

Nachweis der Standsicherheit von Verbauwänden mittels Finite-Element-Methode bei kohäsiven Böden

M. Sc. Antonia Zillmann, Universität Duisburg-Essen, Essen

Das derzeitige Anwendungsgebiet der Finite-Element-Methode (FEM) liegt bei Verbauwänden vorrangig in der Prognose von Verformungen. Die Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben (EAB) erlauben darüber hinaus, die FEM auch z.B. zur Berechnung der Belastung einer Verbauwand sowie für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit einer Baugrubenkonstruktion zu verwenden. Allerdings bereitet die Normung bei der Anwendung der FEM als Nachweisverfahren derzeit noch Schwierigkeiten, da die aktuellen Nachweisverfahren auf die klassische Erdstatik zugeschnitten sind. Diese lassen sich nicht immer auf die FEM als Berechnungsmethode anwenden.

Dieser Beitrag präsentiert Ergebnisse der Berechnungen zur Standsicherheit von Verbauwänden mittels FEM in kohäsiven Böden. Ein wichtiger Aspekt ist der Erddruck. Es wird untersucht, welcher Erddruck sich bei einer numerischen Berechnung ergibt. Dabei ist zu hinterfragen, ob ein Mindesterdruk bei der FEM-Berechnung, wie von der EAB bzw. DIN 4085 gefordert, angesetzt werden sollte. Des Weiteren bleibt zu klären, ob etwaige innere Zugspannung des Bodens bei der FEM-Berechnung ausgeschlossen oder begrenzt werden sollten und welchen Einfluss dies auf die Berechnungsergebnisse hat. Dieser Beitrag soll die Probleme, die bei der Berechnung von Verbauwänden in bindigen Böden auftreten können, aufzeigen und erste Ansätze zu deren Lösung vorstellen.

1. Einleitung

In einer ersten Studie zur Variation des Reibungswinkels von Perau und Zillmann (2015) wurde der Einfluss des Reibungswinkels u.a. auf den Ausnutzungsgrad, den Erddruck und die Schnittgrößen des Verbausystems dargestellt und diskutiert. Aufbauend darauf soll nun der Einfluss der Kohäsion auf die oben beschriebenen Belastungen und Kräfte untersucht werden.

Erste Literaturrecherchen zeigen, dass es derzeit relativ wenige systematisch durchgeführte numerische Berechnungsbeispiele für bindige Böden gibt. Insbesondere wird in der Literatur der Erddruck auf die Wand als Zwischenergebnis kaum behandelt.

Eine FEM-Berechnung in bindigen Böden wirft viele Fragestellungen auf, die mit der Kohäsion in Verbindung stehen. Einige dieser Fragen sind hier aufgelistet:

- Wie muss bei FEM-Berechnungen mit den auftretenden Zugspannungen, die bei Anwendung der Mohr-Coulombschen Grenzbedingung entstehen können, umgegangen werden?
- Was ist der Mindesterdruk und wie wird er berechnet?
- Was sagen die Normen und Empfehlungen dazu und wie können diese Aussagen interpretiert werden?
- Können die Ansätze der EAB bzw. DIN 4085 mit der FEM umgesetzt werden?
- Wird bei einer FEM-Berechnung Mindesterdruk berücksichtigt? Wenn ja, wie?

- Muss in Analogie zu den klassischen Verfahren zusätzlich zur FEM-Berechnung mit charakteristischen Parametern eine Berechnung des Ersatzreibungswinkels für den Mindesterdrunderdruck durchgeführt werden?

Um diese Fragen beantworten zu können, werden erste Berechnungen in bindigen Böden durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen stellt dieser Beitrag vor.

2. Untersuchtes System und Kennwerte zur Modellierung

Alle Berechnungen werden an einer zweifach ausgesteiften Verbauwand, die dem Beispiel aus Perau und Zillmann (2015) entlehnt wurde, durchgeführt. Die Baugrube hat eine Breite von 20 m. Die weiteren Abmessungen und das FEM-Netz sind der Abbildung 1 zu entnehmen.

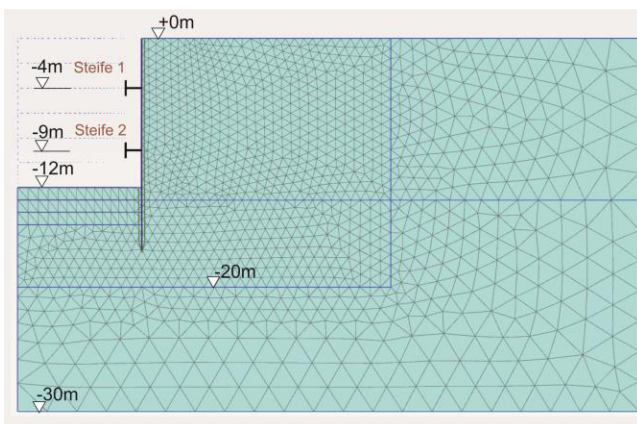


Abbildung 1: FEM-Netz des untersuchten Systems

Die hier vorgestellten Berechnungen werden mit dem Programm PLAXIS 2D Version 2016 unter Verwendung eines Netzes mit 15-knotigen Elementen durchgeführt. Die Abbildung des Bodens erfolgt mit dem Hardening-Soil-Model. Die Boden- sowie die Materialparameter sind in den folgenden Tabellen 1 und 2 zusammen gestellt.

Die folgende Auflistung beschreibt kurz den Ablauf der numerischen Berechnung. Phase 0: Primärspannungszustand, Phase 1: Einbringen der Spundwand („wished-in-place“), Phase 2 und 3: jeweils 2 m Aushub, Phase 4: Einbau der ersten Steifenlage, Phase 5 – 7: jeweils 2 m Aushub, Phase 8:

Einbau der zweiten Steifenlage, Phase 9: Endaushub bis 12 m unter Gelände.

Tabelle 1: Bodenparameter

Bodenparameter (Sand); HS-Model	
γ/γ'	18/9 [kN/m ³]
φ'	20 [°]
c'	10; 25; 50 [kN/m ²]
ψ	0 [°]
$R_{inter} = \tan \delta / \tan \varphi'$	0,7 [-]
$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$	20 [MN/m ²]
E_{ur}^{ref}	60 [MN/m ²]
ν_{ur}	0,2 [-]
p_{ref}	100 [kN/m ²]
m	0,5 [-]
$K_0^{nc} = K_0 = 1 - \sin \varphi'$	0,658 [-]
R_f	0,9 [-]

Tabelle 2: Parameter der Verbauwand und Steifen

Parameter der Spundwand (Larsen 43), Elasto-Plastisch	
EA	$4,452 \cdot 10^6$ [kN/m]
EI	73.290 [kNm ² /m]
M_{pl}	300 [kNm/m]
N_{pl}	$1 \cdot 10^{15}$ [kN/m]
w	1,7 [kN/m/m]
ν	0,2 [-]
Parameter der Steifen, ohne Vorspannung	
Federkonstante EA/I	75 [MN/m ²]
N_{pl}	350 [kN/m]

3. Analytische Berechnungen zum untersuchten System

Bei der Erddruckberechnung in bindigen Böden wird der Erddruck durch die Kohäsion gemindert. Diese Abminderung kann auf Höhe der Geländeoberkante zu keinen oder sogar zu negativen Erddrücken führen, d.h. es entstehen rechnerische Zugspannungen (vgl. Hettler, 2008). Diese Zugspannungen finden bei der Bemessung einer Verbauwand jedoch keine Berücksichtigung.

Dies kann dann dazu führen, dass ein zu schwacher oder kein Verbau für die Baugrube vorgesehen wird. Die DIN 4085:2011-05 fordert deshalb bei der Berechnung von Verbauwänden ein Mindestwert für den Erddruck.

3.1 Ermittlung des Mindesterdrrucks

Die Berechnung des Mindesterdrrucks erfolgt nach DIN 4085:2011-05 bzw. nach EAB. Der Mindesterdrruck wird unter der Annahme eines Ersatzreibungswinkels $\varphi'_{Ers,k} = 40^\circ$ und der Kohäsion $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ berechnet (vgl. Hettler, 2008). Die Geometrie des Systems bleibt unverändert. Die Berechnung erfolgt jeweils für die bindige Schicht.

3.2 Normen und Empfehlungen

Die Normen und Empfehlungen geben zwei Verfahren zur Ermittlung des maßgebenden Erddrucks an (vgl. Hettler und Triantafyllidis, 2014).

In der Variante a wird die Resultierende des charakteristischen Erddrucks mit der Resultierenden des Mindesterdrrucks verglichen (siehe EAB).

Die Variante b beinhaltet den Vergleich der Erddruckordinaten des charakteristischen Erddrucks und des Mindesterdrrucks (vgl. DIN 4085).

Zur Festlegung des maßgebenden Erddrucks erfolgt die Auswertung von einer der beiden Varianten. Bei der Variante a werden die Erddruckresultierenden für die jeweilige bindige Schicht ermittelt und miteinander verglichen. Bei mehreren Schichten mit unterschiedlichen Kohäsionen erfolgt der Vergleich für jede bindige Schicht separat. Die größere Resultierende gibt den maßgebenden Erddruck an.

Ein Vergleich der Erddruckordinaten beschreibt die Variante b. Die Variable z^* bezeichnet den Schnittpunkt des charakteristischen Erddruckverlaufs mit dem Verlauf des Mindesterdrrucks. Dieser Schnittpunkte berechnet sich nach der folgenden Gleichung Gl. 1:

$$z^* = \frac{c \cdot K_{ach}}{\gamma \cdot (K_{agh} - K_{agh}^*)} \quad \text{Gl. 1}$$

Bis zu dieser Tiefe z^* ist der Mindesterdrruck maßgebend, da dieser die größere Erddruckordinate ergibt.

Es fällt auf, dass die DIN 4085 zwar erklärt, wie die Tiefe z^* berechnet wird, allerdings gibt es keine explizite Erläuterung, welche Kräfte miteinander zu vergleichen sind. Die DIN 4085 beschreibt, dass die Erddruckkraft, die sich aus den

charakteristischen Parametern ergibt, mit der Erddruckkraft des Mindesterdrrucks verglichen werden sollen. Das kann entweder die Erddruckordinate oder die Erddruckresultierende sein. In der EAB ist die Aussage eindeutiger. Hier ergibt sich der maßgebende Erddruck aus der größeren Erddrucklast, also der Erddruckresultierende.

3.3 Klassische Erddruckberechnung am untersuchtem System

Die folgenden analytischen Berechnungen sollen die Stärken und Schwächen der beiden Varianten aufzeigen. Für das unter Kapitel 2 beschriebene System wird der maßgebende umgelagerte Erddruck ermittelt. Zuerst fand die Variante a zur Bestimmung des maßgebenden Erddrucks Anwendung. Da in diesem Beispiel ein homogener bindiger Boden vorliegt, berechnet sich die Resultierende des charakteristischen Erddrucks und des Mindesterdrrucks über die gesamte Tiefe der Verbauwand.

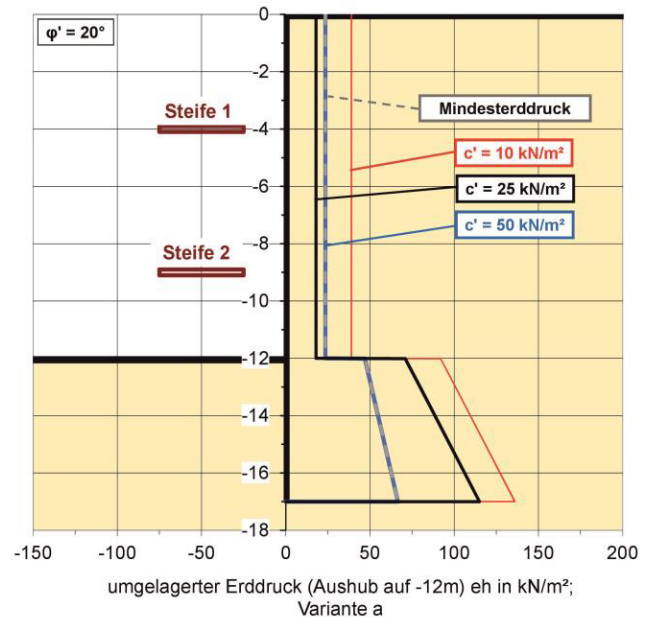


Abbildung 2: Verlauf des maßgebenden umgelagerten Erddruckverlaufs nach Variante a

Abbildung 2 zeigt den umgelagerten maßgebenden Erddruck für das untersuchte System in Abhängigkeit von der Kohäsion ($c' = 10; 25; 50 \text{ kN/m}^2$) sowie den Mindesterdrruck (gestrichelte Linie).

Der Erddruck nimmt mit der Kohäsion ab. Dies ist plausibel, da die Kohäsion die

Scherfestigkeit des Bodens erhöht und somit eine zusätzliche Haftkraft in der Gleitfläche wirkt, die den aktiven Erddruck abmindert und den passiven erhöht (vgl. Simmer, 1994). Für dieses System gilt ab einer Kohäsion von 30 kN/m² der Mindesterdruk. Bei Kohäsionen kleiner 30 kN/m² ist der charakteristische Erddruck größer. Allerdings fällt auf, dass bei einer Kohäsion von 25 kN/m² der umgelagerte Erddruck kleiner ist als der Mindesterdruk. Dies entsteht, wenn der charakteristische Erddruck über die gesamte bindige Schicht größer als der Mindesterdruk (vgl. Gl. 2) und der umzulagernde Anteil des Erddrucks, also von Geländeoberkante bis Baugrubensohle, kleiner als der Mindesterdruk ist (vgl. Gl. 3).

$$E_{ah,GOK-UK} > E_{ah,min,GOK-UK} \quad \text{Gl. 2}$$

$$E_{ah,GOK-BGS} < E_{ah,min,GOK-BGS} \quad \text{Gl. 3}$$

Abbildung 3 gibt für das berechnete System den anzusetzenden Erddruck in Abhängigkeit vom Reibungswinkel φ' und der Kohäsion c' an.

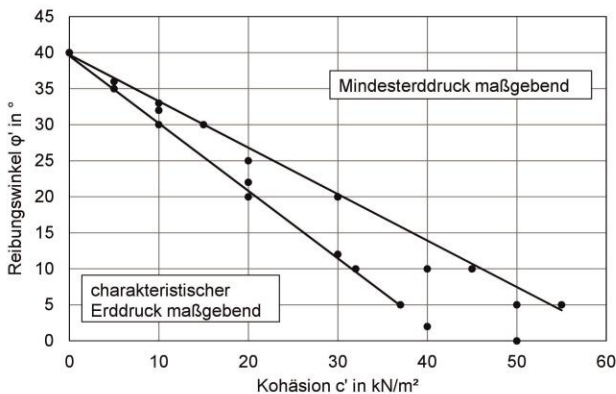


Abbildung 3: Anzusetzender Erddruck in Abhängigkeit vom Reibungswinkel φ' und der Kohäsion c'

Der anzusetzende Erddruck bei kleinen Reibungswinkeln und Kohäsionen entspricht dem charakteristischen Erddruck. Dementsprechend wird bei großen Werten für φ' und c' der Mindesterdruk maßgebend. Der Bereich zwischen den Linien ergibt Kombinationen von φ' und c' , für die die oben genannten Ungleichungen Gl. 2 und Gl. 3 zutreffen. Das bedeutet, dass der maßgebende umgelagerte Erddruck aus charakteristischen Parametern kleiner als der Mindesterdruk ist.

Da die DIN 4085 einen Mindesterdruk fordert, stellt sich die Frage, ob so eine Umlagerung, überhaupt erlaubt ist. Eine mögliche Lösung stellt die Betrachtung der Baugrubensohle als Schichtgrenze dar, also die Berechnung des Mindesterdruk getrennt für den Teil ober- und unterhalb der Baugrubensohle.

Zur Überprüfung dieser Möglichkeit werden die Berechnungen nochmals durchgeführt, allerdings mit der fiktiven Schichtgrenze auf Höhe der Baugrubensohle. Hierbei zeigte sich, dass der umgelagerte Erddruck immer größer als der Mindesterdruk ist oder genau diesem entspricht. Mit dieser Variante der fiktiven Schichtgrenze kann der umgelagerte Erddruck nicht mehr kleiner als der Mindesterdruk werden.

Für die Variante b berechnet sich die Tiefe z^* für jeden Boden mit variierender Kohäsion nach Gl. 1. Es ist im Bereich von der Geländeoberkante bis zur ermittelten Tiefe z^* der Mindesterdruk und unterhalb der Tiefe z^* der charakteristische Erddruck maßgebend. Die umgelagerten Erddruckverläufe der Variante b sind in Abbildung 4 dargestellt.

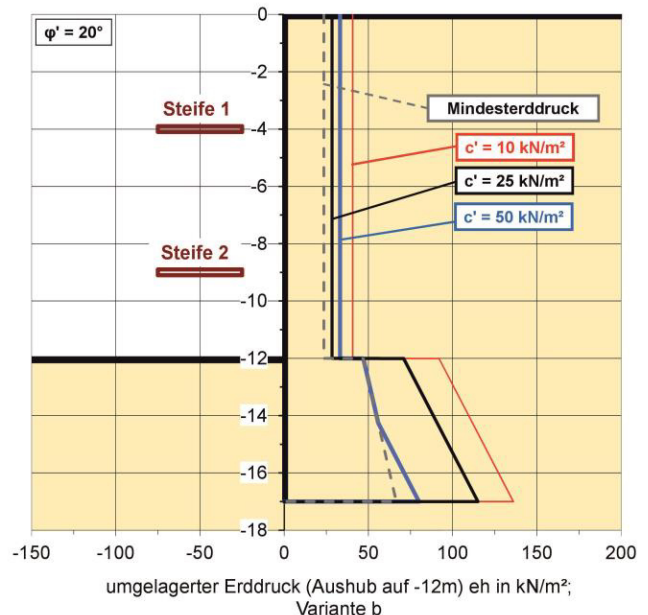


Abbildung 4: Verlauf des maßgebenden umgelagerten Erddruckverlaufs nach Variante b

Die nach dieser Variante ermittelten umgelagerten Erddrücke sind entweder größer als der Mindesterdruk oder entsprechen diesem.

Ein Vergleich der beiden Varianten zur Bestimmung des maßgebenden Erddrucks zeigt, dass die Ermittlung des Erddrucks nach DIN 4085 (Variante b) größere Werte für den Erddruck liefert als die Berechnung nach EAB. Bei beiden Varianten gilt, je größer die Kohäsion ist, desto mehr nähert sich der umgelagerte Erddruck dem Mindesterdruddruck an.

4. Erddruck aus FEM-Berechnungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus der FEM-Berechnung vorgestellt. Die Berechnungen werden an dem unter Kapitel 2 beschriebenen System und mit den in den Tabellen 1 und 2 aufgelisteten Parametern durchgeführt.

Der Erddruck bei einer FEM-Berechnung ist ein Ergebnis und kann nicht vorgegeben werden. Im Gegensatz dazu steht die klassische Berechnung, die letztendlich eine Vereinfachung darstellt. Hierbei ist der Erddruck nur ein Ansatz für die Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk und wird vorgegeben.

Bei einer FEM-Berechnung hingegen gehen deutlich mehr Parameter in die Berechnung ein, des Weiteren wird bei der numerischen Berechnung die Spannungsverteilung im Boden für alle Bauphasen berechnet und somit auch berücksichtigt. Dadurch kann die Wechselwirkung zwischen Baugrund und Bauwerk genauer abgebildet werden.

Abbildung 5 zeigt die Erddruckverläufe beim Endaushub. Der Reibungswinkel beträgt für alle Berechnungen $\varphi' = 20^\circ$, während die Kohäsion mit $c' = 10; 25$ und 50 kN/m^2 variiert.

Im Bereich direkt unterhalb der Geländeoberkante ist der Erddruck gleich null. Da das Mohr-Coulombsche Bruchgesetz mit der Option des „Tension cut-off“ für die Berechnungen gewählt wurde, sind Zugspannungen nicht möglich. Auf Höhe der ersten Steife konzentriert sich der Erddruck. Trotz der starken Variation der Kohäsion sind die Erddruckverläufe ähnlich. Es ist weiterhin zu erkennen, dass der Erddruck oberhalb der zweiten Steife mit zunehmender Kohäsion abnimmt. Unterhalb der zweiten Steife kehrt sich dieser Zusammenhang um, sodass der Erddruck

größer wird mit zunehmender Kohäsion. Dies liegt daran, dass sich der Erddruck mit größerer werdender Festigkeit des Bodens auf den Bereich der Einbindetiefezone umlagert. Ausgleichend dazu nehmen die Spannungen am Erdauflager ebenfalls mit der Kohäsion zu.

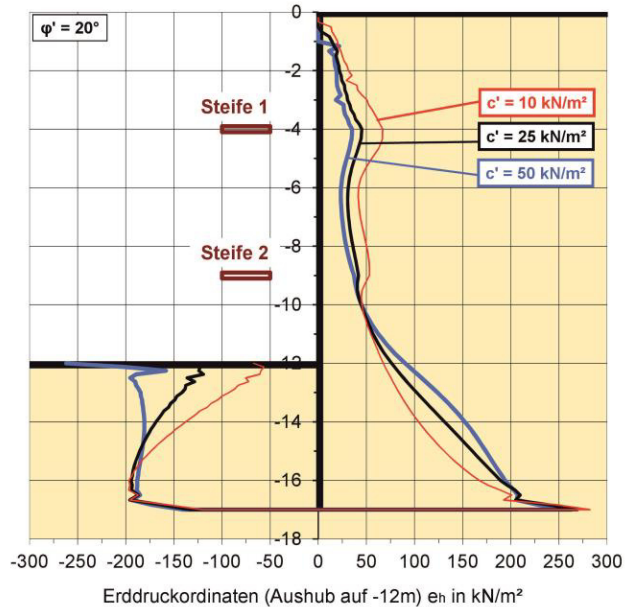


Abbildung 5: Erddruckverläufe aus der FEM-Berechnung

Des Weiteren ändert sich die Verteilung der Erdauflagerspannungen. Bei einer Kohäsion von $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ ähnelt die Verteilung einem Trapez mit Schwerpunkt im unteren Drittel der Einbindetiefezone. Mit zunehmender Kohäsion verteilt sich die Spannung zu einem eher gleichmäßigen Rechteck.

Um einen Vergleich von numerischen und klassischen Berechnungen durchführen zu können, wird in Abbildung 6 für eine Kohäsion von $c' = 25 \text{ kN/m}^2$ der Erddruckverlauf aus der FEM-Berechnung (breite, durchgezogene Linie), der umgelagerte Mindesterdruddruck $e_{ah,min}$ (dünne, durchgezogene Linie), der umgelagerte erhöhte aktive Erddruck $0,5 \cdot (e_{ah} + e_0)$ (gestrichelte Linie) sowie der Erdrudruck e_0 (Strich-Punkt-Linie) aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass der Erddruck aus der FEM-Berechnung zwischen dem Mindesterdruddruck und dem Erdrudruck liegt. Eine Abschätzung mit dem erhöhten aktiven Erddruck erscheint hier plausibel.

Für eine annähernd nachgiebige Verbauwand besteht der erhöhte aktive

Erddruck nach DIN 4085 zu je 50 % aus dem aktiven Erddruck und den Erdruhedruck. Nach Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich des erhöhten aktiven Erddrucks ergibt sich der resultierende Erddruck der numerischen Berechnung bei einer Kohäsion von $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ zu $E_{ah,FEM} \approx 0,34 E_0 + 0,66 E_{ah}$; für $c' = 25 \text{ kN/m}^2$ zu $E_{ah,FEM} \approx 0,5 E_0 + 0,5 E_{ah}$ und für $c' = 50 \text{ kN/m}^2$ zu $E_{ah,FEM} \approx 0,57 E_0 + 0,43 E_{ah}$. Dies zeigt, dass die Abschätzung mit einem erhöhten aktiven Erddruck sehr gut mit den numerischen Berechnungen, unabhängig von der Kohäsion, übereinstimmt.

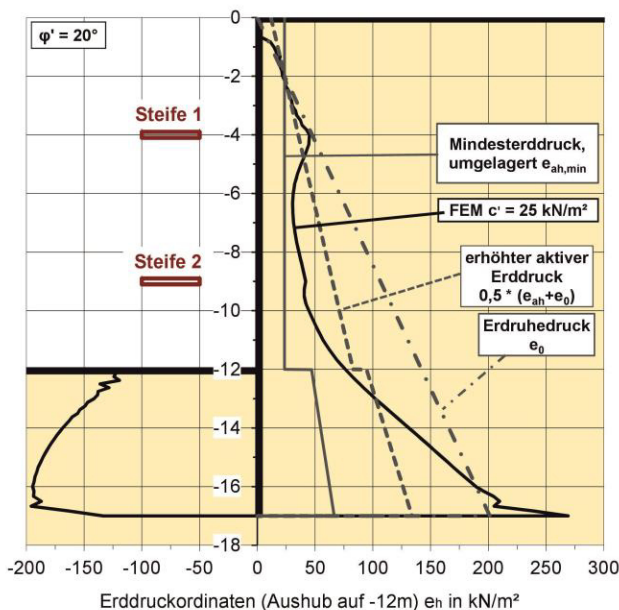


Abbildung 6: Vergleich der Erddruckverläufe nach klassischer und FE-Berechnung

4.1 Einflüsse auf die Erddruckberechnungen

Anders als bei den klassischen Berechnungen wird der Erddruck bei einer FEM-Berechnung durch mehrere Parameter beeinflusst. Zusätzlich zu den Scherparameter ϕ' und c' , der Geometrie und der Wandrauheit, die auch bei der klassischen Berechnung Berücksichtigung finden, werden bei einer FEM-Berechnung der Primärspannungszustand des Bodens, der Bauablauf, die Steifigkeit des Bodens, die Adhäsion sowie die Zugspannungen im Boden beachtet.

Die Ermittlung des Einflusses der Zugspannungen auf den Erddruckverlauf und deren Resultierenden erfolgt auf der Grundlage zusätzlicher Berechnungen, bei

denen die Zugspannungen im Boden erlaubt sind. Die Verläufe entsprechen den Erddruckverläufen ohne Zugspannungen. Der wesentliche Unterschied besteht in den Zugspannungen direkt unterhalb der Geländeoberkante. Nach Auswertung der Erddruckresultierenden zeigt sich, dass es bei kleinen Kohäsionen ($c' = 10 \text{ kN/m}^2$) zu einer Verringerung des Erddrucks um bis zu 20 % durch die Zulassung von Zugspannungen kommt. Bei größeren Kohäsionen haben die Zugspannungen kaum einen Einfluss auf die Größe der Erddruckresultierenden (vgl. Tabelle 3). Je größer die Kohäsion, desto weniger Einfluss haben die Zugspannungen auf den Erddruckverlauf und dessen Resultierende. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Zugspannungen bei der klassischen Berechnung sehr viel größer. Hier gilt: je größer die Kohäsion, desto kleiner der charakteristische Erddruck (vgl. Kapitel 3.3).

Tabelle 3: Vergleich der Erddruckresultierenden hinsichtlich der Zugspannungen

Kohäsion in kN/m^2	$E_{ah,FEM}$ mit Zugspannungen in kN/m	$E_{ah,FEM}$ ohne Zugspannungen in kN/m
10	965,3	1183,2
25	1156,7	1163,5
50	1180,0	1180,7

Die numerische Berechnung beginnt mit der Ermittlung des Primärspannungszustandes im Boden. Dieser Spannungszustand beschreibt die Spannungen des ungestörten Bodens. Die Ermittlung des Erddruckes der folgenden Phasen erfolgt auf Grundlage dieses Ausgangspannungszustandes. Aufgrund dessen wird untersucht, welchen Einfluss der Primärspannungszustand auf den Erddruck im Endaushub hat.

Die Vertikalspannungen im Primärspannungszustand entstehen aufgrund der Schwerkraft und nehmen mit der Tiefe linear zu. Die Horizontalspannungen werden mit Hilfe des Erdruhedruckbeiwertes K_0 und der Vertikalspannungen ermittelt. Der K_0 -Wert beschreibt also das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalspannungen und berechnet sich für dieses System mit einer

waagerechten Geländeoberfläche, wenn keine Vorbelastung vorliegt, nach der Gleichung $K_0 = 1 - \sin(\varphi')$ (vgl. EAB, 2012).

Zur Überprüfung des Einflusses des K_0 -Wertes auf den Erddruck sind weitere Berechnungen mit einem kleineren und einem größeren K_0 -Wert ($K_0 = 0,4$ und $K_0 = 0,9$) erforderlich. Der Reibungswinkel bleibt dabei unverändert. Die folgende Abbildung 7 zeigt beispielhaft und zur besseren Übersicht nur die Ergebnisse für eine Kohäsion von $c' = 25 \text{ kN/m}^2$.

Die gestrichelte Kurve stellt den Erddruckverlauf mit einem Erdruhedruckbeiwert von $K_0 = 0,4$, die durchgezogene Kurve den Verlauf mit $K_0 = 1 - \sin(\varphi') = 0,658$ und die Strich-Punkt-Linie mit $K_0 = 0,9$ dar.

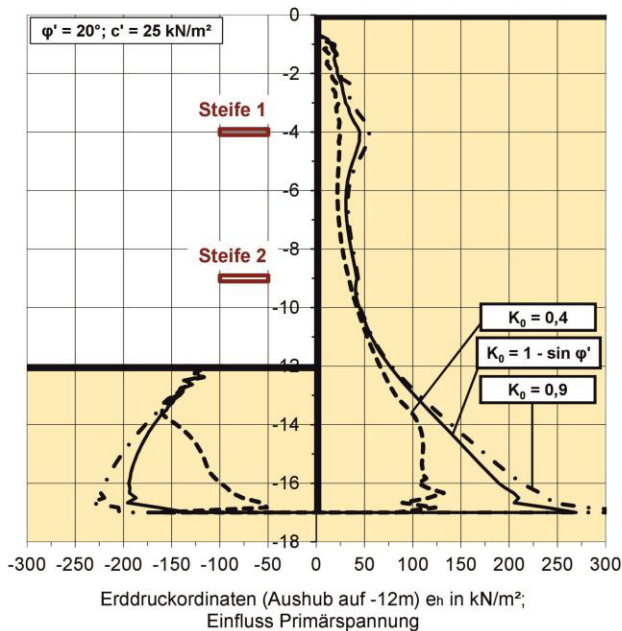


Abbildung 7: Einfluss des Primärspannungszustandes auf den Erddruckverlauf bei der FEM-Berechnung

Der Erddruckverlauf mit einem erhöhten Erdruhedruckbeiwert ist affin zu dem Verlauf mit dem Beiwert von $K_0 = 1 - \sin(\varphi')$ und nur geringfügig größer. Der Vergleich der Erddruckresultierenden (vgl. Tabelle 4) zeigt, dass diese sich um bis zu 12 % erhöhen. Ein zu groß abgeschätzter Beiwert ergibt also eher größere Erddruckresultierende.

Anders ist es, wenn der Erdruhedruckbeiwert zu niedrig abgeschätzt wird. Dies führt zu einer Verringerung der Erddruckresultierenden um bis 35 %, da die Horizontalspannungen im Primärspannungszustand bereits zu gering

abgeschätzt wurden. Auffallend ist, dass sich auch die Verteilung des Erddruckes ändert. Die Erddruckspannungen im Bereich der Einbindetiefezone werden deutlich geringer und bleiben ab einer Tiefe von ca. -14 m annähernd konstant. Auch die Verteilung der Erdaufspannung ändert sich. Der Schwerpunkt der Spannung wandert mit kleiner werdendem Erdruhedruckbeiwert in Richtung der Baugrubensohle. Es zeigt sich, dass eine zu niedrige Einschätzung des Primärspannungszustandes zu einem Erddruck führt, der kleiner ist und somit nicht mehr auf der sicheren Seite liegt. Diese beschriebenen Tendenzen werden auch bei den Kohäsionen von $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ sowie $c' = 50 \text{ kN/m}^2$ festgestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Erddruckresultierenden hinsichtlich des Primärspannungszustandes

c' in kN/m^2	E_{ah} in kN/m $K_0 = 0,4$	E_{ah} in kN/m $K_0 = 0,658$	E_{ah} in kN/m $K_0 = 0,9$
10	1023,4	1183,2	1234,0
25	825,1	1163,5	1277,3
50	757,0	1180,7	1350,5

Ein weiterer Parameter, der bei der klassischen Berechnung unberücksichtigt bleibt, ist die Steifigkeit des Bodens und der Wand. Für die folgenden Berechnungen wird die Steifigkeit des Bodens um ca. 75 % verringert, um die Auswirkungen auf den Erddruck untersuchen zu können. Es wird bewusst eine starke Verringerung der Steifigkeit gewählt, um den Einfluss deutlich darzustellen.

Die Berechnungen zeigten, dass bei allen Kohäsionen der Verlauf und die Verteilung des Erddruckes dem Boden mit großer Steifigkeit sehr ähnlich sind. Die Erddruckresultierenden reduzierten sich um maximal 10 %, wobei die Steifigkeit um 75 % also stark reduziert wurde. Die Steifigkeit des Bodens hat somit nur ein geringer Einfluss auf den Erddruckverlauf und deren Resultierende.

Zur Untersuchung des Einflusses der Steifigkeit der Wand wird der E-Modul der Wand ebenfalls um ca. 75 % verringert. Hierbei zeigte sich, dass diese Verringerung kaum einen Einfluss auf die Größe des Erddruckes sondern viel mehr auf die Verteilung hat. Je weicher die Wand ist desto

mehr verteilt sich der Erddruck auf die Steifen und auf die Einbindetiefezone, also auf die Bereiche, an denen die Wand gestützt ist. Dies erscheint auch plausibel, da diese Bereiche eine höhere Steifigkeit haben und die Last somit konzentrieren.

4.2 Anwendung des Mindesterdruks bei der FEM

Unabhängig von der Größe der Kohäsion ergaben die numerischen Berechnungen Erddrücke, die nur unmittelbar an der Geländeoberkante gegen null gehen. Da PLAXIS die Funktion des „Tension cut-off“ anbietet, können Zugspannungen unberücksichtigt bleiben. Ein Vergleich mit dem erhöhten aktiven Erddruck machte deutlich, dass der Erddruck aus der FEM-Berechnung noch weit vom aktiven Zustand entfernt ist.

Der Mindesterdruk scheint einen physikalischen Hintergrund zu haben, da der Erddruck aus der FEM-Berechnung selbst bei einer sehr hohen Kohäsion (beispielhaft für $c' = 100$ bzw. 200 kN/m^2 berechnet) gegen einen Grenzerdruks tendiert. Das bedeutet, dass bei einer FEM-Berechnung eine Art von Mindesterdruk eingehalten wird.

5. Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag präsentierte einige Fragestellungen bei der Berechnung von kohäsiven Böden. Aus den hier gewonnen Erkenntnissen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Der maßgebende Erddruck kann anhand von zwei Methoden ermittelt werden. Zum einen mittels eines Vergleiches der Erddruckresultierenden nach EAB, zum anderen mit dem Vergleich der Erddruckordinaten nach DIN 4085. Die Beispiele zeigten, dass die Ermittlung des Erddrucks nach DIN 4085 größere Werte für den Erddruck ergibt als nach EAB. Bei der Berechnung nach EAB sollte die Baugrubensohle als Schichtgrenze betrachtet werden.
2. Die Berechnungen mit und ohne Zugspannungen machen deutlich, dass die Zugspannungen nur einen geringen

Einfluss auf den Erddruckverlauf und deren Resultierende haben.

3. Offenbar wird bei einer FEM-Berechnung eine Art Mindesterdruk berücksichtigt. Die Erddrücke tendieren bei größer werdender Kohäsion gegen einen „Grenzerdruk“.
4. Der Primärspannungszustand hat einen Einfluss auf die Resultierende und den Verlauf des Erddrucks. Allerdings ist ein K_0 -Wert kleiner als $K_0 = 1 - \sin(\varphi')$ unsicherer als ein Wert, der größer ist.

Die in diesem Beitrag erarbeiteten Aussagen gelten zunächst nur für das untersuchte System. Zur Bestätigung dieser Aussagen müssen weitere Untersuchungen an verschiedenen Systemen erfolgen. Zusätzlich sollen noch weiterführende Analysen zum Ausnutzungsgrad, den Schnittgrößen und Verformungen in Abhängigkeit der Kohäsion durchgeführt werden.

6. Literatur

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben (EAB). Berlin: Ernst & Sohn, 5. vollständig überarbeitete Auflage, 2012

DIN 4085: 2011-05, Baugrund – Berechnung des Erddrucks, Berlin: Beuth Verlag, 2011

Hettler, Achim (2008): Erddruck. In: Karl Josef Witt (Hrsg.): Grundbau Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 7. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.

Hettler, A.; Triantafyllidis, T. (2014): Baugruben. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, S. 243–390

Simmer, Konrad (1994): Grundbau Teil 1. Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19., Neubearb. und erw. Aufl., Stuttgart: B. G. Teubner.

Perau, E.; Zillmann, A. (2015), Variation des Reibungswinkels bei der Bemessung von Baugrubenwänden mit der Finite-Element-Methode, Geotechnik 38 (2015), Heft 4, S. 289 – 303