

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Herten, Markus

EC 7 - Welches Nachweisverfahren ist das Richtige?

Veröffentlichungen des Institutes Geotechnik und Baubetrieb, TU Hamburg-Harburg

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100890>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Herten, Markus (2013): EC 7 - Welches Nachweisverfahren ist das Richtige?. In: Bemessen mit numerischen Methoden, Workshop 24.- 25.09.2013. Veröffentlichungen des Institutes Geotechnik und Baubetrieb, TU Hamburg-Harburg 27. Hamburg: TU Hamburg-Harburg. S. 1-11.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



EC 7 – Welches Nachweisverfahren ist das richtige?

Dr.-Ing. Markus Herten

Seit 2012 ist der Eurocode DIN EN 1997-1 (EC7) in Deutschland eingeführt. Da die „alte“ DIN 1054:2005-01 schon auf den Eurocode ausgerichtet war, ergeben sich für Deutschland nur geringfügige Änderungen. Bei der aktuell begonnenen Überarbeitung des EC 7 ist es jedoch erforderlich, sich mit allen Optionen, die der EC7 bietet, zu befassen und die Grundlagen für eine zukunftsfähige Bemessung mit numerischen Verfahren zu schaffen. Es werden die in Europa verwendeten Bemessungskonzepte vorgestellt, Vor- und Nachteile aufgeführt und aktuelle Tendenzen beschrieben.

Eurocode DIN EN 1997-1 (EC7) was introduced in Germany in 2012. As the “old” DIN 1054:2005-01 was already aligned with the Eurocode, in Germany only slight changes are needed. Throughout the currently ongoing revision of EC7, however, it is necessary to consider all options it entails and to lay the foundation for a future-oriented design with numerical methods. Design concepts used in Europe are presented, advantages and disadvantages are listed and current trends are described.

1 Einleitung

Seit 2012 ist der Eurocode DIN EN 1997-1:2009-09 (EC 7) zusammen mit den nationalen Anwenderdokumenten und den verbleibenden nationalen Regelungen in Deutschland eingeführt. Da die „alte“ DIN 1054:2005-01 als Übergangsnorm wesentliche Inhalte des Eurocodes schon berücksichtigt hat, ergeben sich für Deutschland nur geringfügige Änderungen wie z. B. bei den Begrifflichkeiten. Die wesentlichen betreffen die Grenzzustände, die sich in den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS - Serviceability Limit State) und den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS - Ultimate Limit State) aufteilen. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS gliedert sich in EQU (equilibrium), UPL (uplift), HYD (hydraulic), STR (structure) und GEO (geotechnics) (Heibaum 2012).

Somit können Empfehlungen zur Bemessung mit numerischen Verfahren, die sich auf die DIN 1054:2005-01 beziehen, auch auf die neue Normensituation übertragen werden. Damit erfolgt die Bemessung einer Baugrubenwand mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) nach Heibaum et. al. (2007); Hettler et. al. (2008); Wolffersdorff (2008); Weißenbach et. al. (2011) und EAB (2012), indem eine Berechnung mit charakteristischen Kennwerten, die prinzipiell der Berechnung für die Gebrauchstauglichkeit (SLS) entspricht, durchgeführt wird. Hieraus werden die Beanspruchungen für den Nachweis der Grenztragfähigkeit (ULS) entnommen. Die Widerstände müssen jedoch separat, gegebenenfalls mit analytischen Methoden bestimmt werden.

Die numerische Berechnung der Grenztragfähigkeit von Pfählen, eines Fundaments, des Fußauflagers einer Spundwand oder auch des Herausziehwidestands von Ankern ist sehr komplex und nicht zuletzt aufgrund großer Verformungen beim Bruch sehr schwierig. Die Ergebnisse passen häufig nicht zu analytischen Berechnungen bzw. Probelastungen. Trotzdem wird die generelle Nutzung solcher Berechnungen für die Bemessung forciert. Ein Blick ins europäische Ausland macht dies deutlich. Da dort teilweise andere Nachweisverfahren mit Abminderung der Materialeigenschaften Verwendung finden, kann der Nachweis vollständig innerhalb der FE-Berechnungen geführt werden. Ein separater Vergleich von Beanspruchungen und Widerständen entfällt. In Österreich wird für die Bemessung mit numerischen Verfahren ein anderes Nachweisverfahren als für analytische Berechnungen erlaubt, um diese einfachere Umsetzung zu ermöglichen. Aus Anlass der aktuell begonnenen Überarbeitung des EC 7 ist es erforderlich, sich mit unterschiedlichen Nachweisverfahren des EC 7 zu befassen und die Grundlagen für eine zukunftsfähige Bemessung mit numerischen Verfahren zu schaffen.

2 Nachweisverfahren (Design Approaches)

Ein Grenzzustand ist der Zustand eines Tragwerks, bei dessen Überschreitung die der Tragwerksplanung zugrunde gelegten Anforderungen überschritten werden. Dabei wird unterschieden zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit, dessen Überschreiten zu einem rechnerischen Einsturz oder anderen Formen des Versagens führt, und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, dessen Überschreiten die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt. Bei Berechnungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit herrscht weitgehend Einigkeit, dass sie mit numerischen Modellen wie der FEM-Verformungsprognose wesentlich besser gelingen können als mit analytischen Verfahren. Bei diesen Berechnungen entfällt der Ansatz von Sicherheiten, und Grenzwerte werden empirisch festgelegt. Für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist die Verwendung der FEM differenziert zu betrachten, da dieser Grenzzustand zwischen dem Verlust der Lagesicherheit (HYD, UPL, EQU), dem Versagen von Bauwerken und Bauteilen (STR, GEO) und dem Verlust der Gesamtstandsicherheit (GEO) unterscheidet. Die anzusetzenden Sicherheitsbeiwerte ergeben sich in der Geotechnik nicht wie im Hochbau probabilistisch, sondern wurden in Deutschland aus den alten globalen Sicherheitsbeiwerten, die auf den Erfahrungen mit den klassischen Berechnungsmethoden beruhen, gebildet.

Für STR und GEO gibt es im EC 7 Teil 1 die Wahl zwischen drei Nachweisverfahren DA (design approach), die sich darin unterscheiden, wie die Teilsicherheitsbeiwerte (γ) berücksichtigt werden. Der Bemessungswert der Beanspruchung (E_d) kann durch Anwendung (\times) der Teilsicherheiten auf die repräsentative Einwirkungen (F_{Rep})

$$E_d = E \{ \gamma_F \times F_{Rep} \} \quad (1)$$

oder auf die Beanspruchungen (E)

$$E_d = \gamma_E \times E \{ F_{Rep} \} \quad (2)$$

ermittelt werden. Beim Bemessungswiderstand (R_d) kann der Teilsicherheitsbeiwert die charakteristische Baugrundeigenschaften (X_k)

$$R_d = R \{X_k/\gamma_M\} \quad (3)$$

oder die Widerstände (R)

$$R_d = R \{X_k\}/\gamma_R \quad (4)$$

abmindern, wobei auch eine Kombination möglich wäre. Im Nationalen Anhang muss festgelegt werden, nach welchen der drei Nachweisverfahren, d. h. Kombinationen der Formeln 1 bis 4 der Nachweis

$$E_d \leq R_d \quad (5)$$

für GEO und STR zu führen ist. In Tabelle 1 sind die Nachweisverfahren DA1, das aus zwei Kombinationen besteht, DA2 und DA3 aufgelistet. Dabei steht „A“ für Einwirkungen (action) und Beanspruchungen, „M“ für geotechnische Kenngrößen (material) und „R“ für Widerstände (resistance) und die Zahl für die jeweilige Wertegruppe, die im normativen Anhang des EC 7 Teil 1 mit Teilsicherheitsbeiwerten hinterlegt ist. In der Tabelle sind exemplarisch die dort empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte für ständig ungünstige Einwirkungen, wirksame Scherwinkel und Kohäsion und der Widerstand für den Grundbruchnachweis aufgeführt.

Tabelle 1: Nachweiskonzepte mit Sicherheitsbeiwerten für den Grundbruch
Table 1: Design approaches with partial factors for bearing resistance

DA1:	Kombination 1:	A1	“+”	M1	“+”	R1
	γ	1,35		1,0		1,0
	Kombination 2:	A2	“+”	M2	“+”	R1
	γ	1,0		1,25		1,0
DA2:	Kombination:	A1	“+”	M1	“+”	R2
	γ	1,35		1,0		1,4
DA3:	Kombination:	A2	“+”	M2	“+”	R3
	γ	1,0		1,25		1,0

2.1 Gesamtstandsicherheit

Wird die Gesamtstandsicherheit untersucht, sind in fast allen Ländern die Baugrundeigenschaften, d. h. die Scherparameter zu faktorisieren:

$$E_d (\varphi'_d, c'_d) \leq R_d (\varphi'_d, c'_d) \quad (6)$$

Dieses Nachweiskonzept für die Gesamtstandsicherheit im Grenzzustand GEO¹ entspricht DA3 oder der Kombination 2 von DA1. Es wird als Material Factoring Approach (MFA) bezeichnet und lässt sich sehr einfach in einer FE-Berechnung umsetzen. Obwohl bei einer Böschungsbruchberechnung mit FEM keine Starrkörper wie in der klassischen Erdstatik betrachtet werden können, zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass die Ergebnisse sehr gut im Einklang mit den bekannten analytischen Verfahren stehen (Schanz 2006). Der maßgebliche Bruchkörper muss hierbei jedoch nicht wie bei den klassischen Verfahren iterativ gesucht werden, sondern stellt sich im Grenzzustand von selbst ein. Sind Widerstände von Bauteilen in der Scherfuge zu berücksichtigen, bedarf es differenzierter Betrachtungen und es müssen die im folgenden Abschnitt gegebenen Hinweise berücksichtigt werden.

2.2 Stützbauwerke

Bei der Bemessung von Stützbauwerken zeigt sich, dass das Ziel, die Harmonisierung der Bemessung in der Europäischen Union mit dem aktuellen EC 7, noch nicht erreicht ist. Es werden alle Varianten der Nachweisverfahren mindestens in einem nationalen Anwenderdokument gefordert. Diese auf Grundlage empirischer und analytischer Bemessungen historisch begründete Uneinigkeit hat natürlich auch Auswirkungen auf eine angestrebte einheitliche Bemessung mit numerischen Verfahren. Diesen Konflikt kann die FEM nicht lösen, es ergeben sich aber aufgrund ihrer Eigenschaften Vor- und Nachteile ihrer Anwendung bei den verschiedenen Nachweiskonzepten.

2.2.1 DA1

In Großbritannien und einigen weiteren Ländern ist eine doppelte Nachweisführung entsprechend DA1 üblich. Es werden einmal die Einwirkungen mit einer Sicherheit beaufschlagt und bei einer zweiten Berechnung werden die Materialparameter abgemindert. Somit sollen Sicherheitsdefizite eines einzelnen Nachweisverfahrens ausgeglichen werden. Da sich diese Vorgehensweise auch durch Kombinationen von DA2 und DA3 mit veränderten Sicherheitsbeiwerten bilden lassen, sollen in der nächsten Normengeneration nur noch zwei Nachweisverfahren, nämlich der Load and Resistance Factoring Approach (LRFA) und der MFA, zugelassen werden. Daher soll es hier ausreichen, die Vor- und Nachteile der Nachweisverfahren DA2, d. h. LRFA, und DA3, d. h. MFA, zu beschreiben, auch wenn es bei DA1 nur ein Load Factoring Approach (LFA) und kein Resistance Factoring Approach (RFA) gibt.

¹ In Deutschland wird der Nachweis des Grenzzustands GEO nach DA3 mit GEO-3 bezeichnet.

2.2.2 DA2

Bei der Bemessung einer verankerten Spundwand sind in Deutschland die meisten Nachweise nach DA2 (STR und GEO²) bzw. LRFA zu führen, nämlich für das Widerstandsmoment, die Einbindelänge, das vertikale Gleichgewicht, die vertikale Tragfähigkeit, die Materialfestigkeit des Ankers, den Herauszieh Widerstand des Ankers und die Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge. Hierbei werden die Beanspruchungen und Widerstände faktorisiert, es erfolgt ein Kräftevergleich

$$E_k \cdot \gamma_E \leq R_k / \gamma_R. \quad (7)$$

Dies ist für die Bemessung mithilfe der FEM prinzipiell ungünstig, da hier Verformungen und Spannungen berechnet werden und keine Unterscheidung zwischen Belastungen und Widerständen erfolgt. Als hilfreich hat sich jedoch erwiesen, bei geotechnischen Nachweisen nicht die Einwirkungen mit Sicherheiten zu beaufschlagen, sondern erst die Beanspruchungen zu faktorisieren. Dabei werden abweichend zum Hochbau mit charakteristischen Einwirkungen realistische (charakteristische) Beanspruchungen ermittelt, die anschließend vergrößert werden. Diese Vorgehensweise wird häufig mit DA2* bezeichnet, obwohl sie ausdrücklich im EC 7 als eine von zwei Möglichkeiten in DA2 genannt wird (s. Gleichung 1 und 2). Bei linearem Systemverhalten, wie dem Balken auf zwei Stützen in Abbildung 1, führen beide Wege zum gleichen Ergebnis.

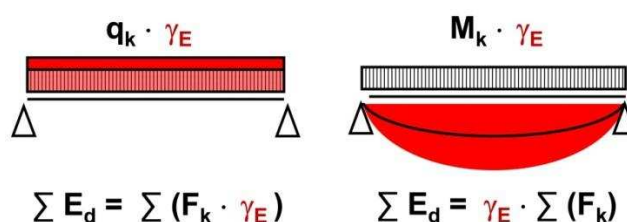


Abbildung 1: Faktorisierung der Einwirkung (Auflast) bzw. der Beanspruchung (Moment)
Figure 1: Partial factors applied to actions (load) or effects (moment)

Eine FE-Berechnung für den SLS kann so auch verwendet werden, um charakteristische Beanspruchungen für Nachweise nach DA2 zu bestimmen. Charakteristische Beanspruchungen und die dazugehörigen Verformungen lassen sich während des Baus und Betriebs durch Messungen kontrollieren. Im Zusammenspiel mit der Beobachtungsmethode können so auch die numerischen Berechnungen überprüft und gegebenenfalls optimiert werden, wobei hier gegebenenfalls keine charakteristischen, sondern zutreffendere Kennwerte und Randbedingungen (z. B. Grundwasserstände) verwendet werden müssen.

Streng genommen widerspricht die Ermittlung der Einwirkungen im SLS jedoch dem EC 7, da dieser im Zusammenhang mit Gleichung 5 explizit von der Betrachtung eines durch Bruch oder sehr große Verformung gekennzeichneten Grenzzustands ausgeht. Der Unterschied lässt sich anhand der Einwirkung Erddruck sehr gut beschreiben. Im Grenzzustand bei großen Verformungen wirkt auf ein Stützbauwerk der aktive Erddruck, im Gebrauchszustand jedoch eher ein erhöhter Erddruck oder der Erdruhedruck. Daraus folgt, dass die im Gebrauchszustand

² In Deutschland wird der Nachweis des Grenzzustands GEO nach DA2 mit GEO-2 bezeichnet.

ermittelten Einwirkungen einer FE-Berechnung prinzipiell größer sein können als nach EC 7 gefordert wird, was aber auf der sicheren Seite liegt.

Der Grenzzustand könnte durch fiktive Belastungen wie Einzelkräfte oder Momente erreicht werden (Smith et. al. 2011a und 2011b). Die Belastung wird bis zum Versagen gesteigert und anschließend werden die Einwirkungen aber auch die Widerstände für Gleichung 7 ermittelt, wobei die fiktive Belastung nicht berücksichtigt wird. Mit der Auswahl der Belastung kann eine spezielle Versagensform erzwungen werden. Damit ließe sich die Forderung des EC 7, dass mindestens die in Abbildung 2 und 3 dargestellten Formen des Versagens nachgewiesen werden müssen, erfüllen. Es ist jedoch direkt ersichtlich, dass dadurch der Aufwand für den Nachweis ansteigt und auch das Problem der realistischen Widerstandsermittlung im Grenzzustand nicht umgangen wird.

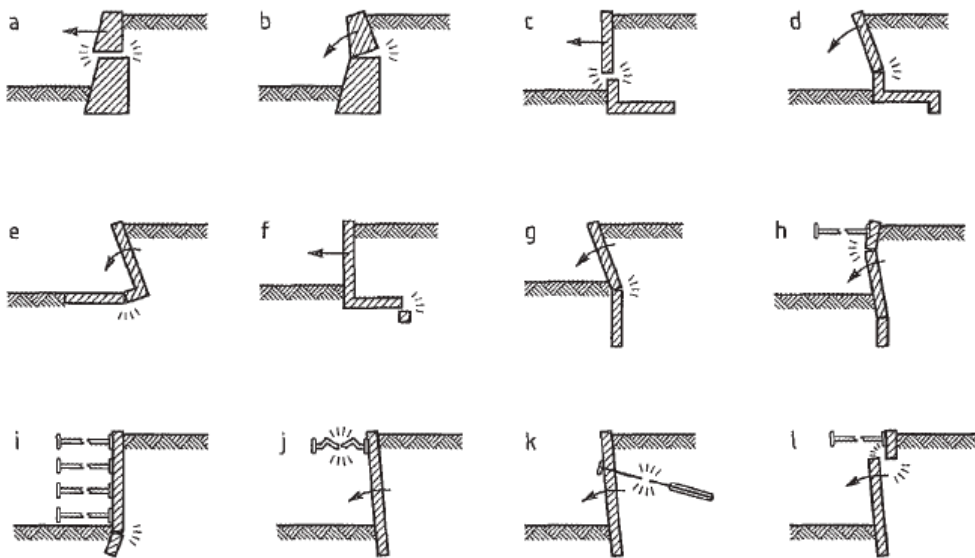


Abbildung 2: Beispiele für inneres Versagen bei Stützbauwerken (Quelle: EC 7 Teil1 Bild 9.5)
 Figure 2: Examples of limit modes for structural failure of retaining structures (image credit: EC7-1, Fig. 9.5)

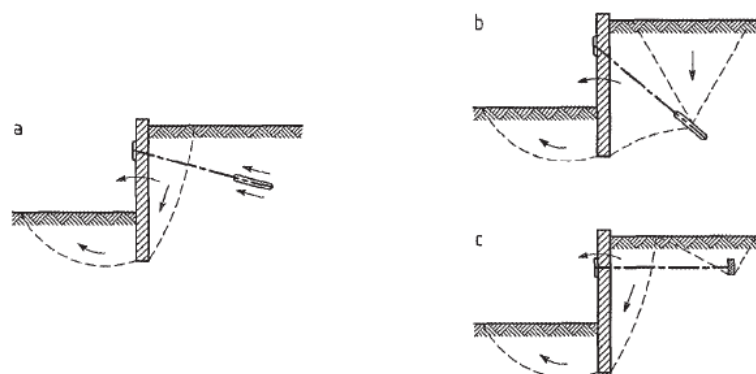


Abbildung 3: Beispiele für das Versagen von Verankerungen (Quelle: EC 7 Teil1 Bild 9.6)
 Figure 3: Examples of limit modes for failure by pull-out of anchors (image credit: EC7-1, Fig. 9.6)

2.2.3 DA3

Wie schon unter 2.1 erwähnt, ist die Durchführung einer numerischen Berechnung nach dem Nachweiskonzept DA3 bzw. MFA einfach. Im Prinzip müsste nur nachgewiesen werden, dass mit abgeminderten Materialkennwerten noch ein Gleichgewicht erreicht wird. Soll jedoch im Bruchzustand gerechnet oder ein Ausnutzungsgrad bestimmt werden, müssen die Materialkennwerte solange abgemindert werden, bis ein Grenzzustand eintritt. Dabei ergibt sich die Frage, inwieweit neben den Bodenkennwerten auch die Eigenschaften der Strukturelemente verschlechtert werden müssen. Bei einer solchen FE-Berechnung ergibt sich automatisch eine maßgebliche Versagensform. Es ist deshalb nicht möglich andere Versagensformen nach Abbildung 2 und 3 separat zu betrachten. Hier ist natürlich zu hinterfragen, ob es nicht vollständig ausreichend ist, den sich automatisch einstellenden Versagensmechanismus zu untersuchen, da die anderen ja bis zu dieser Materialkennwertreduzierung nicht aufgetreten sind. Es ist dann jedoch nicht möglich, unterschiedliche Sicherheitsbedürfnisse zu erfüllen, d. h. Gleiten, Grundbruch und Geländebruch sind mit den gleichen Teilsicherheiten nachzuweisen.

Vorbauzustände können durch eingeprägte Verformungen (z. B. Stützensenkungen) Auswirkungen auf die Belastungen haben. Bei vielen Stoffmodellen spielt zusätzlich der Spannungspfad eine bedeutende Rolle. Daraus können unterschiedliche Grenzzustände z. B. bei einer mehrfach gehaltenen Baugrubenwand in Abhängigkeit davon auftreten, ob von Beginn an in allen Bauzuständen mit abgeminderten Materialkennwerten gerechnet wird oder erst charakteristisch bis zum Erreichen des betrachteten Bauzustands gerechnet wird, um dann erst die Materialkennwerte abzumindern (Simpson 2010). Schweiger (2003) warnt in diesem Zusammenhang vor einer durchgehenden Berechnung mit Teilsicherheitsbeiwerten, „da das Zusammenwirken von Boden und Strukturteilen aufgrund der veränderten Kennwerte zu einem unrealistischen Systemverhalten führen kann“. Die sich aus MFA ergebenden Bemessungen werden nur zufällig mit bisherigen deutschen Ergebnissen nach LRFA übereinstimmen. Damit ist auch deutlich, dass die Sicherheitsbeiwerte neu festzulegen wären und nicht wie zuvor auf deutsche Erfahrungen zurückgegriffen werden kann. Das Ausland zeigt, dass mit MFA ein sicheres Bauen nicht ausgeschlossen sein muss.

So wie sich im Stahlbau durch erhöhte Einwirkungen Fließgelenke ausbilden und Verformungen einstellen, die so nicht zu erwarten sind, ergeben sich auch bei FE-Berechnungen nach DA3 keine realistischen Verformungen. Eine Besonderheit der Geotechnik ist jedoch, dass sich dadurch auch die Einwirkungen z. B. durch Umlagerungen verändern können. Eine entlastende Wirkung solcher Verformungen wurde von Grabe et. al. (2008) für eine plastisch-plastische Bemessung einer Spundwand dokumentiert. Wie sicher ist ein System, dass sich aufgrund unrealistischer Verformungen den Einwirkungen entzieht?

Ein weiteres Handikap des Nachweiskonzepts DA3 ist, dass auf die Einwirkungen aus Wasser, die häufig maßgebenden sind, keine Sicherheiten Berücksichtigung finden, da diese durch die Abminderung der Materialkennwerte nicht verändert werden. Hier müsste zusätzlich der Wasserstand erhöht (Schweiger 2010) oder die Wichte des Wassers beaufschlagt werden.

Nach dem normativen Anhang des EC 7 gibt es für die Abminderung der Materialeigenschaften nur Sicherheitsbeiwerte γ für Scherwinkel, -festigkeit, Kohäsion, Wichte und Druckfestigkeit. Die Parameter Steifigkeit und Ausgangsspannungszustand können jedoch bei Strukturelementen, abweichend zu Berechnungen nach Absatz 2.1, beeinflussen, welcher Versagens-

mechanismus sich ausbildet. Trotzdem erfolgt nach EC 7 bisher keine Beaufschlagung mit Sicherheitsbeiwerten.

Noch komplexer wird es bei Stoffmodellen, die nicht mit Scherwinkel, -festigkeit, Kohäsion und Druckfestigkeit beschrieben werden. Hier wird eine gesonderte Vorgehensweisen benötigt, um das normativ vorgegebene Sicherheitsniveau einzuhalten. Für das Hoek-Brown-Stoffmodell wird ein solches Vorgehen von Benz et. al. (2008) und für beliebige Stoffmodelle von Potts (2012) beschrieben.

2.3 Gründungen

Bei Gründungen wird im EC 7 zwischen Tief- und Flachgründungen unterschieden. Die Beanspruchungen stammen dabei überwiegend aus geotechnisch unabhängigen Einwirkungen.

2.3.1 Flachgründungen

Für Flachgründungen gibt es unterschiedliche analytische Bemessungsansätze, die zuverlässige Bemessungen erlauben. Wie schon in Abschnitt 2.2 für Stützbauwerke beschrieben, gibt es daher auch für Flachgründungen historisch bedingt verschiedenste nationale Nachweiskonzepte. Im Rahmen der aktuellen Überarbeitung des EC 7 sind hierzu keine Änderungen zu erwarten. In Deutschland ist bei der geotechnischen Bemessung das Nachweisverfahren DA2* vorgeschrieben, das wie oben beschrieben mit charakteristischen Beanspruchungen durchgeführt wird. Mit der Vorgehensweise des Hochbaus (DA2 s. Abschnitt 2.2.1), bei der die Berechnung mit Bemessungswerten der Beanspruchungen - also deutlich höheren Beanspruchungen - durchgeführt wird, könnte der Bemessungswert der Lastresultierenden bei bisher üblichen Abmessungen außerhalb des Fundamentquerschnitts liegen, was eine Bemessung unmöglich macht. Die Widerstände ergeben sich in Abhängigkeit von den Einwirkungen. Somit gelten einige der zu den Nachweiskonzepten in Abschnitt 2.2 gegebenen Hinweise hier ebenfalls. Dabei ist jedoch zu beachten, dass früher der Grundbruchnachweis nach DIN 4017:1979-08 wahlweise über die Bezugsgröße „Last“ d. h. RFA oder „Scherbeiwerte“ d. h. MFA geführt werden durfte und somit Erfahrungen auch in Deutschland vorliegen sollten.

2.3.2 Pfahlgründung

Nach Moormann (2012) erfolgt in 90 % der Ländern der europäischen Union die Bemessung von Pfahlgründungen nach DA2 bzw. DA2*. Grundlage für die Bemessung sind überwiegend Probelastungen und empirische Werte. Analytische Nachweisverfahren sind nicht zutreffend, insbesondere da die Einflüsse aus der Herstellung kaum Berücksichtigung finden. Im Rahmen einer angestrebten Harmonisierung soll LRFA europaweit festgeschrieben werden, was auch für eine numerische Nachweisführung gelten würde. Sind bei einem Einzelpfahl die Einwirkungen und Widerstände voneinander unabhängig, kann Gleichung 7 in

$$E_k \cdot \gamma_E \cdot \gamma_R \leq R_k \quad (8)$$

umgeschrieben werden, wobei das Produkt von $\gamma_E \cdot \gamma_R$ dem alten Globalen Sicherheitsbeiwert entspricht. Dieser Nachweis kann prinzipiell durch Erhöhung der Einwirkungen bis zum

Bruch für das Grenzgleichgewicht geführt werden. Ob jedoch die FEM einen realistischen Widerstand ermittelt, ist zu hinterfragen. Beeinflussen die Beanspruchungen die Widerstände, gelten auch hier die in Abschnitt 2.2 gegebenen Hinweise. Aufgrund des großen Einflusses von Mantelreibung und Dilatanz auf die Grenztragfähigkeit ist ersichtlich, dass beim MFA nicht nur der Reibungswinkel und Kohäsion mit Sicherheiten zu beaufschlagen wären.

2.4 Verankerungen

Bei Verankerungen sind die verschiedensten Ausführungsvarianten zu berücksichtigen. Bei einer „Totmannkonstruktion“ ist eine rechnerische Dimensionierung nach Abschnitt 2.3 zulässig. Der Herausziehewiderstand bei Verpressankern darf nur anhand von Versuchen oder Erfahrungswerten bestimmt werden. Für numerische Prognosen ist noch Forschungsbedarf vorhanden (Stodieck et. al. 2013).

2.5 Hydraulisches Versagen

Die Ermittlung von Strömungskräften mithilfe numerischer Verfahren für den Nachweis gegen den hydraulischen Grundbruch HYD ist sicherlich allgemein anerkannt, wird aber nicht mehr explizit in der Norm erwähnt. Der Nachweis selbst wird üblicherweise analytisch mit dem Versagensmodell von Terzaghi durchgeführt. Es ist zu bezweifeln, dass die Kontinuumsmechanik in der Lage ist, die hierbei für die Standsicherheit maßgeblichen makroskopischen Vorgänge in einem Kornhaufwerk realistisch abzubilden (Heibaum et. al. 2008). Vorschläge, wie eine numerische Bemessung erfolgen könnte, die einen solchen Grenzzustand umgeht, werden von Odenwald et. al. (2013) vorgestellt.

3 Bewertung

Die beschriebenen Vor- und Nachteile der Nachweisverfahren DA1 bis DA3 bzw. MFA und LRFA gelten zumeist sowohl für analytische und als auch numerische Berechnungen. Bei analytischen Berechnungen können Defizite jedoch mit Erfahrungen ausgeglichen werden. Die technische Umsetzung der Nachweisverfahren mit der FEM ergeben neue Anreize. Soll der Nachweis vollständig mit der FEM geführt werden, ist dies mit der MFA anscheinend am einfachsten umzusetzen, weshalb dieses Nachweisverfahren bei den FEM-Anwendern sehr beliebt ist. Wie Materialeigenschaften von Strukturelementen abgemindert werden müssen und wie duktilen Verhalten (z. B. Knicken) ausgeschlossen werden kann, ist dabei noch nicht geklärt. Für Deutschland würde die Verwendung der MFA bedeuten, dass sich in einigen Fällen andere Bemessungen ergeben und somit der vorhandene Erfahrungsschatz verlassen würde. Andererseits ist beim deutschen Weg DA2* bzw. LRFA die Einbeziehung von numerisch berechneten Widerständen im Grenzzustand schwierig umzusetzen. Somit müsste sich hier etwas ändern, um Fortschritte bei der numerischen Prognose von Widerständen im Grenzzustand berücksichtigen zu können. Daher bleibt nur, Erfahrungen mit der MFA zu sammeln oder neue Techniken zur Umsetzung der LRFA mit FEM zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

- [1] Benz, T.; Schwab, R.; Kautner, R. A.; Vermeer, P. A. (2008): A Hoek-Brown criterion with intrinsic material strength factorization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, pp. 210-222.
- [2] EAB (2012): EB 103: Anwendung der Finite-Elemente-Methode, Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ernst & Sohn, 5. Auflage, S. 72-77
- [3] Grabe, J.; Schümann, B.; Katzmann, A. (2008): Zur plastisch-plastischen Berechnung von Baugrubenwänden, BAW-Kolloquium - Anwendung der Finiten-Elemente-Methode im Grundbau
- [4] Heibaum, M.; Herten, M. (2007): Finite-Elemente-Methode für geotechnische Nachweise nach neuer Normung? *Bautechnik* 84, Heft 9, S. 627-635
- [5] Hettler, A.; Schanz, T. (2008): Zur Anwendung der Finiten-Elemente-Methode bei Baugrubenwänden, *Bautechnik* 85, Heft 9, S. 603-615
- [6] Heibaum (2012): Die Umstellung auf den Eurocode 7, BAW-Kolloquium „Neue Normen und Regelwerke in der Geotechnik“, S. 1-7
- [7] Heibaum, M.; Herten, M. (2008): Zuschriften zu Perau, E.: Konzept und FE-Modellierung zum Nachweis der erforderlichen Ankerlängen, *Bautechnik* 85, Heft 4, S. 247-257
- [8] Moormann, C. (2013): Entwicklungsperspektiven in der europäischen Pfahlnormung - zwischen Regelungsbedarf und praxisingerechten Regelwerken, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 96, S. 365-395
- [9] Odenwald, B.; Stelzer, O. (2013): Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch mit FEM auf Grundlage des EC 7, Workshop „Bemessen mit numerischen Methoden“, TUHH
- [10] Potts, D. M.; Zdravkovic, L. (2012): Accounting for partial material factors in numerical analysis, *Géotechnique*, Volume 62, Issue 12, September, pages 1053 –1065
- [11] Schanz, T. (2006): Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ Abschnitte 4 incl. Beiblätter, *Geotechnik* 29, Nr. 1
- [12] Schweiger, H. F. (2000): Ergebnisse des Berechnungsbeispiels Nr. 3 "3-fach verankerte Baugrube" - Gegenüberstellung der eingesandten Berechnungsergebnisse. Beiträge zum Workshop "Verformungsprognose für tiefe Baugruben" am 16. und 17. März 2000, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Arbeitskreis 1.6 "Numerik in der Geotechnik", Stuttgart, S. 7 – 67
- [13] Schweiger, H. F. (2003): Standsicherheitsnachweise für Böschungen und Baugruben mittels FE-Methode durch Abminderung der Scherfestigkeit, Workshop: Nachweis für

Böschungen und Baugruben mit numerischen Methoden, Bauhaus-Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 11

- [14] Schweiger, H. F. (2010): Design of deep excavations with FEM - Influence of constitutive model and comparison of EC7 design approaches, Proc. Of the 2010 Earth Retention Conference, Bellevue, WA, USA, 804-817
- [15] Simpson, B.; Hocombe, T. (2010): Implications of modern design codes for earth retaining structures, Proc. Of the 2010 Earth Retention Conference, Bellevue, WA, USA, 786-803
- [16] Smith, C.; Gilbert, M. (2011a): Ultimate Limit State design to Eurocode 7 using numerical methods Part I: methodology and theory. Ground Engineering, Ground Engineering, October, pp 25-30
- [17] Smith, C.; Gilbert, M. (2011b): Ultimate Limit State design to Eurocode 7 using numerical methods Part II: proposed design procedure and application. Ground Engineering, November, pp 24-29
- [18] Stodieck, X.; Benz, T. (2013): Cement grout filtration in non-cohesive soils, Installation Effects in Geotechnical Engineering, Rotterdam, March, Balkema Book
- [19] v. Wolffersdorff, P. A. (2008): Wie soll die FEM in geotechnische Bemessungsvorschriften einfließen? Workshop „Bemessen mit Finite-Elemente-Methode“ TU Hamburg-Harburg, Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik, Nr. 14, S. 133-144
- [20] Weißenbach, A.; Hettler, A. (2011): Baugruben Berechnungsverfahren, Finite-Elemente-methode, Ernst & Sohn, 2. Auflage, S. 211-224

Autor

Dr.-Ing. Markus Herten
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721 - 9726 / 3830
Fax: +49 (0) 721 - 9726 / 4830
e-mail: markus.herten@baw.de
Web: www.baw.de