

Nachweis der erforderlichen Ankerlänge bei rückverankerten und zugleich ausgesteiften Baugrubenwänden

apl. Prof. Dr.-Ing. E. Perau, Prof. Dr.-Ing. H.-G. Schoen, Dipl.-Ing. M. Hammacher
ELE Beratende Ingenieure GmbH
Erdbaulaboratorium Essen

Perau, Eugen; Schoen, Hans-Gerd; Hammacher, Marc (2008): Nachweis der erforderlichen Ankerlänge bei rückverankerten und zugleich ausgesteiften Baugrubenwänden, in: Vorträge der **Baugrundtagung 2008 in Dortmund**, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S. 327-334, download über www.uni-due.de/geotechnik/ email: eugen.perau@uni-due.de

Für rückverankerte Baugrubenwände lässt sich die erforderliche Ankerlänge über den Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge nach Kranz ermitteln. Bei dem dabei unterstellten Versagensmechanismus verschiebt sich der Wandkopf in Richtung Baugrube. Bei rückverankerten Baugrubenwänden, die zugleich im Kopfbereich durch Steifen oder Deckel gestützt werden, kann sich diese Verschiebung jedoch nicht einstellen, so dass der klassische Nachweis möglicherweise zu einem unwirtschaftlichen Ergebnis für die Ankerlänge führt. Andererseits ist offensichtlich auch bei derartigen Systemen eine gewisse Mindestlänge der Anker erforderlich. Es wird daher ein Nachweisverfahren auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) vorgestellt, mit dem für derartige Fälle die erforderliche Länge der Anker ermittelt werden kann.

1. Einführung

Tiefe Baugruben werden z.B. bei mehrgeschossiger Unterkellerung von Hochbauten oder in offener Bauweise erstellten Straßentunneln, U-Bahn-Strecken und zugehörigen Bahnhöfen notwendig. Für die dabei ausgeführten Baugrubenkonstruktionen sind verschiedene geotechnische Nachweise erforderlich, welche in DIN 1054:2005-01 geregelt sind. Dabei sind grundsätzlich zwei Grenzzustände (GZ) nachzuweisen. Im GZ 1 sind verschiedene Nachweise gegen das Versagen der Konstruktion sowie des beanspruchten Untergrunds zu führen; im GZ 2 ist die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion nachzuweisen.

Zu den Nachweisen gegen Versagen des beanspruchten Untergrunds gehört bei rückverankerten Verbauwänden auch der Nachweis einer ausreichenden Ankerlänge. Dadurch wird unter anderem sichergestellt, dass ein ausreichend großer Teil des Untergrunds zur Lastabtragung herangezogen wird.

Nach EC 7 muss die Ankerkraft „in so ausreichender Entfernung von der rückverhängten Bodenmasse in den Untergrund eingeleitet werden, dass die Standsicherheit dieser Masse nicht ungünstig beeinflusst wird“. Dieser Nachweis ist

nach DIN 1054 mit Hilfe des Nachweises gegen „Versagen in der tiefen Gleitfuge“ zu führen. Einzelheiten zum Nachweisverfahren sind in EAB und EAU festgelegt (1).

Auch der Nachweis der Gesamtstandsicherheit (Geländebruch), der gemäß DIN 1054 für den GZ 1C zu führen ist, kann für die Bestimmung der erforderlichen Ankerlänge relevant werden.

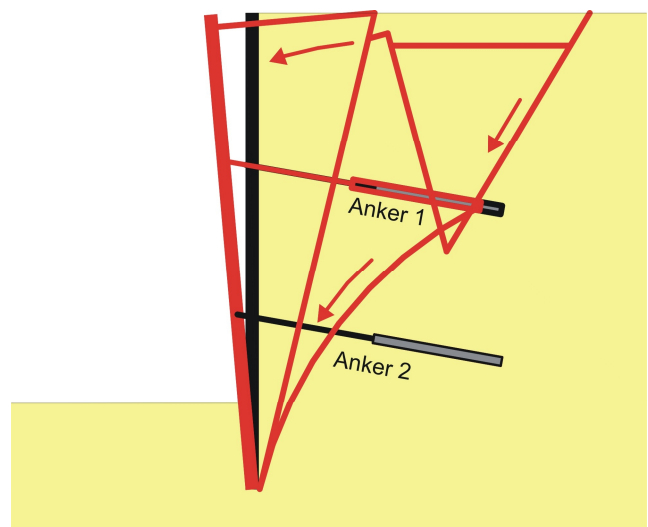


Bild 1: Mehrfach rückverankerte Baugrubenwand mit einem potenziellen Versagensmechanismus zur „tiefen Gleitfuge“

Der Nachweis gegen Versagen in der tiefen Gleitfuge basiert auf einem Berechnungsansatz der klassischen Erdstatik nach Kranz (2) sowie für mehrfach rückverankerte Baugrubenwände auf dessen Erweiterung nach Ranke/Ostermayer (3). Bei dem zugehörigen Versagensmechanismus wird unterstellt, dass die Wand sich um ihren Fußpunkt dreht und der Wandkopf sich dabei in Richtung Baugrube bewegt.

2. Ankerlängen bei Deckelbauweise

Vor allem bei innerstädtischen Baumaßnahmen stellen offene Baugruben im Straßenbereich ein erhebliches Hindernis dar. Um Sperrungen und Lärmemissionen durch die Bautätigkeit zeitlich zu minimieren, kommt hier häufig die „Deckelbauweise“ zur Ausführung. Dabei werden zunächst die Verbauwände und bei breiten Baugruben zusätzlich Primärstützen hergestellt. Nach einem Teilaushub bis in geringe Tiefe wird der Deckel betoniert, unter dessen Abschirmung dann die weitere Bautätigkeit erfolgt.

Über die Abschirmung hinaus wirkt sich der Deckel aufgrund seiner hohen Steifigkeit und seinem frühzeitigen Einbau auch auf das Verformungsverhalten der Verbauwand günstig aus, was vor allem bei angrenzender Bebauung von großem Vorteil ist.

Da die entsprechenden Baugruben für innerstädtische U-Bahn-Strecken tief in den Untergrund reichen können, werden über den Deckel hinaus weitere Abstützungen erforderlich. Aus baubetrieblichen Gründen werden statt zusätzlicher Steifen häufig Verankerungen gewählt. Es entsteht eine in der Tiefe rückverankerte Verbauwand, die zugleich am Kopf ausgesteift ist.

Der Deckel wirkt sich bei der Bemessung der Verbaukonstruktion und der Berechnung von Wandverschiebungen günstig aus und wird hier in jedem Falle angesetzt. Bei der Bestimmung der *erforderlichen Ankerlänge* ist jedoch ungeklärt, wie der günstige Effekt der Aussteifung durch den Deckel berücksichtigt werden kann.

Die Wand ist durch den Deckel an der Geländeoberkante unnachgiebig gestützt und kann sich hier nicht vom Erdreich in Richtung Baugrube bewegen. Eine derartige Bewegung ist aber Voraussetzung für den Versagensmechanismus zum Nachweis „tiefe Gleitfuge“, welcher in DIN 1054 und EAB geregelt ist.

Die einschlägigen Normen und Empfehlungen enthalten für den speziellen Fall der verankerten und zugleich ausgesteiften Baugrubenwand *keine*

explizite Regelung. Somit bleibt offen, wie hier Ankerlängen ermittelt werden können, die zu wirtschaftlichen Konstruktionen führen.

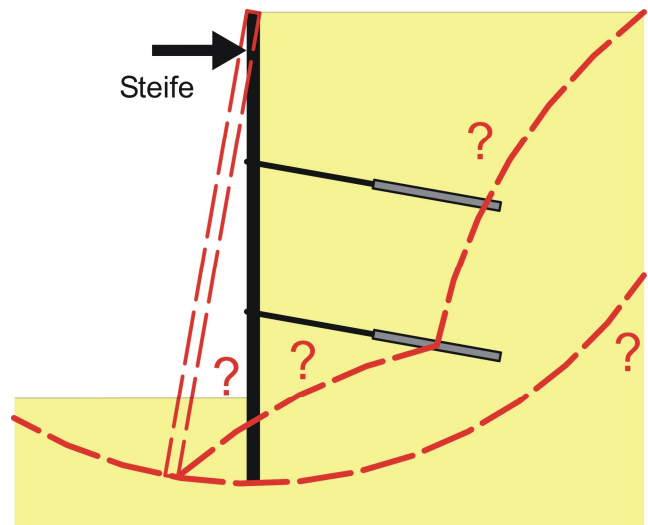


Bild 2: Baugrubenwand mit Deckel – Welches ist der maßgebliche Versagensmechanismus?

Die Berechnung mit einer weit verbreiteten aber zufällig ausgewählten Software zum normgerechten Nachweis von Verbauwänden hat ergeben, dass zumindest dieses Programm beim Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge zwar gemäß dem *Formalismus* der EAB vorgeht, die günstig wirkende Behinderung der Wandkopfverschiebung jedoch nicht berücksichtigt. Diese auf der sicheren Seite liegende Lösung wird aber häufig unwirtschaftlich sein.

Andererseits könnte der Verzicht auf den Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge mit der Begründung, dass der Versagensmechanismus der „tiefen Gleitfuge“ bei der Deckelbauweise nicht eintreten kann, zu unsicheren Ergebnissen führen.

Für eine zugleich wirtschaftliche und sichere Lösung sind daher weitergehende Überlegungen erforderlich. Naheliegender erscheint zum einen, dass die Verpresskörper der Anker zumindest hinter der zum aktiven Erddruck gehörenden Gleitfuge liegen müssen. Gemäß DIN 1054 wird auch ein Nachweis der Gesamtstandsicherheit nach GZ 1C für die Baugrubenkonstruktion erforderlich, welcher ebenfalls zu Mindestlängen für die Anker führen kann. Unklar ist, ob diese beiden Kriterien hinreichend zur Dimensionierung der Ankerlänge sind oder ob weitere Nachweise erforderlich werden. Dies gilt umso mehr, wenn sich eine Mindestlänge für die Anker über den Nachweis der Gesamtstandsicherheit nicht ableiten lässt, wie dies etwa bei größeren Wand-

einbindetiefen oder sehr schmalen Baugruben häufig der Fall ist.

Als Fazit ergibt sich, dass potenzielle und maßgebliche Versagensmechanismen zur Bestimmung der erforderlichen Ankerlänge im vorliegenden Fall nicht als bekannt vorausgesetzt werden dürfen.

3. FEM als Berechnungsverfahren

Wenn bei einer Konstruktion nicht bekannt ist, wie der maßgebliche Versagensmechanismus aussieht, empfiehlt sich die Anwendung eines Berechnungsverfahrens, das die Realität möglichst gut abbildet und keine Vorgaben über das Aussehen eines solchen Versagensmechanismus enthält. Dies ist bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit einem geeigneten Stoffgesetz der Fall.

Während die Verformungen von Verbauwänden für den Nachweis des GZ 2 zunehmend mit Berechnungen nach der FEM ermittelt werden, werden die zum Nachweis der Standsicherheit nach GZ 1 erforderlichen Berechnungen fast immer auf Basis der klassischen Erdstatik durchgeführt – und dies, obwohl die FEM den Anwender auch bei der Berechnung von Sicherheitswerten unterstützt (4, 5).

Die klassische Erdstatik geht hingegen bei Standsicherheitsnachweisen häufig von konservativen Vereinfachungen bei einem angenommenen Versagensmechanismus aus, um auf der „sicheren Seite“ zu liegen. Daher werden Baugrubenkonstruktionen damit mitunter unwirtschaftlich bemessen.

Die FEM, die keine Annahmen zum Versagensmechanismus voraussetzt, scheint somit als Berechnungsverfahren zum Nachweis der erforderlichen Ankerlänge bei rückverankerten und zugleich ausgesteiften Baugrubenwänden ein geeignetes Werkzeug zu sein.

Aufbauend auf die in (6) vorgeschlagene Vorgehensweise sowie die einschlägigen Untersuchungen in (1, 7, 8) soll die Sicherheit im vorliegenden Fall mit der sogenannten ϕ -c-Reduktion quantifiziert werden. Dieses Vorgehen hat sich für Konstruktionen als sinnvoll erwiesen, bei denen die Standsicherheit maßgeblich von den Scherparametern des Bodens abhängt.

Der Ermittlung eines Sicherheitswertes mit der ϕ -c-Reduktion ist eine Berechnung des Systems mit charakteristischen Kennwerten vorgeschaltet. Im Anschluss daran werden die Scherparameter $\tan \phi$ und c soweit reduziert, bis aufgrund der

zugehörigen Mohr-Coulombschen Bruchbedingung gerade kein Gleichgewichtszustand mehr erreicht werden kann und das System versagt.

Aus den reduzierten Scherparametern $\tan \phi_{\text{bruch}}$ und c_{bruch} , bei denen das Versagen des Systems eintreten würde, lässt sich nach (6) ein Wert für die Sicherheit ableiten.

$$\eta_{\text{FEM1}} = \frac{\tan \phi_k}{\tan \phi_{\text{bruch}}} = \frac{c_k}{c_{\text{bruch}}} \dots \dots \dots [1]$$

Dieser Wert entspricht etwa einer Sicherheit nach der Definition von Fellenius. Anhand des über alle Bauphasen erzielten kleinsten Wertes für η_{FEM1} lässt sich die Sicherheit vieler geotechnischer Konstruktionen quantifizieren.

4. Nachweis der erforderlichen Ankerlänge mit der FEM

Vorangegangene Untersuchungen (1, 8) haben gezeigt, dass mit der FEM der Einfluss der Ankerlänge auf das System der Verbauwand untersucht und auch die Sicherheit entsprechend quantifiziert werden kann. Dabei ergab sich unter anderem, dass mit zunehmender Ankerlänge die Sicherheit der Verbaukonstruktion zunächst ansteigt und dann stagniert und dass die Biegesteifigkeit (EI) sowie die Biegetragfähigkeit (M_{pl}) der Verbauwand einen großen Einfluss auf den berechneten Sicherheitswert und den maßgeblichen Versagensmechanismus haben.

Der Ablauf eines Nachweiskonzepts zur erforderlichen Ankerlänge auf Basis der FEM ist in (8) wiedergegeben und kann wie folgt skizziert werden:

- 1.) Berechnung der einzelnen Bauphasen mit charakteristischen Kennwerten und elasto-plastischen Materialgesetzen für Boden und Konstruktionsteile mit anschließender Auswertung der Querschnittsbeanspruchungen der Verbaukonstruktion
- 2.) Rechnerische Reduzierung der Scherparameter für alle relevanten Bauphasen bis zum Eintritt des Versagens
- 3.) Auswertung der für die einzelnen Bauphasen berechneten Sicherheitswerte nach Gleichung [1].

Obwohl die vorangegangenen Untersuchungen auf Baugrubenwände mit einer Ankerlage und ohne Aussteifungen beschränkt waren, ist eine Erweiterung auf mehrfach verankerte und zugleich ausgesteifte Baugrubenwände problemlos möglich.

Durch eine Variation der Ankerlängen im Rahmen des oben geschilderten Nachweisverfahrens können die Auswirkungen auf die berechnete Sicherheit sowie die Schnittgrößen und Verformungen ermittelt werden, die für die erforderliche Ankerlänge maßgeblich sind.

Darüber hinaus ergeben sich aus den Berechnungen jeweils der Bauzustand, der die geringste Sicherheit aufweist, sowie die maßgeblichen Versagensmechanismen einzelner Bauzustände. Je nach dem dabei geforderten Sicherheitswert ist der Nachweis der Gesamtstandsicherheit gemäß GZ 1C bereits integriert.

5. Anwendungsbeispiel

Anhand eines einfachen Beispiels soll gezeigt werden, wie das Berechnungsverfahren zur Untersuchung des Einflusses der Ankerlängen dient und somit auch zur Festlegung der erforderlichen Ankerlängen bei rückverankerten und zugleich im Kopfbereich ausgesteiften Baugrubenwänden verwendet werden kann.

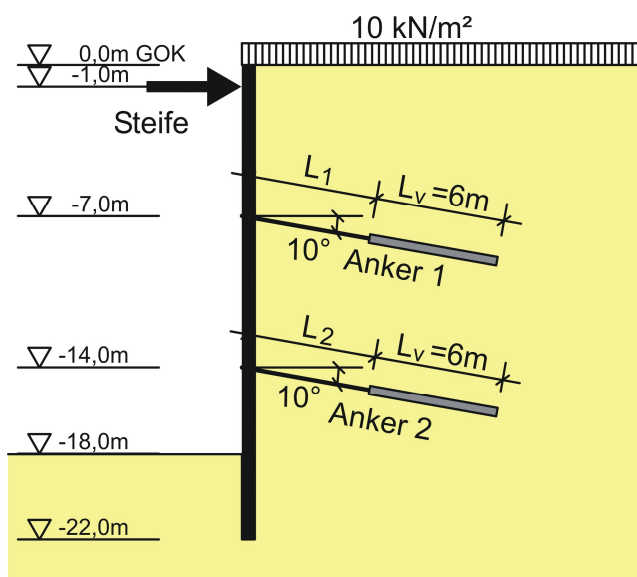


Bild 3: Berechnungsbeispiel – Geometrie

Es wurde vereinfacht von einem homogenen Baugrund ausgegangen, in dem *kein* Grundwasser ansteht.

Dem Beispiel liegen – soweit später keine Abweichungen dokumentiert sind – die in Tabelle 1 aufgeführten Bodenkennwerte sowie die darauf folgend im Text beschriebenen Materialien und Querschnitte mit ihren charakteristischen Kennwerten zugrunde.

Der Aushub wird in Schritten von 1,5 m bis 2,0 m modelliert. Die Anker werden eingebracht bei einem Aushub von jeweils 1,0 m unterhalb

ihres Ansatzpunkts und im selben Rechenschritt vorgespannt.

Tabelle 1: Charakteristische Bodenkennwerte

Bodenkennwert		Sand
Wichte	γ_k	20 kN/m ³
Scherparameter:	φ'_k	35°
	c'_k	0 kN/m ²
Wandreibung	$R = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi'}$	0,5
Steifemoduln E_s / E_{sw} bei ...		
	... $\sigma' = 100$ kN/m ²	60 / 180 MN/m ²
	... $\sigma' = 200$ kN/m ²	85 / 250 MN/m ²
	... $\sigma' = 500$ kN/m ²	105 / 310 MN/m ²

Verbauwand: Stahlbeton-Schlitzwand C20/25, $d = 0,60$ m, $EA = 1,74 \cdot 10^7$ kN/m, $EI = 5,22 \cdot 10^5$ kNm²/m, $M_{pl,k} = 1000$ kNm/m, $N_{pl,cal} = \infty$

Steife: Deckel aus Stahlbeton C20/25, $d = 1,0$ m, halbe Baugrubenbreite: $b/2 = 5,0$ m, $EA = 2,9 \cdot 10^7$ kN/m, $N_{pl(druck),k} = 17.500$ kN/m

Freie Ankerstrecke: Spannstahlilitzen $8 \times \varnothing 0,6''$, St 1570/1770, $EA = 1,09 \cdot 10^5$ kN/m, $N_{pl(zug),k} = 879$ kN/m, Vorspannung 500 kN/m, horizontaler Abstand 2 m, variable Längen L_1, L_2

Verpresskörper: angesetzte Querschnittswerte wie freie Ankerstrecke: $EA = 1,09 \cdot 10^5$ kN/m, $N_{pl(zug),k} = 879$ kN/m, $L_v = 6$ m

Einheitlich besteht das FEM-Netz, welches im Bereich der Verbauwand und der Verankerung verfeinert ist, aus ca. 3200 15-Knoten-Elementen. Die Verpresskörper werden durch Geotextil-Elemente mit festem Verbund zum Untergrund modelliert (8). Beidseitig des Verpresskörpers schließen sich 10 Dreiecks-Elemente der Umgebung an.

An diesem Beispiel werden nachfolgend verschiedene Parameter variiert, um die dabei auftretenden Effekte herauszuarbeiten. Im Vordergrund steht dabei die Variation der Ankerlängen. Vereinfachend wird hier angesetzt, dass die Anker in beiden Lagen jeweils gleich lang sind ($L = L_1 = L_2$).

5.1 Variation der Ankerlänge

An der in Bild 3 dargestellten Verbauwand wird die Länge der freien Ankerstrecken L variiert. Ausgewertet wird der Einfluss der Ankerlänge auf die Wandverschiebungen, die Steifen- und Ankerkräfte, die Biegemomente sowie den Erd- druck jeweils für den Endaushub. Ebenfalls werden die Sicherheitswerte gemäß Gleichung [1],

die sich bei der ϕ -c-Reduktion ergeben, für einzelne Zwischenzustände und den Endaushub sowie die zugehörigen Versagensmechanismen in Abhängigkeit von der Ankerlänge ausgewertet. Einige ausgewählte Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 sowie den Bildern 4 – 7 dargestellt.

Tabelle 2: Erddruckresultierende – Ergebnisse für den Endaushub in Abhängigkeit der Ankerlänge

Berechnungsverfahren	Ankerlänge L [m]	res. Kraft Erdwiderlager B_H [kN/m]	res. Erddruck (0m - 22 m) $E_{H(0m-22m)}$ [kN/m]	res. Erddruck (0m - 18m) $E_{H(0m-18m)}$ [kN/m]	res. Erddruck (18m - 22m) $E_{H(18m-22m)}$ [kN/m]	mittl. Erddruck (0m - 18m) $e_{H(0m-18m)}^*$ [kN/m ²]
FEM-Berechnung mit Variation der Ankerlänge	4	722	2264	1709	555	95
	6	703	2215	1584	631	88
	10	673	2118	1493	625	83
	14	653	2032	1427	604	79
Klassische Erddruckansätze	akt. Erddruck E_{ah}		1188	803	385	45
	$0,50 E_{ah} + 0,50 E_0$		1673	1130	542	63
	Erdruchdruck E_0		2158	1458	699	81

Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die mit der FEM berechnete Erddruckresultierende bei langen Ankern in der Größenordnung des klassischen Erdruchdrucks liegt und bei kürzeren Ankern diesen sogar nennenswert übersteigen kann. Bei kürzeren Ankern wird zudem die Beanspruchung des Erdwiderlagers größer. Wesentlich für die Größenordnung des Erddrucks ist dabei, dass die Wand an ihrem Kopf eine praktisch unnachgiebige Steife und über die Tiefe zwei hochvorgespannte Ankerlagen aufweist.

Bild 4 zeigt, dass der Erddruck sich bei der FEM vornehmlich auf die gestützten Wandbereiche – die beiden Ankerlagen sowie verstärkt den steifen Deckel und das Erdwiderlager – konzentriert. Tabelle 2 und Bild 4 zeigen den signifikanten Einfluss der Ankerlänge: bei kurzen Ankern wird der Erddruck auf die Wand größer. Offenbar tragen bei kurzen Ankern die Verpresskörper die Ankerlasten in zu dichtem Abstand von der Wand wieder in den Untergrund ein, so dass die Kräfte über den Baugrund zurück zur Wand geleitet werden. Der dadurch entstehende Erddruck führt auch zu großen Wandverschiebungen $w_{h,max}$. Tabelle 3 zeigt, dass die maximale Wandverschiebung, die hier stets etwa in Wandmitte auftritt, bei kurzen Ankern ver-

gleichsweise groß ist. Es kommt demnach bei kurzen Ankern – abweichend von den Vorstellungen der klassischen Erdstatik – sowohl zu großen Erddrücken als auch zu großen Wandverschiebungen.

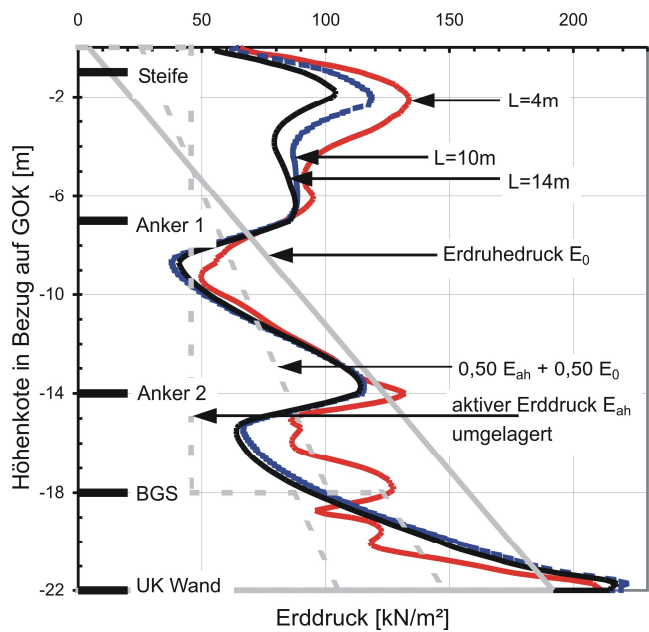


Bild 4: Erddruckverläufe für den Endzustand in Abhängigkeit von der Ankerlänge

Bei kurzen Ankern kann deshalb nicht mehr von einer Verankerung im eigentlichen Sinne die Rede sein, sondern eher von einer *Verklammerung* der Verbauwand an das Erdreich.

Die hohe Wandbelastung spiegelt sich auch in den berechneten Biegemomenten wider. Bei kurzen Ankern werden sogar die Stützmomente positiv, während bei längeren Ankern das gewohnte Bild von positiven Feld- und negativen Stützmomenten entsteht.

Bei der klassischen Bemessung einer Verbauwand als Biegeträger wird anders als bei der FEM unterstellt, dass die über die Verpresskörper in das Erdreich abgeleiteten Auflagerkräfte gänzlich im Untergrund „verschwinden“ und keine Rückwirkung auf die Belastung der Verbauwand haben. Ob diese Annahme mit ausreichender Genauigkeit zutrifft und die in den Untergrund eingeleiteten Kräfte tatsächlich nicht zur Verbauwand zurück gelangen, kann mit Hilfe einer FEM-Berechnung verifiziert werden.

Tabelle 3 und Bild 5 zeigen die Abhängigkeit einiger Berechnungsergebnisse von der Ankerlänge. Die Ankerkräfte hängen dabei aufgrund der hohen Vorspannung sowie der geringen Dehnsteifigkeit der Spannstahlritzen und der in jedem Fall geringen Ankerzusatzdehnung kaum von der Ankerlänge ab.

Das maximale Biegemoment, das stets im Feld zwischen den beiden Anker n liegt, ist bei längeren Anker n signifikant geringer. Das gilt ebenso für die Steifenkraft und die maximale Wandverschiebung.

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse nach der FEM in Abhängigkeit der Ankerlänge L

Ankerlänge L [m]	Steifenkraft S_1 [kN/m] *	Ankerkraft A_1 [kN/m] *	Ankerkraft A_2 [kN/m] *	Max. Biegemoment M_{max} [kNm/m] *	Wandverschiebung $w_{h,max}$ [mm] *	η_{FEM1} vor Ankerung 1	η_{FEM1} vor Ankerung 2	η_{FEM1} beim Endaushub
4	475	522	544	669	52	2,946	1,315	1,301
6	442	516	532	493	36	3,033	1,395	1,424
8	407	517	527	395	28	2,982	1,499	1,549
10	372	519	524	347	23	3,001	1,572	1,625
12	343	520	521	314	20	3,014	1,633	1,654
14	319	522	518	303	18	3,053	1,677	1,679

(* für den Endaushub)

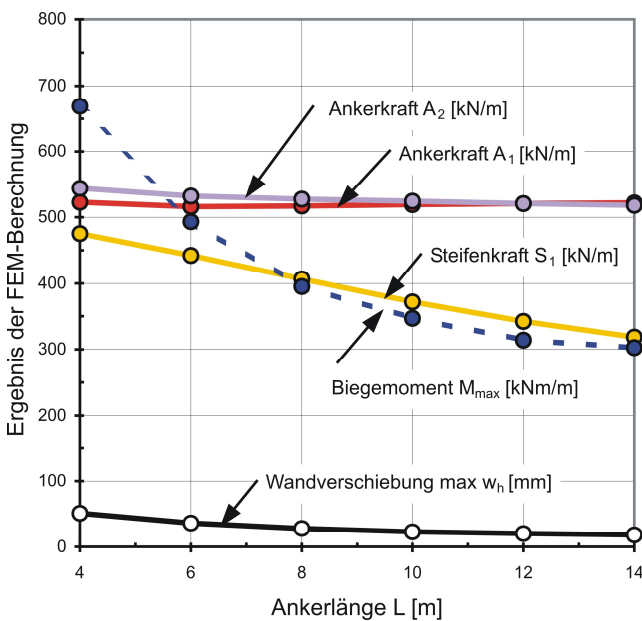


Bild 5: Ausgewählte Ergebnisse für den Endaushub in Abhängigkeit von der Ankerlänge

Die mit der FEM berechneten Sicherheitswerte sind in Tab. 3 und Bild 6 wiedergegeben. Sie betragen bis zur Herstellung der ersten Ankerlage einheitlich etwa 3,0, hängen also, wie zu erwarten war, nicht von der Ankerlänge ab. Die Sicherheitswerte für den Zustand vor Einbringen der zweiten Ankerlage und beim Endaushub sind etwa gleich. Sie nehmen den erwarteten Verlauf (1, 8) an, liegen aber im Vergleich zu entsprechenden Baugruben ohne Deckel bereits bei relativ kurzen Anker n auf hohem Niveau und weisen

bei längeren Anker n keinen erheblichen Anstieg mehr auf.

Hinsichtlich der *Stand sicherheit* der geotechnischen Konstruktion reichen in dem vorliegenden Beispiel bereits relativ kurze Anker (z.B. $L = 6$ m) aus, obwohl die Verpressstrecke des oberen Anker s zu einem erheblichen Anteil innerhalb des aktiven Erddruckkeils liegt.

Hinsichtlich der *Gebrauchstauglichkeit* ist zu berücksichtigen, dass mit abnehmender Ankerlänge die Wandverschiebungen überproportional ansteigen. Zugleich kommt es zu einer höheren Belastung der Wand und des Erdwiderlagers sowie einer stärkeren Beanspruchung des Wandquerschnitts.

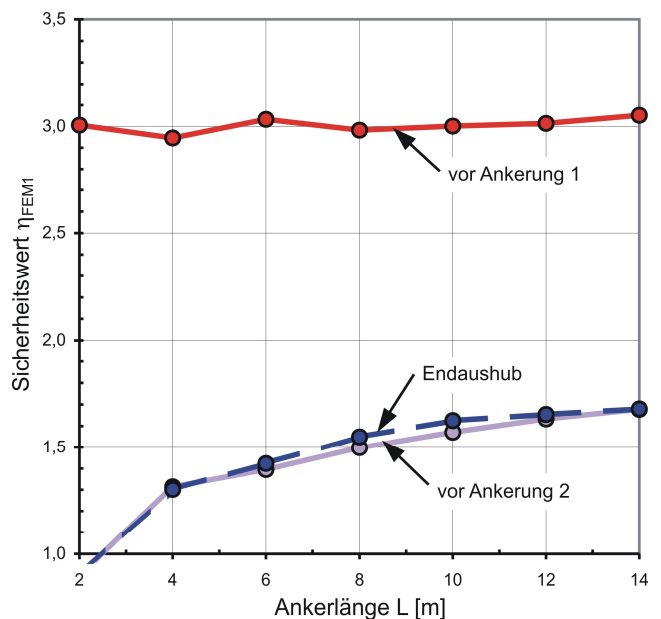


Bild 6: Mit der FEM berechnete Sicherheitswerte in Abhängigkeit von der Ankerlänge

Der Vergleich der zugehörigen, also mit der FEM ermittelten Versagensmechanismen in Bild 7 zeigt, dass bei kurzen Anker n:

- trotz verhinderter Wandkopfverschiebung die äußere Gestalt des Bruchkörpers derjenigen des zum unteren Anker gehörenden Versagensmechanismus „Tiefe Gleitfuge“ ähnelt
- die Verpresskörper innerhalb eines sich vorwiegend horizontal bewegendem, nahezu starren Bodenkörpers liegen, der durch die Anker ergriffen und in Richtung Verbauwand gezogen wird,

und dass bei langen Anker n:

- beide Verpresskörper außerhalb des sich bewegendem Versagensmechanismus liegen
- die Wand einem Geländebruch entsprechend um ihren Kopfpunkt rotiert und sich dabei auch ein Versagen des Erdwiderlagers abzeichnet

- der Versagensmechanismus dem von einfach ausgesteiften Baugruben (7) und weniger einem Gleitkreis ähnelt und zu erkennen ist, dass die genaue Lage der Verpresskörper praktisch keinen Einfluss mehr auf die Verbauwand hat.

Bei Anker mittlerer Länge ergibt sich ein Versagensmechanismus, der einen Übergang der beiden zuvor betrachteten darstellt.

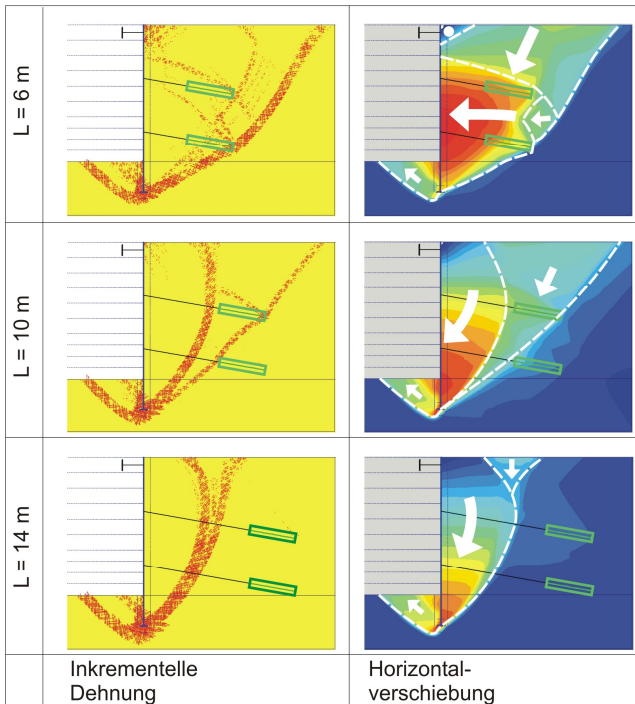


Bild 7: Maßgebliche Versagensmechanismen nach ϕ -c-Reduktion für den Endaushub

5.2 Variation der Steifigkeit des Deckels

Ein wichtiges Merkmal der vorgestellten Konstruktion ist die hohe Steifigkeit des Kopfauflegers der Verbauwand. Der im Beispiel zugrunde gelegte Deckel kann mit einer Länge von $b/2=5,0$ m und einer Dehnsteifigkeit von $EA = 2,9 \cdot 10^7$ kN je lfdm Wand als unnachgiebig bezeichnet werden. Da die Kopfauflegerung der Verbauwand beim Versagensmechanismus eine wichtige Rolle spielt, stellt sich die Frage, bei welcher Steifigkeit die starre Kopfauflegerung in ein nachgiebiges Kopfaufleger übergeht und damit der die Standsicherheit begünstigende Einfluss verloren geht.

Der zuvor modellierte, praktisch starre Deckel hat eine Federsteifigkeit von $c_{F0}=5,8 \cdot 10^7$ kN/m je lfdm Wand. Diese Federsteifigkeit wird nachfolgend variiert. Dazu wird den Berechnungen jeweils eine Federsteifigkeit c_F zugrunde gelegt, die gegenüber c_{F0} um einen Faktor s_{rel} nach Gleichung [2] abgemindert wird.

$$c_F = s_{rel} \cdot c_{F0} \dots\dots\dots [2]$$

Für das zuvor behandelte Beispiel gilt demnach $s_{rel} = 1,0$. Alle anderen Parameter des Beispiels bleiben unverändert. Der Einfluss, den die Steifigkeit des Kopfauflegers auf das System hat, wird exemplarisch für die Ankerlänge $L = 10$ m dargestellt.

Bild 8 zeigt, wie mit der Steifigkeit des Kopfauflegers die zugehörige Steifenkraft abnimmt und die maximale Wandverschiebung stark zunimmt. Die Ankerkräfte werden kaum beeinflusst. Auffällig ist, dass das maximale Biegemoment bei Unterschreitung einer gewissen Steifigkeit ($s_{rel} = 0,001$) rapide ansteigt. Dies liegt daran, dass die „weiche Stützung“ des Kopfes hier zu einem großen (negativen) Kragmoment führt. Bei einer „steifen Stützung“ tritt das maximale Biegemoment hingegen im Feld zwischen den Anker auf.

Bild 9 zeigt, dass – wie zu erwarten – die berechneten Sicherheitswerte bei geringerer Steifigkeit des Kopfauflegers abnehmen. Die Abnahme des Sicherheitswerts ist jedoch nur beim Zwischenzustand vor der Ankerung 1 infolge der Wandauskragung erheblich. Beim Zwischenzustand vor der Ankerung 2 und beim Endaushub fallen die Sicherheitswerte bei der hier untersuchten Ankerlänge nur vergleichsweise gering ab.

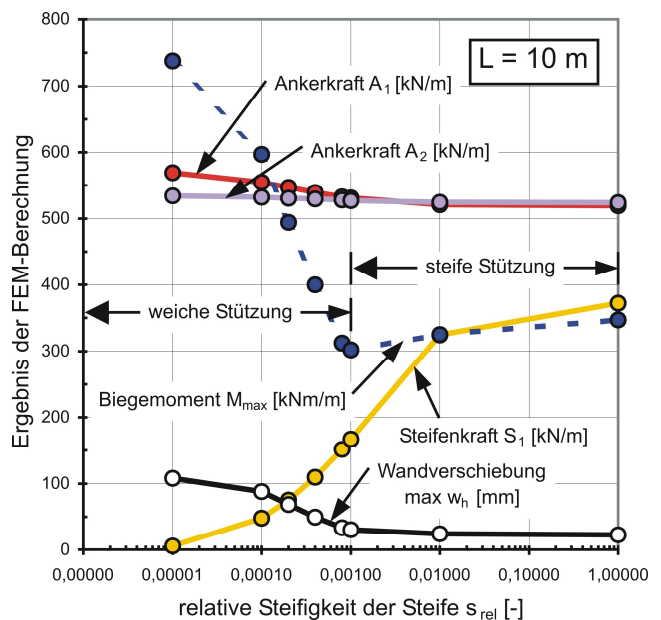


Bild 8: Ausgewählte Ergebnisse für den Endaushub in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Deckels

Der in Bild 7 ($L = 10$ m) dargestellte Versagensmechanismus bei der „steifen Stützung“ geht mit abnehmender Steifigkeit bei der „weichen Stützung“

zung“ in den bekannten und mit der FEM bereits belegten (1, 8) Versagensmechanismus zur „tiefen Gleitfuge“ über.

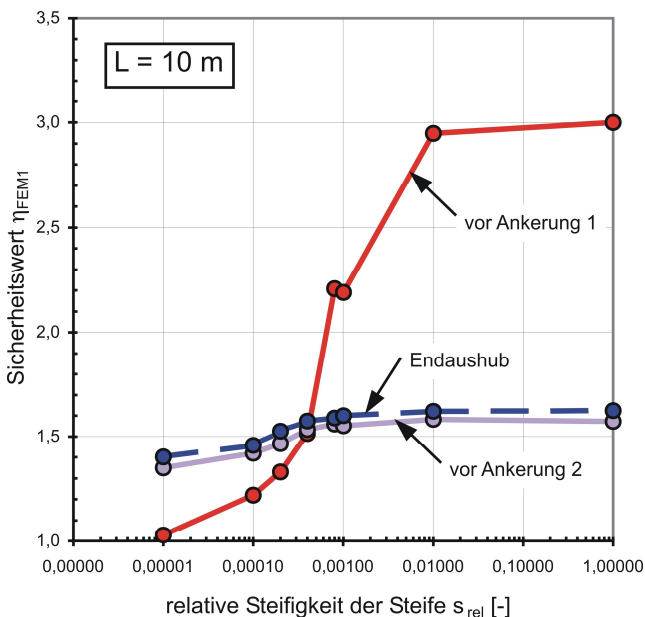


Bild 9: Mit der FEM berechnete Sicherheitswerte in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Deckels

6. Schlussfolgerungen

Der Nachweis einer ausreichenden Ankerlänge muss auch bei Verbauwänden geführt werden, die durch eine unnachgiebige Steife (z.B. Deckel) in Höhe der Geländeoberkante gehalten werden. Der zum klassischen Nachweis der „tiefen Gleitfuge“ gehörige Versagensmechanismus kann sich hier aufgrund des Kopfaufagers nicht einstellen.

Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) können auch für derartige Konstruktionen Sicherheitswerte berechnet und mit denjenigen von im Kopfbereich ungestützten Konstruktionen verglichen werden.

Bei dem untersuchten Beispiel ergab sich, dass auch vergleichsweise kurze Anker zu akzeptablen Sicherheitswerten führen können, wobei sich von der „tiefen Gleitfuge“ abweichende Versagensmechanismen einstellen. Allerdings wachsen mit kürzeren Ankern der Erddruck sowie die Querschnittsbeanspruchung und besonders die Verschiebung der Verbauwand deutlich an. Dies folgt aus der teilweisen Rückleitung der über die Verpresskörper in den Untergrund eingeleiteten Ankerkräfte auf die Verbauwand.

Wenn die Anker kürzer ausgeführt werden als gemäß klassischem Nachweis zur „tiefen Gleitfuge“ erforderlich, ist daher eine gesonderte Be-

rechnung der Querschnittsbeanspruchungen und der Wandverschiebungen erforderlich.

Die vorgestellte Nachweisführung kann auf ortsspezifische Randbedingungen flexibler eingehen als die klassische Erdstatik. So lassen sich mit dem vorgestellten Nachweisverfahren auf Basis der FEM Ankerlängen und damit der Verbrauch von Gelände einsparen, wenn auf der anderen Seite Kosten für die Verstärkung der Wandquerschnitte oder größere Wandverschiebungen in Kauf genommen werden.

7. Quellennachweis

1. Perau, E.: *Nachweis der erforderlichen Ankerlänge mit der Finite-Elemente-Methode*. Die Bautechnik, 84 (2007). S. 367-378
2. Kranz, E.: *Über die Verankerung von Spundwänden*. Mitteilungen aus dem Gebiete des Wasserbaues und der Baugrundforschung. Heft 11. Berlin (1953)
3. Ranke, A., Ostermayer, H.: *Beitrag zur Stabilitätsuntersuchung mehrfach verankerter Baugrubenumschließungen*. Die Bautechnik 45 (1968). S. 341-350
4. Schweiger, H.: *Application of FEM to ULS design (Eurocodes) in surface and near surface geotechnical structures*. G. Barla & M. Barla (eds.): Proc. 11th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Vol. 4, Bologna: Patron Editore, 2005, p. 419-430
5. Schanz, T.: *Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik. Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 4*. Geotechnik, 29 (2006), S. 13-27
6. Brinkgreve, R. B. J. & Bakker, H. L.: *Non-linear finite element analysis of safety-factors*. G. Beer et al. (eds.): Proc. 7th Int. Conf. Int. Assoc. f. Comp. Meth. a. Adv. in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1991, p. 1117-1122
7. Schweiger, H.: *Standsicherheitsnachweise für Böschungen und Baugruben mittels FE-Methode durch Abminderung der Scherfestigkeit*. Workshop Nachweise für Böschungen und Baugruben mit numerischen Methoden, Bauhaus-Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik Heft 11, Weimar 2003, S. 19-36.
8. Perau, E.: *Konzept und FE-Modellierung zum Nachweis der erforderlichen Ankerlänge*. Die Bautechnik, 85 (2008). S. 247-257