

Die Berechnung von Baugruben mit dem Bettungsmodulverfahren nach EB 102

Anwendungshinweise, Fallbeispiele, Vergleich mit Mess- und FE-Ergebnissen

(Veröffentlichung in der Bautechnik 88 (2011), Heft 10, S. 694 bis 706)

Thomas Brand (Ed. Züblin AG – Zentrale Technik, Berlin)
David Bastian (Ed. Züblin AG – Zentrale Technik, Berlin)
Stephan Hillmann (Specht, Kalleja + Partner GmbH, Berlin)

Mit der 4. Auflage der EAB im Jahr 2006 wurden in der Empfehlung EB 102 drei Verfahren zur Bestimmung des Bettungsmoduls für die Berechnung von Verbauwänden vorgeschlagen. Zur Überprüfung der in der EB 102 empfohlenen Berechnungsverfahren wurden von der Ed. Züblin AG, Zentrale Technik Berlin, umfangreiche Vergleichsrechnungen durchgeführt und die Ergebnisse dem Arbeitskreis Baugruben der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) vorgestellt. Da die Ergebnisse der drei Verfahren stark voneinander abwichen und nicht mit Mess- und FE-Ergebnissen zahlreicher Baugruben übereinstimmen, hat der Arbeitskreis Baugruben der DGGT die EB 102 inzwischen überarbeitet und veröffentlicht. In dem nachfolgenden Beitrag wird nun die Anwendung des Bettungsmodulverfahrens nach „neuer“ EB 102 praxisnah erläutert. Es werden die Berechnungsergebnisse ausgeführter Baugruben, mit FE- und Messergebnissen verglichen. Hierbei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, so dass das Bettungsmodulverfahren nach „neuer“ EB 102 jetzt für die Bemessung von Baugrubenkonstruktionen eingesetzt werden kann.

The design of construction pits using the subgrade reaction method according to the recommendations of EB 102 - advice of applications, case studies, comparison with measurements and results of FE - calculations. The 4. edition of the EAB (recommendation of the working group forexcavation) of 2006 offered three methods to determine the subgrade modulus for the calculation of retaining walls. In order to verify the recommended methods given in EB 102 numerous comparative calculations were undertaken by the Technical Head Office of Ed. Züblin AG. The results of the calculations based on the three methods were presented to the working group for excavation of the German Society for Geotechnical Engineering. They varied considerably and did not match with those of FE-calculation and with measurements on numerous excavation constructions. As a consequence the working group for excavation has revised the recommendations completely and published it recently. The following article explains the application of the subgrade reaction method according to the "new" EB 102 for practical use. The results obtained by the subgrade reaction method correspond very well with FE-simulation and measurements on executed construction pits. As a conclusion the revised

recommendation EB 102 can now be used for the design of retaining walls.

1. Einleitung

Zur Berechnung von Baugrubenwänden sowie zur Abschätzung der Verbauwandverformungen hat sich das Bettungsmodulverfahren (BMV) als praxisnahes Verfahren bewährt. Der Bettungsmodul wurde dabei in der Vergangenheit meistens vom Tragwerksplaner als Erfahrungswert festgelegt oder vom Baugrundgutachter vorgegeben. Im Berliner Raum wurden für einen dicht gelagerten Sand Bettungsmodule von 10 bis 30 MN/m³ und mehr verwendet. In vielen Fällen ließen sich die auf dieser Grundlage ermittelten Wandverformungen mit Messwerten bestätigen bzw. lagen auf der sicheren Seite.

Diese Ansätze wurden von *Gollup* und *Weissenbach* in [1] in Frage gestellt. In der Folge wurden von *Besler* [2], *Bartl* [3], *Hettler* et al [3, 4] und anderen Autoren Untersuchungen zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Wand-Bodenreaktion im Erdwiderstandsbereich von Verbauwänden angestellt. Auf Grundlage der Arbeit von *Besler* [2] wurde die Empfehlung EB 102 des Arbeitskreises „Baugruben“ der DGGT zur Anwendung des Bettungsmodulverfahrens zunächst von *Weissenbach* in [6] vorgestellt und schließlich mit kleinen Änderungen in der 4. Auflage der EAB im Jahr 2006 [7] veröffentlicht. Die Empfehlung enthält drei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Bettungsmoduls.

Die in der Praxis nach EB 102 ermittelbaren Bettungsmodule erreichten die zuvor verwendeten Erfahrungswerte nicht. Ferner führten die drei vorgeschlagenen Verfahren zu stark differierenden Ergebnissen. Insbesondere die Ergebnisse des "Mobilisierungsverfahrens", welches laut Empfehlung die "zuverlässigsten" Ergebnisse liefern sollte, stimmten nicht annähernd mit den Ergebnissen der Finite Element Methode (FEM) und den Messungen überein.

Um die Gründe für die großen Abweichungen festzustellen und wieder Planungssicherheit bei der Anwendung des Bettungsmodulverfahrens zu erhalten, wurden von der Zentrale Technik der Ed. Züblin AG, Berlin seit 2008 systematische Vergleichsrechnungen durchgeführt

[9] bis [12]. Hierbei konnte auf eine große Anzahl von Baugrubenberechnungen aus den letzten 15 Jahren zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen wurden dem Arbeitskreis Baugruben übergeben und teilweise bereits in Form von Vorträgen und Veröffentlichungen der Fachwelt vorgestellt [13] bis [15].

Nach mehrjähriger ausgiebiger Diskussion und Bewertung der Berechnungsergebnisse hat der Arbeitskreis Baugruben der DGGT die EB 102 jetzt komplett überarbeitet. Das Mobilisierungsverfahren in bisheriger Form ist entfallen, es wurden neue Tabellenwerte festgelegt (Abschnitt 2.3) und das Verfahren auf Grundlage des Steifemoduls wurde konkretisiert (Abschnitt 2.4). Mit diesen Änderungen konnte, wie unter anderem der Praxistest an 9 Baugruben [12], [16] zeigte, eine gute Übereinstimmung zwischen den Verfahren untereinander aber auch mit den FE- und Messergebnissen erreicht werden.

Diese überarbeitete Fassung der EB 102 wurde inzwischen als Entwurf in der Bautechnik veröffentlicht [17]. In dem folgenden Beitrag wird nun die Anwendung der überarbeiteten EB 102 und die Ergebnisse eines Teil der zahlreichen Untersuchungen der Fachwelt vorgestellt.

2 Anwendungshinweise

2.1 Allgemeines zum Einsatz des Bettungsmodulverfahren nach EB 102 (neu)

Die EB 102 (neu) [17] beinhaltet gegenüber der EB 102 (2006) keine prinzipiellen Änderungen zur Anwendung des BMV. Die wesentlichen Anpassungen betreffen die Bestimmung des Bettungsmoduls. Zur besseren Unterscheidung werden diese im Folgenden mit EB 102 (neu) gekennzeichnet.

Das BMV kann entsprechend Absatz 1 der EB 102 zum Nachweis der Einbindetiefe, bei der Ermittlung der Schnittgrößen und auch beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit angewendet werden. Für eine genaue Verformungsprognose, wenn z.B. das Gesamtverhalten der Verbauwand und des angrenzenden Bodenkörpers zu untersuchen sind, sind andere Verfahren, zum Beispiel die FEM nach EB 103 [7], besser geeignet. Um in der täglichen Praxis mit vertretbarem Aufwand die Bemessung von Verbaukonstruktion durchführen zu können ist das BMV ein wichtiges Hilfsmittel, das auch in vielen Verbauprogrammen bereits enthalten ist.

Die Anwendung des BMV bei der Verbauwandberechnung bietet die Möglichkeit einer „wirklichkeitsnäheren“ Schnittgrößenermittlung als es z.B. bei Annahme einer punktförmigen Stützung im Boden möglich ist. Insbesondere gilt dies für mehrfach gestützte Systeme. Hier ist eine realistische Bestimmung des Bettungsmoduls entscheidend. Eine exemplarische Untersuchung mit unteren und oberen Grenzwerten sowie der Abgleich mit einer FEM – Berechnung können im Einzelfall sinnvoll sein.

Basierend auf dem in EB 102 (2006) beschriebenen „Mobilisierungsverfahren“ wird in EB 102 (neu) zunächst der erdstatische Hintergrund der Ermittlung des BMV dargestellt. Danach wird angenommen, dass nach dem Aushub der ursprüngliche, von der Geländeoberkante aus wirkende, Erdruchdruck unterhalb der Baugrubensohle erhalten bleibt. Dieser Vorbelastungs-Erddruck wird $E_{og,k}$ genannt und direkt unterhalb der Aushubsohle durch den Erdwiderstand begrenzt. Die über $E_{og,k}$ hinausgehende Bodenreaktion $B_{h,k}$ darf nach EB 102 (neu) Absatz 3 als bettungswirksame Spannung angesetzt werden. Der Wert wird durch die maximale Erdwiderstandsspannung abzüglich der Vorbelastungsspannungen $e_{og,k}$ begrenzt (siehe Bild 1).

Der Bettungsmodul $k_{sh,k}$ definiert sich als Sekantenmodul über die Bodenreaktion $B_{h,k}$, die den Erdruchdruck $e_{og,k}$ übersteigt und die örtliche Verschiebung s_h (Bild 2):

$$k_{sh,k} = B_{h,k} / s_h \quad (1)$$

Er wirkt über die von der Bettung erfasste Einbindelänge t_B gemäß Lastbild EB102-1 (Bild. 1).

Sofern das Verbauprogramm keinen Abzug der Vorbelastung $E_{og,k}$ ermöglicht oder zur Vereinfachung, kann bei der Ermittlung der Bettungsmoduls die Ausgangsspannung $e_{og,k}$ mit berücksichtigt werden.

$$k_{sh,k}^* = (B_{h,k} + e_{og,k}) / s_h \quad (2)$$

Das Verhältnis zwischen $k_{sh,k}$ und $k_{sh,k}^*$ hängt maßgeblich von der Größe der Vorbelastung $E_{og,k}$ ab und kann erfahrungsgemäß etwa mit dem Faktor 1,7 angenommen werden. Dieser Faktor ist auch beim Vergleich mit früheren Bauvorhaben, bei welchen der Abzug des Erdruchdrucks $E_{og,k}$ nicht vorgenommen wurde, zu berücksichtigen.

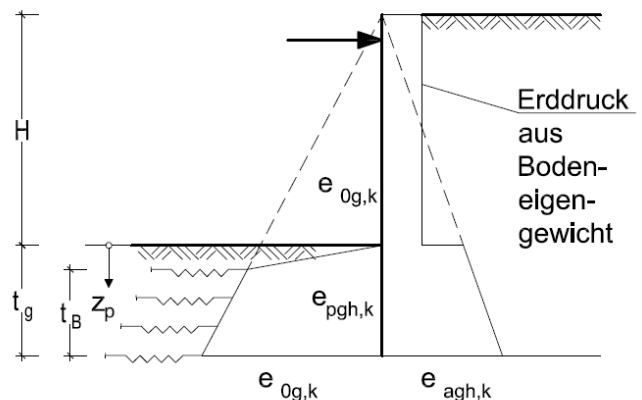


Bild 1: Vereinfachtes Lastbild für elastische Bettung bei nicht bindigen Böden in Anlehnung an Bild EB 102-1.

Fig. 1: Simplified load figure according to Fig. EB 102-1

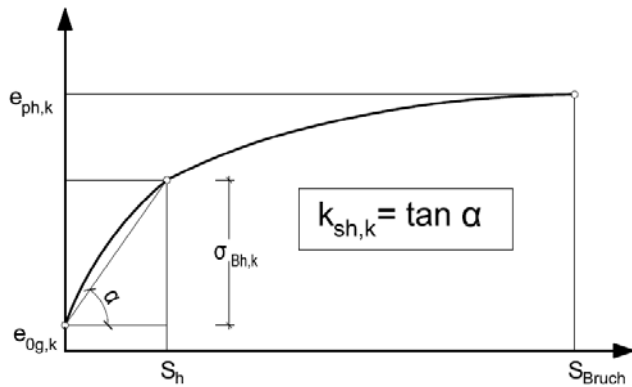


Bild 2: Ermittlung des Bettungsmoduls entsprechend Bild EB 102-2 [17]

Fig. 2: Determination of the subgrade modulus according to EB 102-2 [17]

Diese Ausführungen in der Empfehlung dienen im Wesentlichen zur Erläuterung der Last-Wege- Beziehung, auf der der Bettungsmodul basiert. Mit einer geeigneten Mobilisierungskurve kann der Bettungsmodul wie beschrieben ermittelt werden (Abs. 6. der EB 102 (neu)). Nach EB 102 (neu) Abs. 4 und 5. erfolgt die Ermittlung des Bettungsmoduls nunmehr aber vorzugsweise entweder mit dem sog. Tabellenverfahren (Abschnitt 2.3) oder dem Es-Verfahren (Abschnitt 2.4). Bei diesen beiden Verfahren wird der Bettungsmodul in Abhängigkeit der Bodenart und der Lagerungsdichte bzw. Konsistenz und der Bodensteifigkeit entweder schichtweise konstant oder mit der Tiefe zunehmend angesetzt.

2.2 Berechnungsgrundlagen

Die nachfolgend gezeigten Vergleichsberechnungen mit dem Bettungsmodulverfahren erfolgten mit dem Programm DC Baugrube der DC-Software GmbH. In der verwendeten Programmversion 3.99 ist das Berechnungsverfahren nach EB 102 mit Berücksichtigung der Vorbelastung bereits implementiert.

Die Bodenkennwerte wurden unverändert (ohne eine mögliche Erhöhung auf charakteristische Werte) den Baugrundgutachten entnommen. Die Größe des Erddrucks (aktiv oder erhöht aktiv) und die Erddruckverteilung wurden entsprechend der Ausführungsstatik auf Grundlage der Vorgaben aus den Baugrundgutachten und der EAB (2006) angesetzt.

Sämtliche Berechnungen wurden entsprechend Bild EB 102-1 und EB 70 mit einer Erddruckumlagerung bis zur Baugrubensohle und vorgelagertem Erdwiderstand durchgeführt. Die Berechnungen wurden, zum Abgleich mit FEM- und Messergebnissen im Sinne einer Gebrauchstauglichkeitsberechnung ausschließlich mit charakteristischen Belastungen und Widerständen durchgeführt.

Für die Stahlbetonschlitzwände wurde sowohl bei der Berechnung mit dem BMV als auch mit der FEM einheitlich die volle Biegesteifigkeit (Zustand I) angesetzt.

2.3 Hinweise zum Tabellenverfahren

Nach EB 102 (neu) Absatz 5 können Anhaltswerte für den Bettungsmodul $k_{sh,k}$ der Tabelle EB 102-1 (Tabelle 1) entnommen werden.

Gegenüber den in EB 102 (2006) angegebenen Werten wurden diese erhöht und sind jetzt einheitlich für einen Ausnutzungsgrad des Erdwiderstands $a \approx 1$ in der Bemessungssituation BS-T angegeben. Bei geringeren Mobilisierungsgraden ($a < 1$) liegen die Werte also auf der sicheren Seite. Für Grenzbetrachtungen und zur Berücksichtigung regionaler Erfahrungen werden untere und obere Grenzwerte angegeben. Über Wasser dürfen die Werte verdoppelt werden.

Lagerungsdichte	locker	mitteldicht	dicht	sehr dicht
Bettungsmodul	1 – 4 MN/m ³	3 – 10 MN/m ³	8 – 15 MN/m ³	12 – 20 MN/m ³

Tabelle 1: Spannweite des Bettungsmoduls für nicht bindige Böden in Abhängigkeit der Lagerungsdichte unter Wasser gemäß Tabelle EB 102-1 [17]

Table 1: Span of subgrade modulus for non cohesive soils dependent on to the compactness of the soil under water

2.4 Hinweise zum Es-Verfahren

Nach EB 102 (neu) Absatz 4 kann der Bettungsmodul $k_{sh,k}$ „näherungsweise“ aus dem horizontalen Steifemodul E_{sh} abgeleitet werden. Für im Einbindebereich durchlaufende Wände gilt der Ansatz:

$$k_{sh,k} = E_{sh} / t_b \quad (3)$$

mit: E_{sh} = horizontaler Steifemodul = $0,5 \dots 1,0 \cdot E_{sv}$
 E_{sv} = vertikaler Steifemodul
 t_b = die von der Bettung erfasste Einbindelänge (ab Schnittpunkt $e_{0g,k}$ mit $e_{phg,k}$, siehe Bild 1)

Bei Verbauwänden, deren Wandeinbindung länger ist als statisch erforderlich (zum Beispiel bei Trogbaugruben mit tiefliegender Dichtsohle), darf die von der Bettung erfasste Tiefe t_b näherungsweise aus der statisch erforderlichen Einbindelänge t_{stat} ermittelt werden. Diese kann vorab durch einen separaten Rechenlauf zum Beispiel mit freier Auflagerung für jeden einzelnen Aushubzustand ermittelt werden.

Der Steifemodul wurde bei den Vergleichsrechnungen entweder nach Angaben im Baugrundgutachten schichtweise konstant oder mit folgendem Ansatz von Richter [18] mit der Tiefe zunehmend angesetzt.

$$E_s = E_0 \sqrt{z} \quad (4)$$

mit: E_0 = Steifekennwert
abhängig von der Bodenart
 z = Tiefe unter der Geländeoberkante

2.5 Hinweise zur Verwendung der FEM bei den Fallbeispielen

Die FE-Berechnungen wurden mit dem Programm Plaxis 2D entsprechend den Empfehlungen der EB 103 [7] des Arbeitskreises Baugruben und des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ [19] ausgeführt.

Als Stoffgesetz wurde das Hardening-Soil-Bodenmodell verwendet. Die Bodenkennwerte wurden den Baugrundgutachten entnommen. Entsprechend Baugrundgutachten wurde der Steifemodul tiefenabhängig an der Oberkante der jeweiligen Schicht ermittelt und als Referenzmodul für $E_{oed} = E_{50}$ (Erstbelastung) angesetzt. Für die Wiederbelastung wurde gemäß Baugrundgutachten der 3-fache Wert angesetzt.

Es wurde jeweils ein ausreichend großer Berechnungsausschnitt gewählt. Auf der Baugrubenseite wird der Ausschnitt von der Symmetrieachse der Baugrube begrenzt, unterhalb der Baugrubensohle wurde die 2-fache Aushubtiefe berücksichtigt.

Die Schlitzwände und Bauwerke wurden als linear-elastische Volumenelemente modelliert. Die Steifigkeiten wurden entsprechend der Stabstatik angesetzt. Zur Modellierung der Boden-Bauwerk-Interaktion wurden Kontaktelemente eingefügt. Hierbei wurden Wandreibungswinkel gemäß EAB von $\frac{1}{2}$ für die Schlitzwand berücksichtigt. Für die Elementierung wurden 6-Knoten-Dreieckselemente verwendet. Die Netzfeinheit wurde der Belastungssituation angepasst, indem das Netz im Umfeld der Baugrubenwand nochmals verfeinert wurde.

Der Primärspannungszustand wurde entsprechend der Belastungsgeschichte des Bodens erfasst. Ferner wurden die charakteristischen Bauphasen inkl. Grundwasserständen als einzelne Aushubschritte berücksichtigt. Die Aussteifungen bzw. Anker wurden unmittelbar nach deren Einbau mit einer wirklichkeitsnahen Vorspannkraft „kraftschlüssig“ angeschlossen.

2.6 Hinweise zur Berücksichtigung von herstell- und bauablaufbedingten Verformungen

Die Berechnung der Wandverformungen mit dem BMV aber auch mit der FEM wie zuvor beschrieben berücksichtigen keine herstell- und bauablaufbedingten Verformungen.

Diese können jedoch, wie die Fallbeispiele sowie zahlreiche Erfahrungsberichte belegen, die rechnerischen Verformungen deutlich überschreiten. Herstellbedingte Verformungen können beispielsweise durch das Einrütteln von RV-Pfählen [20], [24] oder Injektionslanzen [21], die Herstellung einer tiefliegenden Düsenstrahlsohle [22], [23] oder von Austauschbohrungen [15] im

Einbindebereich von Verbauwänden und vielen anderen Herstellvorgängen entstehen.

Darüber hinaus spielt der Bauablauf und der Zeitpunkt des Einbaus der Baugrubenabstützung eine große Rolle. Werden beispielsweise die Verpressanker erst nach der Grundwasserabsenkung oder nach Abbrucharbeiten innerhalb der Baugrube hergestellt, können sich größere Verbauwandverformungen ergeben. Diese können meist nur teilweise durch die Vorspannung der Anker oder Steifen rückgängig gemacht werden.

Diese herstell- und bauablaufbedingten Verformungen müssen im Einzelfall bei der Bemessung der Baugrubenkonstruktion und der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden. Hierzu bedarf es viel Erfahrung.

3. Fallbeispiele

3.1 Übersicht

Um die EB 102 (neu) zu überprüfen, wurden durch die Ed. Züblin AG, Zentrale Technik Berlin, neun Trogbaugruben untersucht. Hierbei wurden Baugruben mit rückverankerter Unterwasserbetonsohle (3 Stück), mit tiefliegender HDI-Sohle (2 Stück) und tiefliegender Weichgel- bzw. GDT-Sohle (3 Stück) sowie eine Baugrube mit Einbindung der Schlitzwände in den natürlichen Stauer herangezogen. Die Baugruben waren ca. 10 bis 34 m tief und 1- bis 5-fach verankert bzw. ausgesteift.

Im folgenden Beitrag werden die Untersuchungsergebnisse von 4 Baugruben vorgestellt:

- (1) Baugrube U4, Los 3, Hamburg, Querschnitt VS 3
- (2) Baugrube U4, Los 3, Hamburg, Querschnitt VS 1
- (3) Baugrube ALEXA, Berlin, Querschnitt MQ 7
- (4) Baugrube Sony, Berlin, Querschnitt MQ1

Bei allen beschriebenen Baugrubenkonstruktionen erfolgte nicht nur die Ausführungsplanung sondern auch die Baustellenbetreuung und die messtechnische Überwachung durch die Ed. Züblin AG, Zentrale Technik Berlin. Dies hatte den Vorteil, dass sämtliche maßgebenden Informationen zum Bauablauf, zu Messzeitpunkten, zu herstellbedingten Verformungen u. a. erfasst wurden und bei der Bewertung der Berechnungs- und Messergebnisse einfließen konnten. Ohne diese Detailkenntnisse ist eine zutreffende Interpretation von Messergebnissen schwierig, wenn nicht unmöglich.

3.2 Fallbeispiel 1: Baugrube U4, Los 3, Querschnitt VS 3

Bei dem Fallbeispiel U4 Hafencity Hamburg, Los 3, Querschnitt VS3 (Bild 3 und 4) handelt es sich um eine ca. 17,5m breite Trogbaugrube mit einer Unterwasserbetonsole. Die Baugrubenwände wurden durch eine ca. 25 m tiefe und 1,20 m dicke Stahlbetonschlitzwand gebildet. Die Baugrubensohle befand sich 18,15 m unter der Geländeoberkante. Die Stützung der Schlitzwand erfolgte durch Stahlbetongurte und -steifen. Diese wurden oberhalb des Grundwasserspiegels angeordnet. Die Rückverankerung der Unterwasserbetonsole erfolgte mit bis zu 28 m langen Kleinverpresspfählen. Zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes wurde ein Steckträger mit einer wasserdichten Ausfachung vorgesehen. Der Baugrubenquerschnitt mit Angabe der Bodenverhältnisse ist in Bild 5 dargestellt. In der Tabelle 2 sind die zugehörigen Bodenkennwerten aufgeführt.

Für die Vergleichsberechnungen wurde entsprechend den gemessenen Pegelständen ein mittlerer Wasserstand von +1,0 mNN angesetzt, um hierdurch einen direkten Vergleich mit den Messergebnissen zu ermöglichen. Bei den Vergleichsrechnungen wurde, wie in der Ausführungsstatik, ein erhöht aktiver Erddruck von 50% E_o + 50% E_a entsprechend den Vorgaben des Baugrundgutachtens angesetzt. Aufgrund der kopfnahen Aussteifung wurde eine rechteckige Erddruckverteilung entsprechend EB 70 angenommen.

Als Verkehrslast wurde eine unendlich ausgedehnte Flächenlast von 5 kN/m², anstelle der in der Ausführungsstatik verwendeten großflächigen Verkehrslast von 10 kN/m² und der Randlast von 40 kN/m² infolge Baugeräten, angesetzt.

Bei den Vergleichsberechnungen mit dem BMV gemäß EB 102 (neu) und der FEM wurde allein der Bauzustand nach dem Unterwasseraushub betrachtet. In diesem Bauzustand wirkt nur der Erddruck auf die Verbauwand. Bild 4 zeigt die ausgesteifte Schlitzwandbaugrube während dieser Bauphase.

Der Zwischenaushubzustand bis zum Einbau der Steifen wurde vernachlässigt, da die Verformung aufgrund der steifen Schlitzwand gering ist. Dies bestätigen auch die FE- und Messergebnisse.

Der Bettungsmodul wird mit den 2 vorgeschlagenen Verfahren nach EB 102 (neu) bestimmt.

Gemäß Tabelle 1 ergibt sich der Bettungsmodul für einen dicht gelagerten Sand zu $k_{sh,k} = 15 \text{ MN/m}^3$.

Der Steifemodul $E_{s,v}$ wurde entsprechend Baugrundgutachten schichtweise konstant angesetzt (siehe Tab. 2). Die Einbindelänge t_b beträgt 6,28 m. Auf eine Berechnung der statisch erforderlichen Einbindelänge t_{stat} mit charakteristischen Belastungen und Widerständen wurde verzichtet, da der Unterschied hier klein ist. Als Faktor E_{sh} / E_{sv} wurde der Mittelwert 0,75 verwendet.

Mit den oben genannten Werten ergibt sich der Bettungsmodul mit dem Es-Verfahren zu $k_{sh,k} = 0,75 \cdot 70 / 6,28 \sim 8 \text{ MN/m}^3$.

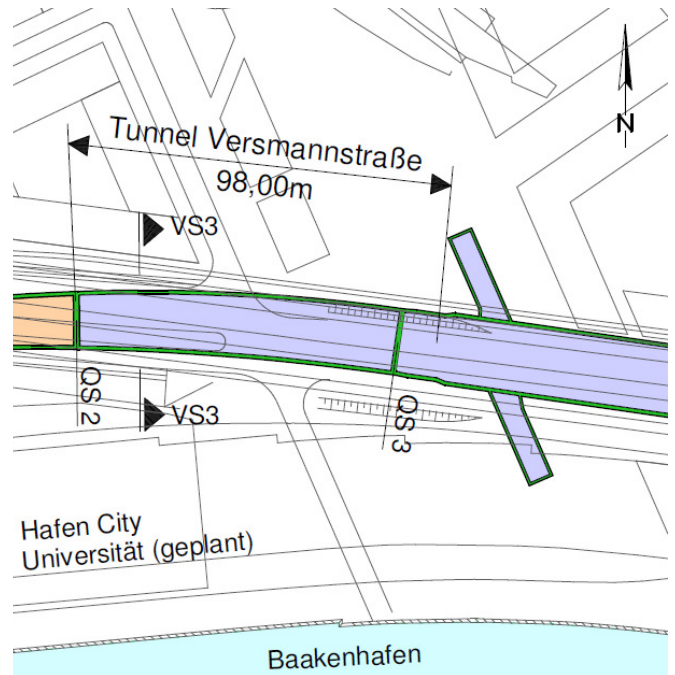


Bild 3: Grundriss Baugrube U4-VS3

Fig. 3: Layout construction pit, construction pit U4-VS3



Bild 4: Baugrube U4-VS3 in Phase Unterwasseraushub

Fig. 4: Construction pit U4 - VS3 in phase underwater excavation

Boden-schicht	γ / γ'	φ' / c'	E_{sv}
	kN/m ³	° / kN/m ²	MN/m ²
Auffüllung	18 / 10	30,0 / 0	30
Klei	13 / 3	15 / 0	1
Sand dicht gelagert	19 / 11	37,5 / 0	70

Tabelle 2: Bodenkennwerte Baugrube U4 - VS3

Table 2: Soil parameters construction pit U4 - VS3

In Bild 5 werden die mittels BMV und FEM ermittelten Verformungen w_{max} für den Bauzustand Unterwasseraushub dargestellt und mit den gemessenen Verbauwandverformungen verglichen.

In Tabelle 3 sind die wesentlichen Berechnungs- und Messergebnisse zusammengefasst.

Berechnung / Messung	(1) Tab.- Verf.	(2) Es- Verf.	(3) FEM	(4) Mes- sung
$k_{sh,k}$ [MN/m ³]	15	8	-	-
max w [mm]	16	18	21	18
max A _k [kN/m]	540	555	528	-

Table 3: Summary of results of comparative calculations construction pit U4 - VS3 during the phase of underwater excavation

Für die Standsicherheitsberechnungen liegen die Annahmen der Stabstatik jedoch auf der sicheren Seite, da die Bauzustände Lenzen bzw. Hochwasser bemessungsmaßgebend waren.

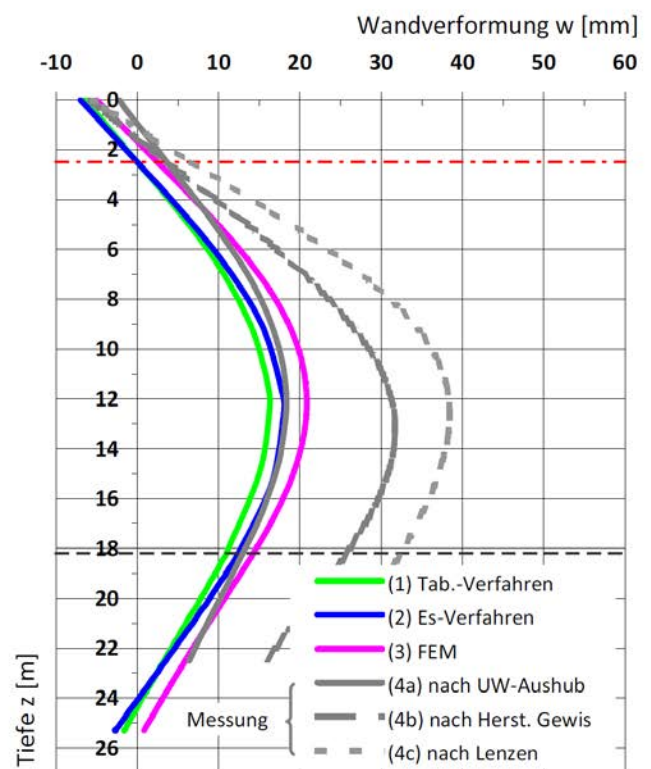
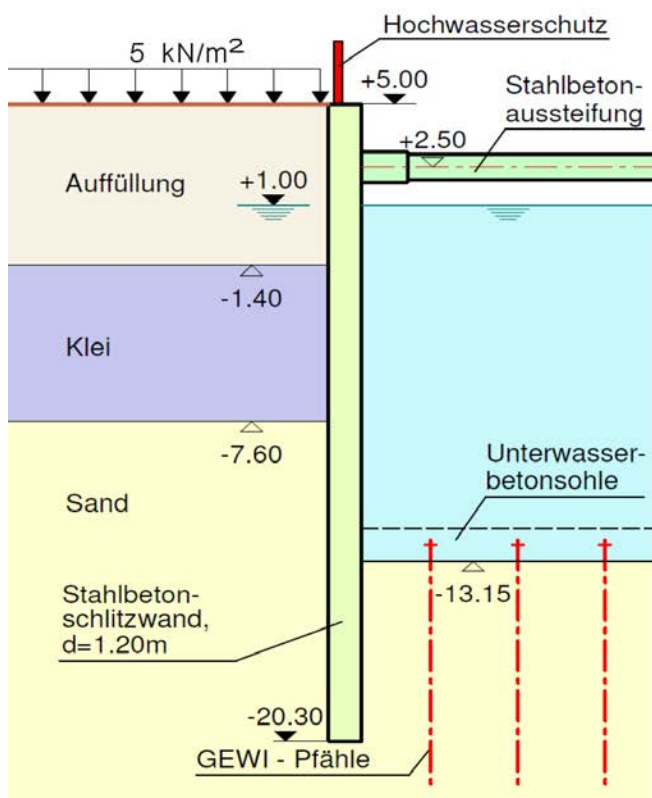


Fig. 5: Section and deformations in phase “underwater excavation” of construction pit U4 -VS3

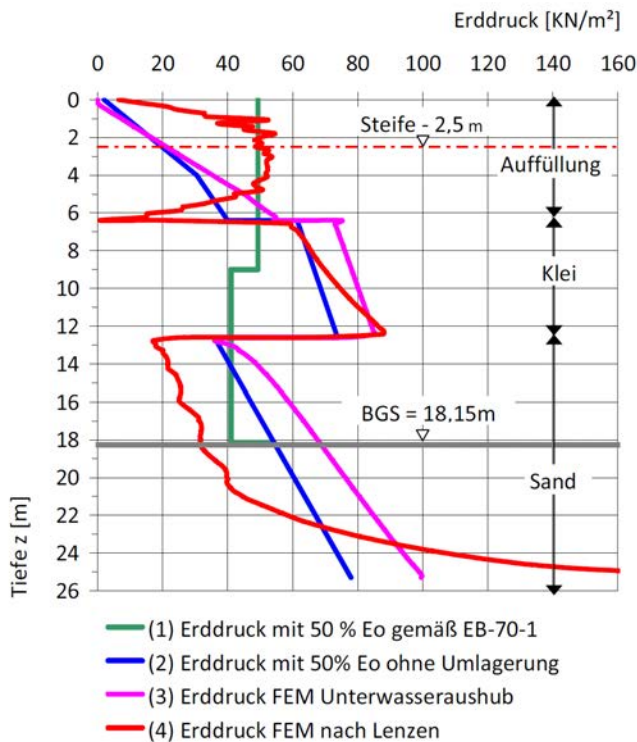


Bild 6: Erddruckverteilung Baugrube U4 - VS3
Fig. 6: Distribution of Earth pressure construction pit U4 - VS3

3.3 Fallbeispiel 2: Baugrube U4, Los 3, Hamburg, Querschnitt VS 1

Im Fallbeispiel U4 Hafencity Hamburg Los 3, Querschnitt VS1 (Bild 7) handelt es sich um eine nur knapp 10 m breite Trogbaugrube, mit ca. 45 m langen und 1,20 m dicken Stahlbetonschlitzwänden, welche in den undurchlässigen Geschiebemergel einbinden. Die Baugrubensohle befindet sich 21 m unter der Geländeoberkante. Die Schlitzwand wurde 3-fach ausgesteift. Die erste und zweite Steifen- und Gurtlage wurde aus Stahlbeton hergestellt. Die Aussteifung in der dritten

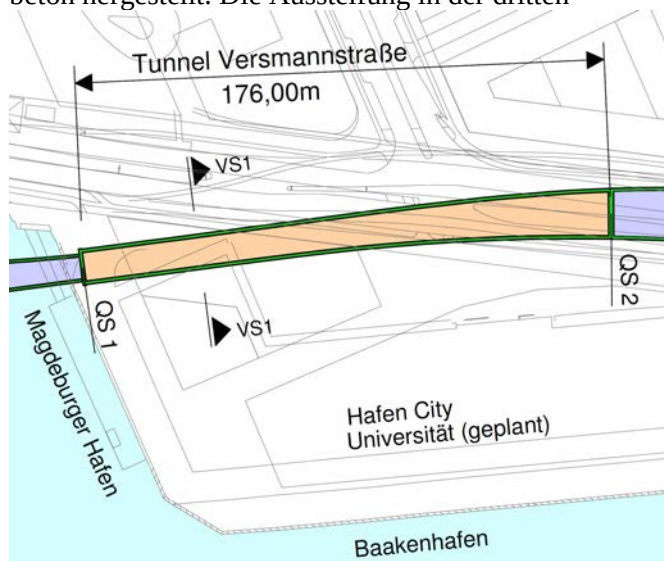


Bild 7: Grundriss Baugrube, U4 - VS1
Fig. 7: Layout construction pit, U4 - VS1



Bild 8: Baugrube U4-VS1 in Phase Zwischenaushub zum Einbau der 3. Steifenlage
Fig. 8: Construction pit U4-VS1 during the installation of the 3. bracing

Lage erfolgte durch Stahlrohre. Bild 8 zeigt die Schlitzwandbaugrube während der Zwischenaushubphase zum Einbau der 3. Steifenlage. Ferner wurde wie beim Querschnitt VS3 ein Hochwasserschutz vorgesehen. Der Baugrubenquerschnitt mit Angabe der Bodenverhältnisse ist in Bild 10 dargestellt. In der Tabelle 4 sind die zugehörigen Bodenkennwerte aufgeführt. Bei den Vergleichsrechnungen wurde, wie in der Ausführungsstatik, ein erhöht aktiver Erddruck von 50% Eo + 50% Ea und eine klassische Erddruckverteilung angesetzt. Der Ansatz wurde in diesem Querschnitt durch die FE-Berechnung bestätigt.

Bodenschicht	γ / γ'	ϕ' / c'	E_{sv}
	kN/m ³	° / kN/m ²	MN/m ²
Auffüllung	18 / 10	30,0 / 0	30
Klei	13 / 3	15 / 0	1
Sand mitteldicht (von -7 bis -9 mNN)	18 / 10	35 / 0	70
Sand dicht bis sehr dicht (tiefer -9mNN)	19 / 11	37,5 / 0	100
Geschiebemergel steif bis halbfest	22/12	30 / 15	100

Tabelle 4: Bodenkennwerte Baugrube U4- VS1
Table 4: Soil parameters construction pit U4 VS1

Als Verkehrslast wurde wie beim Fallbeispiel 1 eine unendlich ausgedehnte Flächenlast von 5 kN/m² als wirksame Verkehrslast (Gebrauchstauglichkeitsberechnung) angesetzt.

Bei den Vergleichsberechnungen mittels Stabstatik und FEM wurden alle Zwischenaushubzustände bis zum Einbau der 3 Steifenlagen (A bis C) und der Endaushubzustand (D) berücksichtigt. Der Rückbauzustand wurde im Zuge der Vergleichsrechnung nicht weiter betrachtet.

Der Bettungsmodul wurde wieder mit den 2 Verfahren nach EB 102 (neu) bestimmt.

In Anlehnung an die Tabelle 1 gemäß EB 102 (neu) wurde der Bettungsmodul $k_{sh,k}$ für die Auffüllung wie für einen lockeren Sand mit 4 MN/m³ angesetzt. In der Kleischicht wurde der Bettungsmodul mit 1 MN/m³ und in den folgenden, mitteldicht bis dicht gelagerten Sanden sowie im Geschiebemergel einheitlich mit 15 MN/m³ berücksichtigt.

Beim Es Verfahren wurde der Bettungsmodul zum einem über die Einbindelänge t_b mit $k_{sh,k} = E_{sh} / t_b$ ermittelt (Fall a) und zum andern über die statisch erforderlichen Einbindelänge t_{stat} mit $k_{sh,k} = E_{sh} / t_{stat}$ (Fall b) ermittelt. Der vertikale Steifemodul wurde wie im Fallbeispiel 1 schichtweise konstant angesetzt. Der Faktor E_{sh} / E_{sv} wurde zu 0,75 gewählt.

Im Fall a nimmt die Einbindelänge t_b mit zunehmendem Aushub in den einzelnen Bauphasen von 45,15 m bis 25,65 m ab. Folglich ergeben sich aufgrund der sehr großen Einbindelänge t_b besonders in den ersten Aushubphasen rechnerisch sehr geringe Bettungsmodule. Aber auch in den folgenden Aushubphasen wurden sehr geringe Bettungsmodule ermittelt (siehe Tabelle 5).

Dagegen ergeben sich bei der Verwendung der statisch erforderlichen Einbindelänge im Fall b realistischere Bettungsmodule (siehe Tabelle 6).

Bauzustand	t_b	k_{sh} [MN/m ³]
A: Aushub bis 1. Steife	45,2	0,02 - 1,7
B: Aushub bis 2. Steife	35,5	1,5 - 2,1
C: Aushub bis 3. Steife	29,2	2,6
D: Endaushub	25,7	2,9

Tabelle 5: Ermittlung des Bettungsmoduls mit dem Es-Verfahren mit dem Ansatz $k_{sh,k} = E_{sh} / t_b$

Table 5: Coefficient of subgrade reaction using Es-method and $k_{sh,k} = E_{sh} / t_b$

Bauzustand	t_{stat}	$k_{sh,k}$ [MN/m ³]
A: Aushub bis 1. Steife	2,5	0,3 – 30
B: Aushub bis 2. Steife	5,4	10 – 14
C: Aushub bis 3. Steife	5,5	14
D: Endaushub	5,5	14

Tabelle. 6: Ermittlung des Bettungsmoduls mit dem Es-Verfahren mit dem Ansatz $k_{sh,k} = E_{sh} / t_{stat}$

Table 6: Coefficient of subgrade reaction using Es-method and $k_{sh,k} = E_{sh} / t_{stat}$

Mit diesem Ansatz konnte beim Es-Verfahren eine Annäherung an die Mess- und FE-Ergebnisse und das Tabellenverfahren erreicht werden (siehe Bild 9). Insbesondere in den Voraushubzuständen konnte eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden. Die gemessene Maximalverformung betrug 22 mm (4). Die mittels FE berechnete Maximalverformung ergab rund 21 mm (3). Mit dem Tabellenverfahren wurde eine Maximalverformung von 23 mm berechnet (1). Dies entspricht etwa der Verformung von 25 mm, welche mit dem Es-Verfahren Fall b ermittelt wurde (2b). Dagegen wurden mit dem Es-Verfahren im Fall a unrealistisch große Verbauwandverformung von 73 mm ermittelt (2a).

Berechnung / Messung	(1) Tab.- Verf.	(2a) Es-Verf. mit t_b	(2b) Es-Verf. mit t_{stat}	(3) FEM	(4) Messung
k_{sh} [MN/m ³]	1 - 15	0,02 - 2,9	0,3 - 30	-	
max w [mm]	23	73	25	21	22
Bauzustand / Steifenlage	Steifenkräfte A,K [kN/m]				
B / 1	440	537	444	541	443
C / 1	215	233	215	281	245
C / 2	1313	1387	1319	1453	1416
D / 1	221	245	221	302	231
D / 2	1073	1073	1075	1167	1133
D / 3	1120	1171	1121	1134	1095

Tabelle. 7: Zusammenfassung Ergebnisse Vergleichsrechnung Baugrube U4 - VS1_t

Table 7: Summary of results of comparative calculations of construction pit U4 - VS1

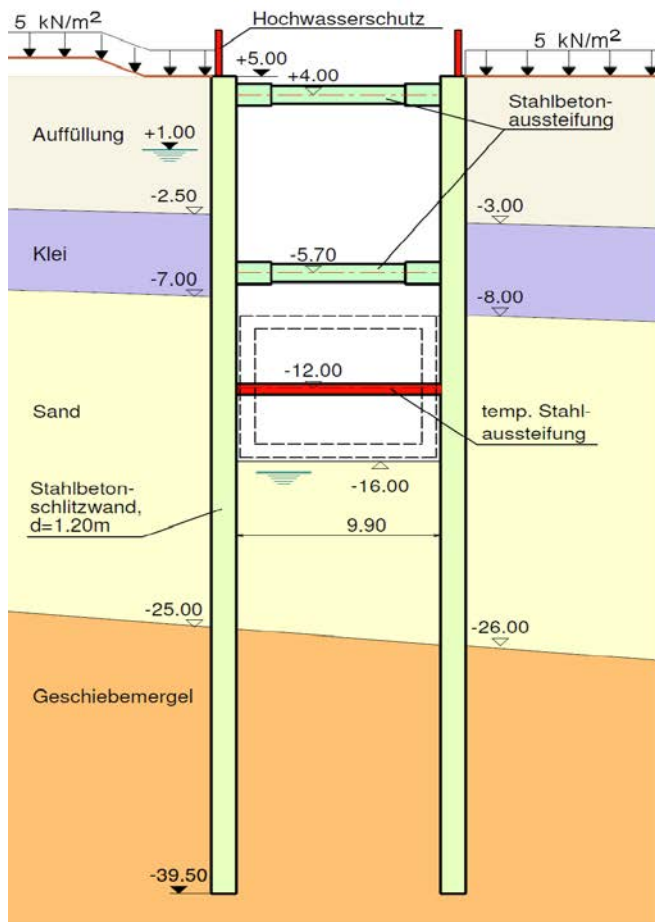


Bild. 9: Querschnitt und Wandverformungen im Bauzustand Endaushub Baugrube U4 -VS1

Fig. 9: Section and deformations in phase "final excavation" of construction pit U4-VS1

Eine Überprüfung der Berechnungsergebnisse konnte über die in diesem Messquerschnitt durchgeführten Steifenkraftmessungen erfolgen (siehe Bild 10). Die Summen der Steifenkräfte aus Tabelle 7, für den Aushubzustand C und D, bestätigen die Größenordnung der angenommenen Erddruckbelastung. Durch den Ansatz einer klassischen Erddruckverteilung entsprechend den Ergebnissen der FE-Berechnung konnte eine gute Annäherung an die gemessenen Steifenkräfte erreicht werden.

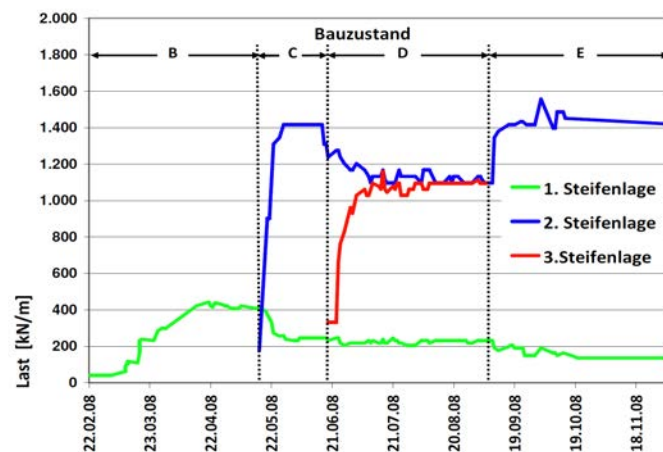
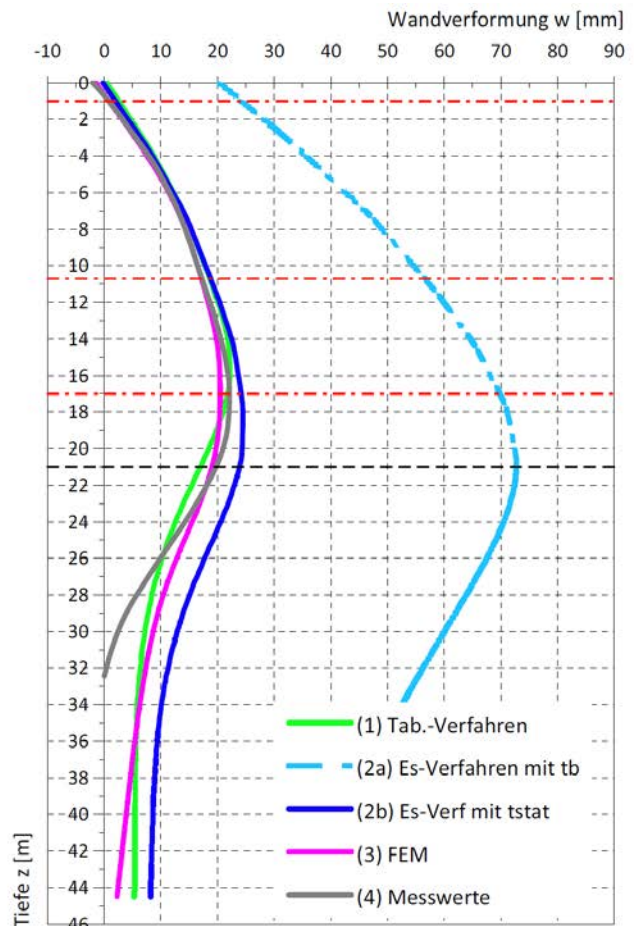


Bild. 10: Gemessene Steifenkräfte, Baugrube U4 -VS1

Fig. 10: Measured forces of struts, construction pit U4-VS1



3.4 Fallbeispiel 3: Baugrube ALEXA, Berlin, Querschnitt MQ 7

Bei diesem Bauvorhaben handelt es sich um eine Trogbaugrube mit einer Grundfläche von 23.000 m² (Bild. 11 + 12). Im betrachteten Querschnitt MQ 7 befindet sich die Baugrubensohle 13 m unter der Geländeroberkante. Die Baugrubenbreite beträgt dort mehr als 90 m. Als Verbauwand wurde eine einfach rückverankerte Stahlbetonschlitzwand hergestellt. Zur horizontalen Abdichtung der Trogbaugrube wurde eine tiefliegende HDI-Dichtsohle ausgeführt. Zur Abschottung der einzelnen Baufelder untereinander wurden Dichtwände angeordnet.

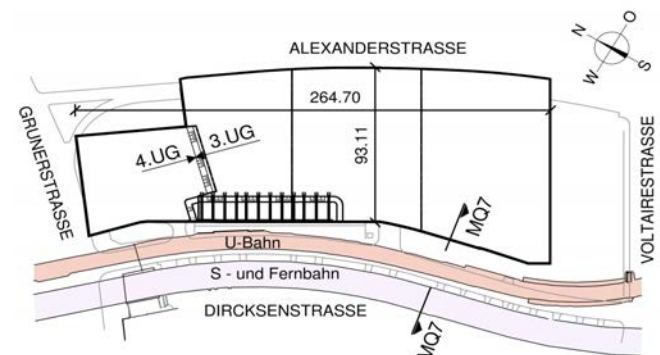


Bild 11: Grundriss Baugrube Alexa

Fig 11: Layout construction pit alexa



Bild 12: Übersicht Baugrube Alexa

Fig 12: Aerial view construction pit Alexa

Der Baugrubenquerschnitt MQ 7 mit Angabe der Bodenverhältnisse ist in Bild 13 dargestellt. In der Tabelle 8 sind die zugehörigen Bodenkennwerten aufgeführt.

Bei den Vergleichsrechnungen mit dem BMV wurde wie in der Ausführungsstatik ein erhöht aktiver Erd- druck von 25% E_o + 75% E_a und eine abgetreppte Erd- druckverteilung gemäß EB 70-1 angesetzt. Der Erd- druckansatz wurde vorab durch eine FE-Berechnung als auf der sicheren Seite liegend bestätigt.

Als Verkehrslast wurde am Böschungsfuß und auf der Geländeoberkante eine gleichmäßig verteilte Verkehrs- last von 10 kN/m² angesetzt. Das Grundwasser wurde mit einer Höhe von 32,10 mNN berücksichtigt. Der innerhalb der Baugrube abgesenkte Grundwasserstand befand sich bei 22,20 mNN.

Da die Schlitzwand am Kopf durch Verpressanker ge- stützt war, wurde bei den Vergleichsberechnungen nur der Endaushubzustand betrachtet. Aufgrund der Anker- vorspannung ergab sich nur eine minimale Verschie- bung in Höhe der Ankerlage, so dass bei den Ver- gleichsrechnungen anstelle eines elastischen Ankers eine starre Auflagerung angesetzt wurde. In Höhe der HDI-Sohle wurde eine Fußpunktstützung angesetzt.

Anhand der Tabelle 1 wurde der Bettungsmodul für den mitteldichtgelagerten Sand 2 mit 10 MN/m³ für den dichtgelagerten Sand 3 zu 15 MN/m³ angesetzt.

Beim Es-Verfahren wurde der Bettungsmodul mit der statisch erforderlichen Einbindelänge bestimmt. Mit dem Ansatz von charakteristischen Belastungen und Widerständen ergibt sich t_{stat} zu 4,5 m. Der Bettungs- modul wird tabellarisch ermittelt (siehe Tabelle 9) und in das Verbaustatikprogramm eingesetzt. Der Faktor E_{sh} / E_{sv} wurde aufgrund der großen Baugrubenbreite mit 0,5 angesetzt.

Mit dem Es-Verfahren gibt sich somit eine Spannweite des Bettungsmoduls $k_{sh,k}$ von 10 bis 16 MN/m³.

Bei den Vergleichsrechnungen mit dem BMV nach EB 102 (neu) und der FEM ergeben sich sehr einheitliche Verformungen (Bild 13). Mit dem Tabellenverfahren wurde eine Verbauwandverformung w_{max} in Höhe von

24 mm ermittelt, beim Es-Verfahren 21 mm und mit der FEM 23 mm.

An Messquerschnitt 7 wurden insgesamt 35 Inklinome- termessungen durchgeführt, um die Wandverformungen den einzelnen Bauprozessen zuordnen zu können. Be- reits nach Herstellung der Düsenstrahlsohle haben sich Verbauwandverformungen am Wandkopf von 18 mm eingestellt. Auch bei den übrigen Messquerschnitten konnten ähnlich hohe Verbauwandverformungen nach der HDI-Herstellung beobachtet werden. Nach dem Pumpversuch vergrößerten sich die Wandverformungen auf 47mm und nach dem Endaushub auf 95 mm.

Boden- schicht	γ / γ'	ϕ' / c'	E_{sv}
	kN/m ³	° / kN/m ²	
Auffüllung	17 / 10	30,0 / 0	-
Sand 1	18 / 10,5	32,5 / 0	20 $\sqrt{z}$
Sand 1-2	18 / 10,5	34,0 / 0	22 $\sqrt{z}$
Sand 2	18,5 / 11	35,0 / 0	25 $\sqrt{z}$
Sand 3	19 / 11	37,5 / 0	30 $\sqrt{z}$

Tabelle 8: Bodenkennwerte Baugrube Alexa

Table 8: Soil parameters construction pit Alexa

Tiefe unter GOK	Tiefe unter BGS	E_{sh}	$k_{sh,k}$
m	m	MN/m ²	MN/m ³
13,00	0,00		
13,5	0,50	92	10
16,00	3,00	100	11
16,10	3,10	120	13
24,00	11,00	147	16

Tabelle 9: Bestimmung des Bettungsmoduls mit dem

Es-Verfahren und dem Ansatz $k_{sh,k} = E_{sh} / t_{stat}$

Table 9: Coefficient of subgrade reaction using

Es-method and $k_{sh,k} = E_{sh} / t_{stat}$

Berechnung / Messung	(1) Tab.- Verf.	(2) Es- Verf.	(3) FEM	(4) Mes- sung
max w [mm]	24	21	23	95
max A _k [kN]	1011	1091	1029	924

Tabelle 10: Zusammenfassung Ergebnisse Vergleichs- rechnung und Messungen Baugrube Alexa MQ7 im Endaushubzustand

Table 10: Summary of results of comparative calcula- tions and measurements construction pit Al- exa MQ 7

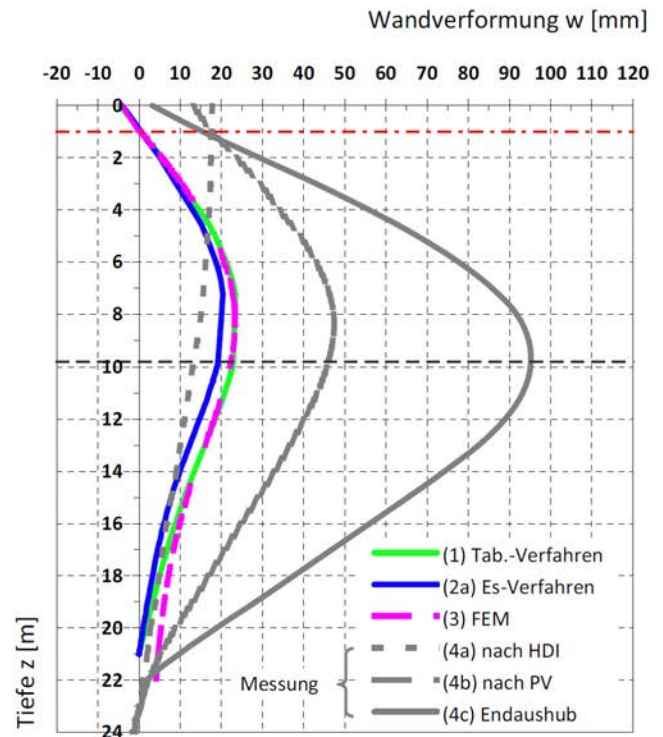
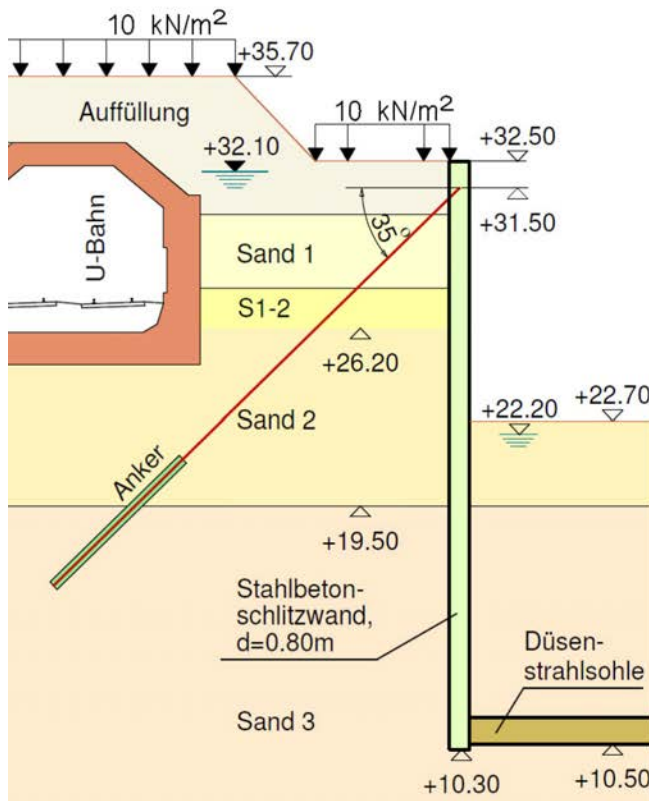


Bild. 13: Querschnitt und Wandverformungen im Endaushub, Baugrube Alexa, MQ 7

Fig. 13: Section and deformations in phase “final excavation” of construction pit, Alexa, MQ 7

Die großen Verbauwandverformungen lassen sich selbst bei Abminderung der Bettungsmodule beim BMV oder der Materialparameter bei der FE-Berechnung rechnerisch nicht erklären. Hier waren bis dato unbekannte Effekte verantwortlich.

Zunächst wurde vermutet, dass durch die Herstellung der Düsenstrahlsohle der Baugrund aufgelockert und damit das Fußauflager im Wandeinbindebereich geschwächt wurde. Die baubegleitende Überprüfung der Lagerungsdichte mittels direkter Verfahren ergab jedoch keine Auflockerung des Baugrunds. Nähere Angaben zu möglichen Ursachen finden sich in *Brand / Grothe* [23]. In diesem Beitrag soll hierauf nicht weiter eingegangen werden.

Das Fallbeispiel 3 zeigt die Grenzen der Berechnungsverfahren. Keine der angewandten Methoden konnte die gemessenen Verformungen prognostizieren.

Abschließend werden für dieses Fallbeispiel noch die Ankerkraftmessungen ausgewertet, um den Erddruckansatz zu überprüfen. Die Ankerkräfte wurden mit drei unmittelbar nebeneinander liegenden Kraftmessdosen für den MQ 7 ermittelt, um Schwankungen innerhalb einer Schlitzwandlamelle auszugleichen (siehe Bild 14). Die mit der FEM und dem BMV-Verfahren ermittelten Ankerkräfte (siehe Tabelle 10) stimmen gut überein. Bei den Ankerkraftmessungen zeigten sich etwas geringere Werte, was mit dem Abfall des erhöht aktiven Erddrucks auf den aktiven Erddruck erklärt werden kann.

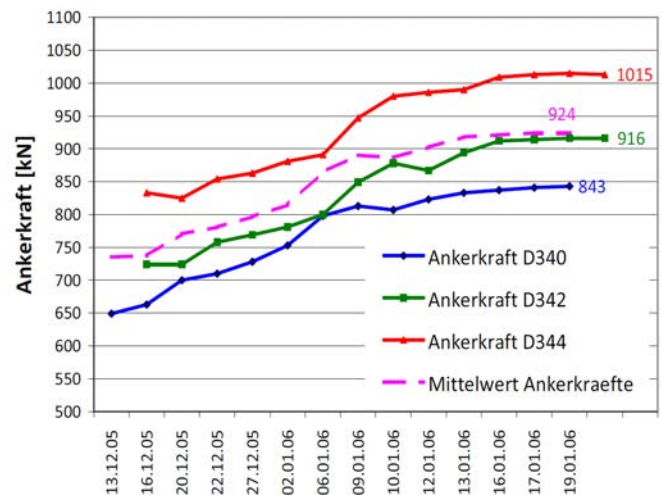


Bild 14: Gemessene Ankerkräfte Baugrube Alexa MQ7

Fig. 14: Measured forces of anchors construction pit Alexa MQ7

3.5 Fallbeispiel 4: Baugrube Sony, Berlin, MQ 1

Im letzten Fallbeispiel wird die Baugrube Sony, Berlin behandelt. Die Baugrube Sony wurde als Trogbaugrube mit tiefliegender Weichgelsohle hergestellt. Die Baugrubenwände bestanden aus einer Dichtwand mit eingestellter Spundwand (Profil L605). Zur Räumung der Schlitztrasse wurde ein Trägerbohlverbau hergestellt. Die Spundwand wurde dreifach rückverankert (Bilder 15 - 17).

Die Baugrubenfläche betrug etwa 31.500 m². Die Baugrubentiefe lag im Bereich des Messquerschnitts MQ1 bei 14,30 m.

Bei diesem Bauvorhaben konnte auf die umfangreichen Daten des von der Ed. Züblin AG durchgeführten Messprogramms zurückgegriffen werden. Diese wurden ausführlich von Mayer [24] erläutert.

Der Baugrubenquerschnitt MQ1 mit Angabe der Bodenverhältnisse ist in Bild 18 dargestellt. In Tabelle 11 sind die zugehörigen Bodenkennwerte aufgeführt.

Als Verkehrslast wurde eine gleichmäßig verteilte Last in Höhe von 10 kN/m² angesetzt.

Bei den Vergleichsrechnungen mit dem BMV wurde der Vorverbau, der Einfachheit halber nicht als gesondertes Bauteil abgebildet, sondern als Verlängerung der Spundwand modelliert. Es wurden alle Zwischenaushubzustände zum Einbau der Verpressanker berechnet. Das Grundwasser wurde in einer Höhe von 2,30 m unter der Geländeoberkante angesetzt.

Anhand der Tabelle 1 wurde der Bettungsmodul für die einzelnen Bodenschichten bestimmt. Für die Auffüllung und den locker gelagerten Sand 1 wurde der Bettungsmodul mit 4 MN/m³ angesetzt. Für den geringmächtigen steifen Mergel wurde der Bettungsmodul wie für den mitteldicht gelagerten Sand mit 10 MN/m³ angesetzt.

Der Bettungsmodul wurde beim Es-Verfahren mit der statisch erforderlichen Einbindelänge bestimmt. Diese lag zwischen 2,40 und 2,80 m. Der Steifemodul wurde mit der Tiefe zunehmend, entsprechend dem Ansatz von Richter [18], bestimmt. Aufgrund der großen Baugrubenbreite wurde der Faktor E_{sh} / E_{sv} mit 0,5 gewählt. Hiermit ergab sich eine Spannweite des Bettungsmoduls von 6 bis 48 MN/m³.

Boden-schicht	γ / γ' kN/m ³	ϕ' / c' ° / kN/m ²	E_{sv} MN/m ²
Auffüllung	17 / 10	30,0 / 0	-
Sand 1	18 / 10,5	32,5 / 0	30 v z
Mergel	22 / 11,5	27,5 / 10	10 v z
Sand 2	19 / 11	35,0 / 0	50 v z

Tabelle 11: Bodenkennwerte und Bettungsmodule (gemäß Tabelle 1) Baugrube Sony, Berlin

Table 11: Soil parameters and Coefficient of subgrade reaction.

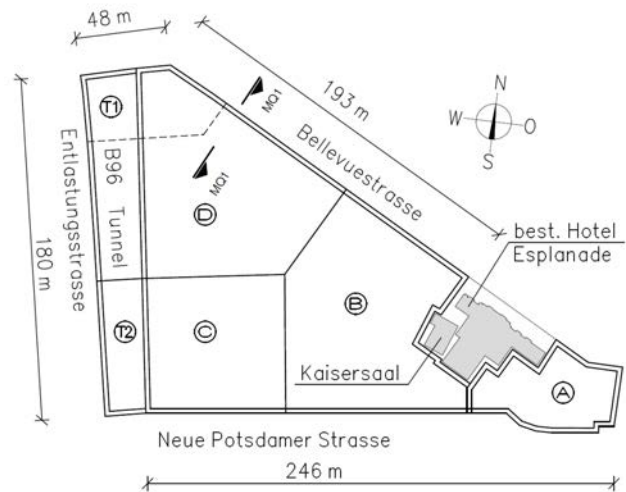


Bild 15: Grundriss Baugrube Sony

Fig. 15: Layout construction pit Sony



Bild 16: Baugrubenherstellung Baugrube Sony

Fig. 16: Aerial view construction pit Sony



Bild 17: Herstellung 3. Ankerlage im Bereich Messquerschnitts MQ1, Baugrube Sony

Fig. 17: Installation of the 3rd level of anchors, construction pit Sony

Bei der FE-Berechnung haben *Richter* et al zwei Varianten durchgeführt, um den Einfluss der Ankervorspannung zu berücksichtigen. Bei Variante A wurden die mit dem Verbauprogramm QWALLS ermittelten Ankerkräfte in Ansatz gebracht, bei der Variante B die vor Ort gemessenen Ankerkräfte. Bei der FE-Berechnung Variante A ergaben sich maximale Verbauwandverformungen von 60 mm, aus Variante B folgten 40 mm. Der Unterschied bei der Verformungsprognose mittels FEM beträgt somit 50% allein durch die unterschiedliche Vorgabe der Ankervorspannung. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass es nicht nur beim BMV sondern auch bei der FEM viel Erfahrung bedarf, um realistische Verbauwandverformungen zu ermitteln.

Berechnung / Messung	(1) Tab.- Verf.	(2) Es-Verf. mit t_{stat}	(3) FEM (GUD)	(4) Mes- sung
ksh [MN/m ³]	1 - 15	0,3 - 30	-	-
max w [mm]	36	31	40	45

Table 12: Summary of results of comparative calculations of construction pit Sony MQ 1

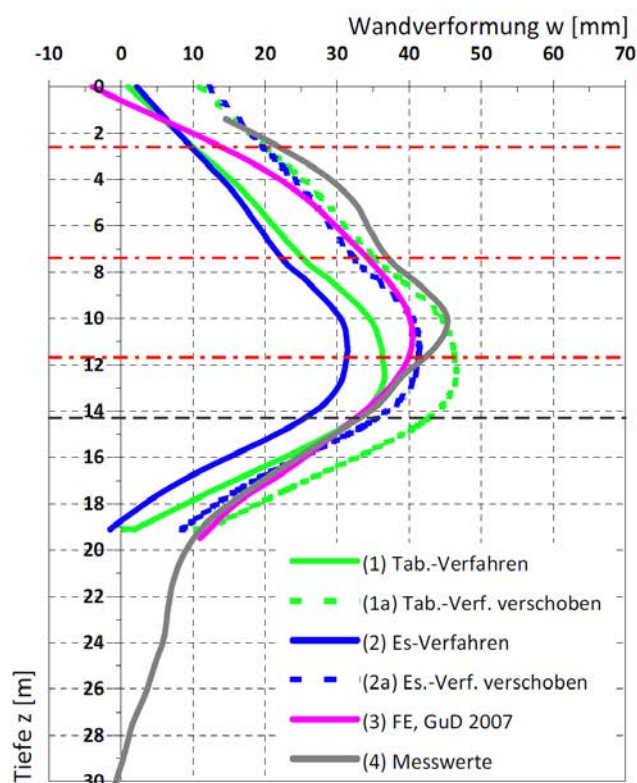


Fig. 18: Section and deformations in phase “final excavation” construction pit Sony MQ 1

Die Abweichungen lassen u. a. durch folgende Ursachen erklären.

Bei der Berechnung mit dem BMV wurde die Baugrußenkonstruktion nur bis zur Unterkante der Spundwand modelliert. Weiträumige Verformungen infolge Aushubentlastung und infolge des Wasserdrucks auf die Dichtwand wurden somit nicht berücksichtigt.

Weiterhin ergab die Auswertung der Pegelstände innerhalb der Baugrube, dass die Grundwasserabsenkung dem Aushub weit vorauselte, so dass die Wasserdruckbelastung in den Aushubphasen zur Herstellung der 1. bis zur 3. Ankerlage größer als in der Verbauberechnung mit dem BMV berücksichtigt war.

Ferner ist die Steifigkeit der Verbauwandverformungen auf den oberen 2 m zu hoch angesetzt worden.

Und schließlich lassen sich Bautätigkeiten in der Nähe des Messquerschnitts als Ursache für herstellbedingte Verformungen ausmachen. Bild 17 zeigt, dass im angrenzenden Baugrubenabschnitt der Endaushub abgeschlossen ist und bereits RV-Pfähle eingebracht werden, während im Bereich des Messquerschnitts MQ1 noch die 3. Ankerlage eingebaut wird.

Die aus oben beschriebenen Effekten entstandenen, zusätzlichen Verbauwandverformungen werden mit ca. 10 mm abgeschätzt. Bei einer parallelen Verschiebung der rechnerischen Verformungen um diesen Betrag ergeben sich die Kurven (1b) und (2b). Diese passen dann sehr gut zu Messwerten und FEM.

4. Fazit

Auf Grundlage zahlreicher Vergleichsrechnungen und dem Abgleich mit FEM-Ergebnissen und Messungen an ausgeführten Verbauwänden konnte nachgewiesen werden, dass das Bettungsmodulverfahren nach EB 102 (neu), wie es in der kommenden Auflage der EAB veröffentlicht wird, nun für die allgemeine Anwendung geeignet ist.

Die Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass besonders bei statisch unbestimmten Systemen eine realitätsnahe Ermittlung des Bettungsmoduls erforderlich ist. Damit kann zum Beispiel eine Unterbemessung der Konstruktion durch ungewollte Umlagerungen vermieden werden.

Erfreulich ist, dass mit dem BMV unter Anwendung der EB 102 (neu) vergleichbare Ergebnisse zur FEM erzielt werden konnten. Die Abweichungen waren im Verhältnis zur natürlichen Streubreite bei geotechnischen Berechnungen klein und ließen sich bei näherer Untersuchung erklären.

In komplizierten Fällen, die neben dem Nachweis der Standsicherheit auch Aussagen zum Verformungsverhalten von Verbaukonstruktionen erfordern, ist es sinnvoll die FEM mit dem BMV zu kombinieren. Die FEM kann hier zur Abschätzung der Eingangswerte für das BMV (Bettungsmodul, Belastung) herangezogen werden.

Durch die vier Fallbeispiele konnte aufgezeigt werden, dass die Ermittlung der Eingangswerte, die Modellierung und die Auswertung der Ergebnisse viel Erfahrung und die genaue Kenntnis des Bauablaufes erfordern. Verfahrens- und bauablaufbedingte Verformungen können durch das Verfahren direkt nicht ermittelt werden. Diese können einen maßgeblichen Anteil an den Gesamtverformungen erreichen. Je nach Bauverfahren können sie die „rechnerischen“ Verformungen sogar überschreiten. Daher ist besonders in Fällen mit setzungsempfindlicher Bebauung im Einflussbereich der Verbauwände neben der statischen Berechnung immer eine Gesamtbetrachtung aller verformungsrelevanten Einflussfaktoren durchzuführen.

Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle allen Mitarbeitern, Diplomanden und übrigen Beteiligten danken, die in den letzten Jahren mit Ihren Untersuchungen die Grundlagen für die Überarbeitung der EB 102 geschaffen haben. Ohne diesen Einsatz, welcher oft neben dem "normalen" Tagesgeschäft geleistet wurde, wäre dies nicht möglich gewesen. Weiter ist den Baustellen und hierbei insbesondere den Mitarbeitern der Züblin Spezialtiefbau GmbH für das Interesse und die Bereitschaft Messprogramme durchzuführen, die weit über eine normale Qualitätssicherung hinausgehen, zu danken. Und schließlich gebührt dem Arbeitskreis Baugruben der DGGT Dank für die Bereitschaft Anwendungsfragen und -hinweise aus der Praxis anzunehmen und diese in die Empfehlungen einzuarbeiten.

Literatur

- [1] *Weßenbach, Anton; Gollub, Peter*: Neue Erkenntnisse über mehrfach verankerte Ort betonwände bei Baugruben in Sandboden mit tiefliegender Injektionssohle hohem Wasserüberdruck und großer Bauwerkslast. Bautechnik 72, Heft 12, 1995
- [2] *Besler, Detlev*: Wirklichkeitsnahe Erfassung der Fußauflagerung und des Verformungsverhaltens von gestützten Baugrubenwänden. Schriftenreihe des Lehrstuhls Baugrund-Grundbau der Technischen Universität Dortmund, 1998
- [3] *Bartl, Uwe*: Zur Mobilisierungsfunktion des passiven Erddrucks in kohäsionslosem Boden. Institut für Geotechnik Dresden, Heft 12, 2004.
- [4] *Hettler, Achim; Maier, Thomas*: Verschiebung des Bodenaufagers bei Baugruben auf der Grundlage der Mobilisierungsfunktion von Besler. Bautechnik 81, Heft 5, 2004
- [5] *Hettler, Achim; Vega-Ortiz, Susanna; Gutjahr, Stephan*: Nichtlinearer Bettungsansatz von Besler bei Baugrubenwänden. Bautechnik 82 Heft 9 2005
- [6] *Weßenbach, Anton*: Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" der DGGT zur Anwendung des Bettungsmodulverfahren und der Finite Element Methode. Bautechnik 80, Heft 2, 2003
- [7] Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben, 4. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Ernst & Sohn, Berlin 2006.
- [8] *Weßenbach, Anton; Hettler, Achim*: Baugruben – Berechnungsverfahren. 2. Auflage Ernst & Sohn, Berlin 2010.
- [9] *Bastian, David; Brand, Thomas; Hillmann, Stephan*: Vergleichende Untersuchungen zum Bettungsmodulverfahren nach EB 102 (für den Arbeitskreis Baugruben, unveröffentlicht) 2009
- [10] *Gensel, Martin*: Vergleichende Untersuchungen zum Bettungsmodulverfahren nach EB 102. Diplomarbeit an der TU Freiberg, 2009
- [11] *Storz, Thomas*: Berechnung und Bemessung von mehrfach gestützten Verbaukonstruktionen mit dem Bettungsmodulverfahren nach EB 102. Diplomarbeit an der HTW Berlin, 2009
- [12] *Brand, Thomas; Bastian, David; Dannenmann, Claus*: Vergleichende Untersuchungen zum Bettungsmodulverfahren nach EB 102 (für den Arbeitskreis Baugruben, unveröffentlicht) 2009
- [13] *Brand, Th.*: Erfahrungen bei der Berechnung und Messung von Verbauwandverformungen tiefer Trogbaugruben. Mitteilungen des Instituts für Grundbau der TU Dresden, Heft 16, 2009
- [14] *Brand, Th.; Bastian, D.*: Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung und Messung von Verbauwandverformungen tiefer Trogbaugruben. Veröffentlichung des 7. Kolloquiums Bauen in Boden und Fels der Technischen Akademie Esslingen, 2010
- [15] *Hoffmann, Jens, Mittag, Jens; Armbruster, Ralf*: Spreadreieck – Planung und Bau einer innerstädtischen Baugrube mit komplexen geologischen Randbedingungen und Verformungsanforderungen. Baugrundtagung DGGT, 2008
- [16] *Brand, Thomas; Bastian, David; Storz, Thomas*: Vergleichsrechnungen mit neuen Tabellenwerten nach EB 102 (für den Arbeitskreis Baugruben, unveröffentlicht) 2010
- [17] *Hettler Achim.*: Empfehlung EB 102 des Arbeitskreises „Baugruben“ der DGGT zur Anwendung des Bettungsmodulverfahrens. Bautechnik 88 Heft 9, 2011
- [18] *Richter, Thomas*: Zur Rechnerischen Abschätzung des Lastverhaltens von Bauwerken. Mitteilung des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau Universität Hannover, Heft 40, 1995
- [19] *Schanz, Tom*: Aktuelle Entwicklungen bei Stand sicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik. Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik, Abschnitt 4, Geotechnik 29 Heft 1, 2006
- [20] *Triantafyllidis, Theodor*: Neue Erkenntnisse aus Messungen an tiefen Baugruben am Potsdamer Platz in Berlin. Bautechnik 75, Heft 3, 1998
- [21] *Gollub, Peter; Klobe, Berthold*: Tiefe Baugruben in Berlin: Bisherige Erfahrungen und geotechnische Probleme. Geotechnik Heft 19, 1995
- [22] *Hettler, Achim, Borchert, Kurt-M.*: Herstellbedingte Verformungen bei tiefen Baugruben. DGGT Baugrundtagung München 2010.
- [23] *Brand, Thomas; Grothe Jens*: Aktuelle Erkenntnisse bei der Ausführung von Trogbaugruben mit Dichtsohlen in Berlin. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der TU Berlin, Heft 41, 2007
- [24] *Mayer, Peter-Michael*: Verformungen und Spannungsänderungen im Boden durch Schlitzwandherstellung und Baugrubenaushub. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe 2000
- [25] *Richter, Thomas; Leonhard, Hilmar; Römer, Matthias*: Anwendung der Finiten-Element-Methode zur Berechnung von Baugruben mit Vergleichen zu konventionelle Berechnungen und Messergebnissen. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Heft 14, 2007

Autoren dieses Beitrags:

Dipl.-Ing. Thomas Brand, Dipl.-Ing. David Bastian
 Ed. Züblin AG – Zentrale Technik, Berlin
 Bessemerstr. 42b, 12103 Berlin
 Dipl.-Ing. (FH) Stephan Hillmann,
 Specht Kalleja + Partner Beratende Ingenieure GmbH,
 Keplerstraße 8 - 10, 10589 Berlin
 (ehemals Ed. Züblin AG – Zentrale Technik, Berlin)