R_{v,d} = \frac{R_{v,k}}{\gamma_{R,e}} = \frac{E_{ph,k}}{\gamma_{R,e} \cdot \gamma_{G/Q} \cdot \gamma_{R,e}} \cdot \tan \delta_{p,k}.$$

Es wird wieder von einer temporären Bemessungssituation (Baugrube, BS-T) mit den Teilsicherheiten

$$\gamma_G = 1,2; \gamma_Q = 1,3 \text{ und } \gamma_{R,e} = 1,3$$

ausgegangen und eine Verteilung von 90% ständigen und 10% veränderlichen Einwirkungen berücksichtigt. Als Sicherheitsniveau ergibt sich dann

$$\gamma_{R,e} \cdot (0,9 \cdot \gamma_G + 0,1 \cdot \gamma_Q) \cdot \gamma_{R,e} = 1,3 \cdot (0,9 \cdot 1,2 + 0,1 \cdot 1,3) \cdot 1,3 = 2,04.$$

Es zeigt sich, dass die Vorgehensweise nach EAB zu einem deutlich höheren Sicherheitsniveau von 2,04 anstatt 1,57 unter Berücksichtigung von $E_{pv,k}$ führt. Generell besteht für eine derartige Forderung kein Grund. Denkbar wäre eine Begründung über eine Reduzierung der möglichen Verformungen, dies wäre dann aber nach der üblichen Vorgehensweise über die Einführung eines Anpassungsfaktors zu regeln.

5. Literaturverzeichnis

- | | | |
|------------------|------|--|
| EAB | 2012 | Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, 5. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin |
| DIN EN 1997-1 | 2009 | Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1, Beuth Verlag GmbH, Berlin |
| DIN 1054 | 2010 | Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin |
| DIN EN 1997-1/NA | 2009 | Eurocode 7-1: Nationaler Anhang, Beuth Verlag GmbH, Berlin |