

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Schuppener, Bernd**

## **Das Normen-Handbuch zu Eurocode 7 und DIN 1054:2010**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102571>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schuppener, Bernd (2011): Das Normen-Handbuch zu Eurocode 7 und DIN 1054:2010. In: BAWMitteilungen 94. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 19-34.

### **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.



# Das Normen-Handbuch zu Eurocode 7 und DIN 1054:2010 – Grundlagen für geotechnische Nachweise im Verkehrswasserbau

## *The Handbook for Eurocode 7 and DIN 1054:2010 – Basics for Geotechnical Verification in Waterway Engineering*

Dr.-Ing. Bernd Schuppener, Bundesanstalt für Wasserbau

Der Eurocode 7 „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“ liegt mit seinem Teil 1 als DIN EN 1997-1 „Allgemeine Regeln“ seit 2004 in deutscher Sprache vor. Der Inhalt des Eurocodes deckt sich zum Teil mit der DIN 1054:2005-1 „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“. Die Regeln der Europäischen Union verlangen, dass nach einer Übergangsperiode alle deutschen Normen zurückgezogen werden müssen, die Regelungen der Eurocodes enthalten. Es wird dargestellt, welche inhaltlichen und formalen Anpassungen in der DIN 1054 erforderlich werden, um die speziellen deutschen Erfahrungen im Erd- und Grundbau zu erhalten. Zur anwenderfreundlicheren Nutzung werden der Eurocode 7-1 und die zwei nationalen Normen, der Nationale Anhang zum Eurocode und die überarbeitete DIN 1054:2010-12: „Ergänzenden Regelungen zu DIN EN 1997-1“ in einem Normen-Handbuch zusammengefasst. Es wird beschrieben, welche neuen Regelungen mit den Eurocodes in die deutsche geotechnische Bemessungspraxis eingeführt werden.

*Since 2004, the first part (“General rules”) of Eurocode 7 “Geotechnical design” has been available as DIN EN 1997-1 in German language. The content is partially identical with DIN 1054:2005-1 „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ (“Ground – Verification of the safety of earthworks and foundations”). EU legislation requires all German norms to be withdrawn after a transition phase, including Eurocode regulations. This paper illustrates which adaptations of DIN 1054 concerning content and format will be necessary to preserve the specific German experiences on earthwork and foundations. Eurocode 7-1 and the two national norms, the national appendix to the Eurocode and the revised DIN 1054:2012 „Ergänzenden Regelungen zu DIN EN 1997-1“ (“Supplementary Regulations to DIN EN 1997-1”) have been merged in a user-*

*friendly handbook. This paper describes which new regulations included in the Eurocodes will be introduced to the German practice of geotechnics.*

### 1 Einleitung *Introduction*

Der Eurocode 7 „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“ - Teil 1 „Allgemeine Regeln“ [1] (EC 7-1) wird in Deutschland die DIN 1054 „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ [2] als geotechnische Grundnorm ablösen. Damit wird in der Geotechnik wie auch in den anderen Bereichen des Bauingenieurwesens das globale Sicherheitskonzept durch das Konzept der Grenzzustände und der Teilsicherheitsbeiwerte der Eurocodes ersetzt. Allerdings können die speziellen deutschen Erfahrungen im Erd- und Grundbau der DIN 1054 [2] erhalten bleiben, soweit sie nicht mit den Eurocodes konkurrieren oder ihnen widersprechen. Dazu wurde die DIN 1054 [2] inhaltlich überarbeitet und formal an den EC 7-1 [1] angepasst, damit ein in sich stimmiges und nutzerfreundliches Normenwerk für die geotechnische Bemessung entsteht.

### 2 Zusammenführung von europäischen und nationalen Normen *Merging of European and national norms*

In Deutschland lagen zur Bemessung in der Geotechnik zum einen

- die DIN EN 1997-1 - Eurocode 7: „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“ - Teil 1: „Allgemeine Regeln“ (EC 7-1) [1] und zum anderen

- die DIN 1054:2005-01: „Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ [2]

vor. In Bild 1 ist der Inhalt des EC 7-1 [1] und der DIN 1054 [2] durch zwei sich überschneidende Kreisflächen dargestellt, weil der größte Teil der Regelungen der beiden Normen gleich ist. Die Schnittmenge enthält die wichtigsten und grundlegenden Festlegungen, z. B. die Definition der Grenzzustände und das Teilsicherheitskonzept.

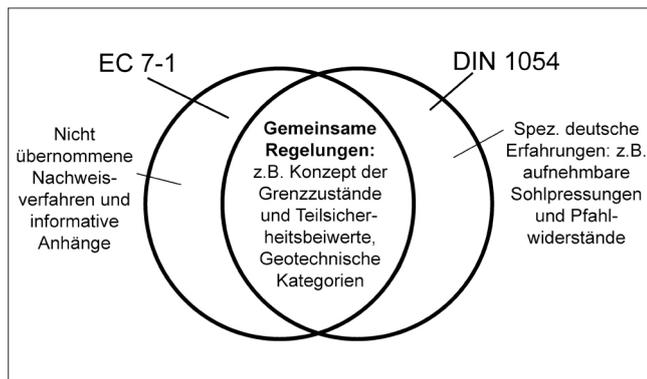


Bild 1: Regelungsbereiche des Eurocodes EC 7-1 [1] und der DIN 1054 [2]

Figure 1: Regulated areas of Eurocode EC 7-1 [1] and DIN 1054 [2]

Daneben gibt es eine Reihe von Festlegungen im EC 7-1 [1], die nicht in der DIN 1054 [2] enthalten sind. Dazu gehören z. B. die Nachweisverfahren, die in Deutschland nicht angewendet werden und die informativen Anhänge mit erdstatischen Berechnungsverfahren, für die es deutsche Normen gibt. Als letzter, aber wichtigster ist der Bereich der DIN 1054 [2] zu erwähnen, der nicht im EC 7-1 [1] enthalten ist. Dieser Bereich umfasst alle speziellen deutschen Erfahrungen, die natürlich auch in Zukunft weiter genutzt werden sollen, wie z. B. die bisherigen Tabellen für Sohldruckspannungen für Flachgründungen.

Bei der Zusammenführung von Eurocodes und nationalen Normen waren folgende Grundsätze zu beachten:

- Die Eurocodes sind vollständig mit allen informativen Anhängen von allen Mitgliedsstaaten einzuführen.
- Nationale Normen sind weiterhin zulässig, aber
- nationale Normen dürfen weder europäischen Normen widersprechen noch mit ihnen konkurrieren.
- Nationale Normen, für die es europäische Normen gibt, sind nach einer Übergangsfrist zurückzuziehen.

Um die Eurocodes anwendbar zu machen und sie mit den nationalen Normen zu verbinden, waren in den europäischen Staaten so genannte Nationale Anhänge zu erstellen. Wegen ihrer besonderen Bedeutung hat die Europäische Kommission in dem „Leitpapier L – Anwendung der Eurocodes“ [3] Vorschriften darüber erlassen, was in den Nationalen Anhang aufzunehmen ist. Dabei werden im Abschnitt 2.3.4 des Leitpapiers dem nationalen Entscheidungsspielraum enge Grenzen gesetzt:

*„Ein nationaler Anhang kann den Inhalt eines EN Eurocodes in keiner Weise ändern, außer wo angegeben wird, dass eine nationale Wahl mittels national festzulegender Parameter vorgenommen werden kann.“*

Nach Abschnitt 2.3.3 des Leitpapiers L [3] darf ein Nationaler Anhang Folgendes enthalten:

- Die Zahlenwerte für die national zu bestimmenden Parameter (z. B. die Teilsicherheitsbeiwerte),
- die Entscheidung über die anzuwendenden Nachweisverfahren, wenn mehrere zur Wahl gestellt werden,
- die Entscheidung bezüglich der Anwendung informativer Anhänge und
- Verweise auf nicht widersprechende zusätzliche Angaben, die dem Anwender beim Umgang mit dem Eurocode helfen.

Der Nationale Anhang selbst darf also keine zusätzlichen nationalen normativen Regelungen enthalten. Sie sind in nationalen Normen niederzulegen, auf die im Nationalen Anhang verwiesen wird. In der Geotechnik wäre es am einfachsten gewesen, wenn man auf die DIN 1054 [2] hätte verweisen können. Dies war allerdings nicht möglich, da die DIN 1054 [2] und der EC 7-1 [1] zum großen Teil inhaltlich gleich sind. Die DIN 1054 [2] ist daher eine mit dem EC 7-1 [1] konkurrierende nationale Norm, die nach einer Übergangsfrist zurückzuziehen war.

Um die speziellen deutschen Erfahrungen der DIN 1054 [2] zu erhalten, musste sie überarbeitet werden, indem alle Regelungen gestrichen wurden, die schon im Eurocode 7 enthalten sind. Die so überarbeitete DIN 1054 [4] mit dem neuen Titel „Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1“ stellt keine Konkurrenz mehr zum Eurocode dar. Sie ist eine nationale Ergänzung.

Nach dieser Überarbeitung gibt es seit Ende 2010 für die Bemessung in der Geotechnik drei Normen:

- Den Eurocode 7-1 (DIN EN 1997-1) [1],
- die DIN 1054:2010-12 „Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1“ [4] und
- den Nationalen Anhang zu Eurocode 7-1 [5].

Diese drei Normen sind natürlich alles andere als anwenderfreundlich, denn der Nutzer muss bei der Arbeit immer drei Dokumente im Auge haben. Deshalb hat sich der zuständige Ausschuss dazu entschlossen, alle drei Normen im „Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln“ [6] zusammenzufassen. Solche Normen-Handbücher wird es auch für die Eurocodes der anderen Fachbereiche des Bauingenieurwesens geben.

Der Kern des „Handbuchs Eurocode 7“ [6] ist der EC 7-1 [1], in den die ergänzenden deutschen Regelungen der DIN 1054 [4] und die Hinweise und Erläuterungen des Nationalen Anhangs [5] hinter den entsprechenden Textstellen des EC 7-1 [1] eingefügt wurden. Dabei sind die ergänzenden Regelungen der DIN 1054 [4] einschließlich der Tabellen und Zeichnungen durch ein vorgesetztes „A“ und die Hinweise und Erläuterungen

des Nationalen Anhangs durch „NA zu ...“ gekennzeichnet.

Mit der bauaufsichtlichen Einführung der Eurocodes zum 1. Juli 2012 gilt damit folgende Normenhierarchie, hier dargestellt am Beispiel des Verkehrswasserbaus (Bild 2).

An der Spitze der europäischen Baunormen stehen DIN EN 1990: „Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] und DIN EN 1991: „Eurocode 1: Einwirkungen auf Bauwerke“ [8] mit mehreren Teilen und Anhängen. Sie sind Grundlage für die Bemessung im gesamten Bauwesen Europas. Auf diese beiden Grundnormen beziehen sich alle anderen 8 Eurocodes mit insgesamt 58 Teilen.

Die nationalen Anhänge stellen die Verbindung zwischen den Eurocodes und den nationalen Normen her wie z. B. zu der neuen DIN 1054 [4], der DIN 4084 [9], der EAU [10], der EAB [11] oder dem MSD [12]. Es versteht sich, dass auch alle anderen nationalen geotechnischen Normen dem Eurocode angepasst werden müssen. In der Regel sind das keine technischen Änderungen, sondern in erster Linie Anpassungen an die Nomenklatur und die Form der Standsicherheitsnachweise.

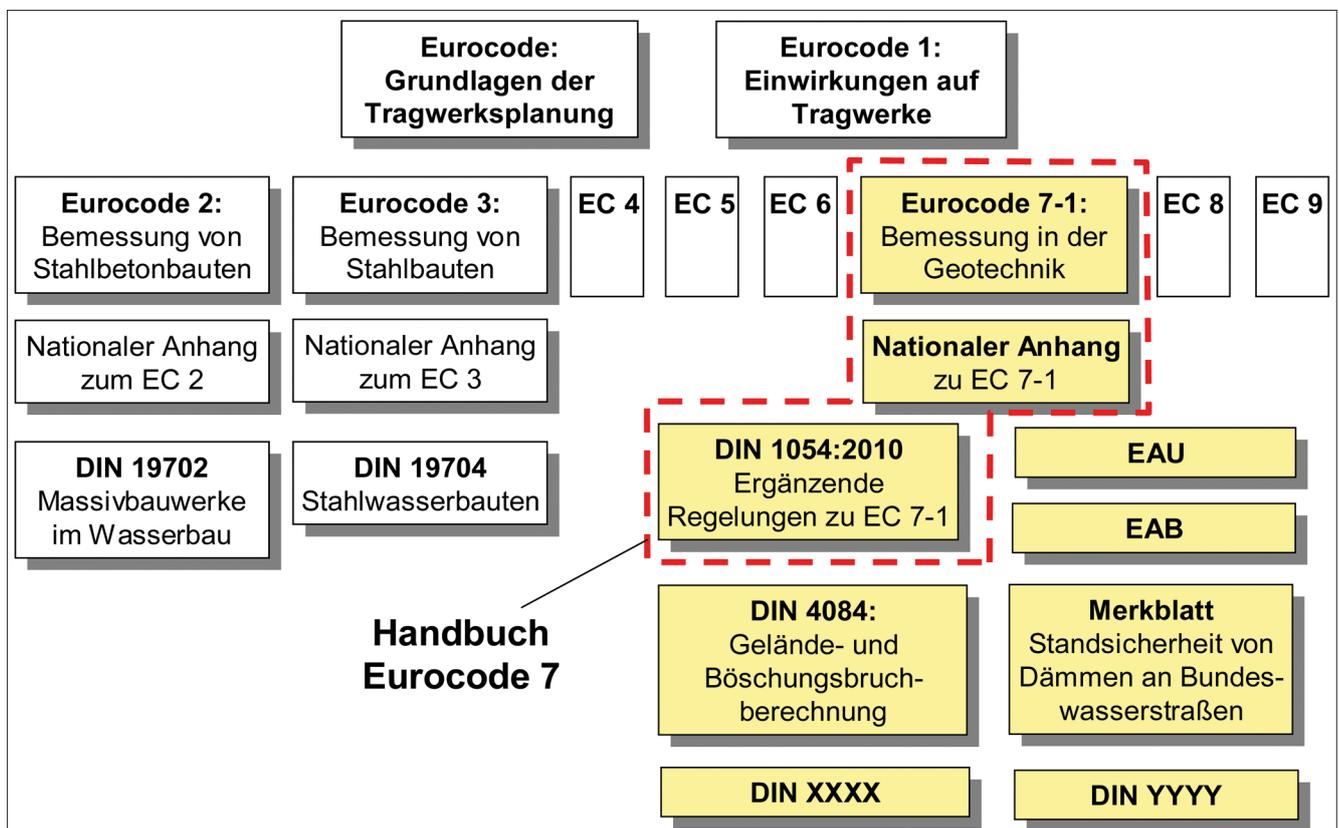


Bild 2: Normenhierarchie im Bauwesen am Beispiel des Verkehrswasserbaus

Figure 2: Hierarchy of civil engineering norms; example shown above: waterway engineering

### 3 Neue Regelungen des Eurocode 7-1 und der DIN 1054

#### *New regulations of Eurocode 7-1 and DIN 1054*

#### 3.1 Bemessungssituationen

##### *Design situations*

Der Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] unterscheidet folgende Bemessungssituationen: Ständige, vorübergehende, außergewöhnliche und bei Erdbeben. Die Bemessung hinsichtlich der Zuverlässigkeit, d. h. der erforderlichen rechnerischen Sicherheit des Bauwerks wird von diesen Situationen abhängig gemacht. Die ständige Bemessungssituation kann von einer vorübergehenden, besser überwachten Situation unterschieden werden. Nach einer außergewöhnlichen Situation darf ein Bauwerk gegebenenfalls auch begrenzte Schäden aufweisen. Innerhalb der Bemessungssituationen sind kritische Lastfälle festzulegen, z. B. Anordnungen veränderlicher Einwirkungen und Berücksichtigung von Imperfektionen und Verformungen, die gleichzeitig mit den ständigen und veränderlichen Einwirkungen anzusetzen sind.

Im EC 7-1 [1] sind die ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen zusammengefasst, wobei gemeinsame Teilsicherheitsbeiwerte für beide Bemessungssituationen empfohlen werden. Allerdings wird den nationalen Normungsgremien freigestellt geringere Werte bei Tragwerken für vorübergehende Zwecke oder bei vorübergehenden Bemessungssituationen anzusetzen, „wenn die möglichen Folgen das rechtfertigen“ (EC 7-1 [1], 2.4.7.1 (5)). Mit dieser Begründung wurde in Deutschland die Unterscheidung zwischen ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen beibehalten.

Der EC 7-1 [1] beschränkt sich in seinen Regelungen auf ständige und vorübergehende Bemessungssituationen. Für außergewöhnliche Situationen empfiehlt er, dass „*alle Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen ... in der Regel gleich 1,0 gesetzt werden. Alle Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände sollten dann entsprechend den besonderen Umständen der außergewöhnlichen Situation gewählt werden.*“ (EC 7-1 [1], 2.4.7.1 (3)).

Die DIN 1054 [4] unterscheidet sich daher vom EC 7-1 [1] als sie

- für die geotechnische Bemessung eine vorübergehende Bemessungssituation BS-T definiert und
- Teilsicherheitsbeiwerte für die drei Bemessungssituationen, die ständige, die vorübergehende und die außergewöhnliche angibt, wobei die Bemessungssituationen BS-P, BS-T und BS-A weitgehend den bisherigen drei Lastfällen entsprechen.

Die ständigen Situationen, die den üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen, werden der Bemessungssituation BS-P zugeordnet. Hierbei werden ständige und während der Funktionszeit des Bauwerks regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen berücksichtigt.

Die Bemessungssituation BS-T ist den vorübergehenden Situationen zugeordnet, die sich auf zeitlich begrenzte Zustände beziehen, z. B. auf

- Bauzustände bei der Herstellung eines Bauwerks,
- Bauzustände an einem bestehenden Bauwerk, z. B. bei Reparaturen oder infolge von Aufgrabungs- oder Unterfangungsarbeiten und
- Baumaßnahmen für vorübergehende Zwecke, z. B. Baugrubenböschungen und Baugrubenkonstruktionen, soweit z. B. für Steifen, Anker und Mikropfähle, nichts anderes festgelegt ist.

Den Situationen, die sich auf außergewöhnliche Bedingungen des Tragwerks oder seiner Umgebung beziehen, z. B. auf Feuer, Explosion, Anprall, außergewöhnliches Hochwasser oder Ankerausfall, wird die Bemessungssituation BS-A zugeordnet. Hierbei wird neben den ständigen und regelmäßig auftretenden veränderlichen Einwirkungen der Bemessungssituationen BS-P oder BS-T eine außergewöhnliche Einwirkung berücksichtigt.

Die Tabellen A 2.1 bis A 2.3 der DIN 1054 [4] enthalten die Teilsicherheitsbeiwerte für die Nachweise der unterschiedlichen Grenzzustände der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von den Bemessungssituationen.

### 3.2 Das Konzept der Grenzzustände

#### *The concept of the limit states*

#### 3.2.1 Einführung

##### *Introduction*

Mit den Eurocodes ist in den deutschen Normen das Konzept der Grenzzustände und Teilsicherheiten übernommen worden. Der Begriff des Grenzzustandes ist allgemein gefasst und bezeichnet den Zustand eines Tragwerks, bei dessen Überschreitung die zu Grunde gelegten Anforderungen überschritten werden.

Im EC 7-1 [1] wird der Nachweis für folgende zwei Grenzzustände gefordert:

- Der Grenzzustand der Tragfähigkeit ist der Zustand des Tragwerks, dessen Überschreiten zu einem rechnerischen Einsturz oder anderen Formen des Versagens führt.
- Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist der Zustand des Tragwerks, dessen Überschreiten die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt.

Der Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] und der EC 7-1 [1] unterscheiden für den Bereich der Geotechnik und des Konstruktiven Ingenieurbaus fünf Grenzzustände der Tragfähigkeit:

- EQU: Verlust der Lagesicherheit des als starrer Körper angesehenen Bauwerks oder des Baugrunds, wobei die Festigkeiten der Baustoffe und des Baugrunds für den Widerstand nicht entscheidend sind.

In der Geotechnik wird er beim Nachweis des Kippens angewendet, wobei der Baugrund als starr angesehen wird.

- STR: inneres Versagen oder sehr große Verformung des Bauwerks oder seiner Bauteile, einschließlich der Fundamente, Pfähle, Kellerwände usw., wobei die Festigkeit der Baustoffe für den Widerstand entscheidend ist.
- GEO: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit des Baugrunds für den Widerstand entscheidend ist.
- UPL: Verlust der Lagesicherheit des Bauwerks oder Baugrunds infolge Aufschwimmens (Auftrieb) oder anderer vertikal aufwärts gerichteter Einwirkungen.
- HYD: hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping im Boden, verursacht durch Strömungskräfte.

Die Eurocodes machen diese Unterschiede in den Grenzzuständen, weil die verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte und auch z. T. die Nachweisverfahren unterschiedlich sind. Eine Gegenüberstellung der Abkürzungen der Grenzzustände des EC 7-1 [1] und der alten DIN 1054 [2] von 2005 findet sich in der Tabelle 1.

#### 3.2.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit

##### *Ultimate limit states*

Den Eurocodes verdanken wir, dass im gesamten Bauwesen in ganz Europa in Zukunft die rechnerischen Nachweise für Grenzzustände der Tragfähigkeit im gleichen Format durchgeführt werden. Bei den rechnerischen Nachweisen ist – vereinfacht dargestellt – nachzuweisen, dass der Bemessungswert der Bean-

EC 7-1 [1] und DIN 1054 [4]	DIN 1054 [2]
Verlust der Lagesicherheit (EQU)	Verlust der Lagesicherheit (GZ1A)
Aufschwimmen (UPL)	
Hydraulischer Grundbruch (HYD)	
Versagen oder sehr große Verformungen des Tragwerks oder seiner Teile, wobei die Tragfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen entscheidend ist (STR)	Versagen von Bauwerken und Bauteilen durch Bruch im Bauwerk oder des stützenden Baugrundes (GZ1B)
Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit des Baugrunds für den Widerstand entscheidend ist. (GEO)	Grenzzustand des Verlusts der Gesamtstandsicherheit (GZ1C)

Tabelle 1: Grenzzustände der Tragfähigkeit  
 Table 1: *Ultimate limit states*

spruchungen  $E_d$  nicht größer wird als der Bemessungswert des Widerstands  $R_d$  eines Bauwerks oder Bauteils:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Diese Nachweisform setzt voraus, dass man klar zwischen den Beanspruchungen und den Widerständen unterscheiden kann. Im konstruktiven Ingenieurbau ist das auch eigentlich immer möglich. Man ermittelt die Beanspruchungen in der statischen Berechnung, z. B. die Schnittgrößen, und die Widerstände ergeben sich aus der Querschnittsgeometrie, z. B. eines Balkens und der Festigkeit des Balkenmaterials. In der Geotechnik ist diese klare Trennung von Beanspruchungen und Widerständen in vielen Fällen nicht möglich. Z. B. ist der aktive Erddruck – eine Beanspruchung – abhängig von der Festigkeit des Bodens, also von seinem Widerstand. Umgekehrt ist z. B. der Gleitwiderstand abhängig von der Größe der Beanspruchung durch die Normalkraft auf die Gleitfläche. Diese Wechselwirkung zwischen Beanspruchungen und Widerständen ist auf das Reibungsverhalten des Bodens zurückzuführen.

Es gibt daher zwei verschiedene Möglichkeiten, wie man die Bemessungswerte der Beanspruchungen und Widerstände im Boden beschreiben kann.

- Bei dem Verfahren der faktorisierten Beanspruchungen und Widerstände wird der Bemessungswert  $E_d$  der Beanspruchungen ermittelt, indem der charakteristische Wert  $E_k$  der Beanspruchungen mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_E$  für die Beanspruchungen multipliziert wird. Der Bemessungswert  $R_d$  des Widerstandes ergibt sich, indem der charakteristische Wert  $R_k$  des Widerstands eines Bauwerks oder Bauteils durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_R$  für den Widerstand dividiert wird:

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

$$E_k \cdot \gamma_E \leq R_k / \gamma_R \quad (3)$$

Die Sicherheitsphilosophie des Konzepts der Grenzzustände und Teilsicherheitsbeiwerte ist also ganz simpel: Die charakteristischen Widerstände des Bauwerks oder Bauteils werden durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_R$  für die Widerstände dividiert und dadurch vermindert, und die charakteristischen Beanspruchungen werden mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_E$  für die Beanspruchungen (oder Einwirkungen) multipliziert und damit erhöht. Dann wird

überprüft, ob der Bemessungswert der Beanspruchungen den Bemessungswert des Widerstands nicht überschreitet.

- Bei dem Verfahren mit den faktorisierten Scherparametern werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherparameter angewendet. Den Bemessungswert  $\tan \varphi_d$  des Reibungsbeiwerts erhält man, indem der charakteristische Reibungsbeiwert  $\tan \varphi_k$  durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_j$  für die Reibung geteilt wird und den Bemessungswert  $c'_d$  für die Kohäsion erhält man, indem der charakteristische Wert der Kohäsion  $c'_k$  durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c$  für die Kohäsion dividiert wird. Mit den Bemessungswerten der Scherparameter werden dann die Bemessungswerte der Beanspruchungen und Widerstände des Baugrunds bestimmt.

$$E_d \leq R_d \quad (4)$$

$$E_d (\varphi'_d, c'_d) \leq R_d (\varphi'_d, c'_d) \quad (5)$$

Wenn im Boden keine Festigkeit, d. h. kein Widerstand mobilisiert wird (wie bei den Grenzzuständen EQU, UPL, HYD), kann der Grenzzustand nicht wie sonst mit Widerständen und Beanspruchungen beschrieben werden. In der Grenzzustandsbedingung werden daher stattdessen die Bemessungswerte der ungünstigen, destabilisierenden Beanspruchungen  $E_{dst,d}$  mit den günstigen, stabilisierenden Beanspruchungen  $E_{stb,d}$  verglichen. Die Grenzzustandsbedingung fordert dann, dass die Bemessungswerte der ungünstigen, destabilisierenden Beanspruchungen nicht größer werden als die Bemessungswerte der günstigen, stabilisierenden Einwirkungen:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} \quad (6)$$

$$E_{G,dst,k} \cdot \gamma_{G,dst} + E_{Q,dst,k} \cdot \gamma_{Q,dst} \leq E_{G,stb,k} \cdot \gamma_{G,stb} \quad (7)$$

Die Bemessungswerte der Einwirkungen ergeben sich aus den charakteristischen Werten  $E_{G,dst,k}$  und  $E_{Q,dst,k}$  der ständigen und veränderlichen destabilisierenden Beanspruchungen sowie der ständigen stabilisierenden Beanspruchungen  $E_{G,stb,k}$ , die mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{G,dst}$  und  $\gamma_{Q,dst}$  für die destabilisierenden ständigen und veränderlichen Beanspruchungen bzw. mit  $\gamma_{G,stb}$  für die stabilisierenden ständigen Beanspruchungen multipliziert werden (siehe dazu auch die Abschnitte 3.5 „Grenzzustand des Aufschwimmens“ und 3.6 „Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping“).

### 3.2.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit *Serviceability limit states*

Alle Grenzzustände, die

- die Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen
- oder das Wohlbefinden der Nutzer oder
- das Aussehen des Bauwerks

betreffen, sind als Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit einzustufen (siehe Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7], 3.4, (1) (P)). Dabei wird beim „Aussehen“ auf große Durchbiegungen und ungewollte Rissbildung Bezug genommen und nicht auf Gesichtspunkte des optischen oder des architektonischen Erscheinungsbildes.

Der EC 7-1 [1] fordert, dass für alle Bemessungssituationen sichergestellt sein muss, dass kein Grenzzustand überschritten wird (siehe 2.1 (1) P). Der rechnerische Nachweis einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit wird mit der Grenzzustandgleichung

$$E_d \leq C_d \quad (8)$$

geführt (Gleichung 2.10 in 2.4.8 (1) P), wobei  $E_d$  der Bemessungswert einer Auswirkung von Einwirkungen (z. B. einer rechnerischen Fundamentbewegung) und  $C_d$  der Bemessungswert des maßgebenden Gebrauchstauglichkeitskriteriums ist (z. B. zulässige Fundamentbewegungen). In der Regel werden die Teilsicherheitsbeiwerte beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit gleich 1,0 gesetzt. Die Gebrauchstauglichkeitskriterien sind für jedes Projekt besonders zu vereinbaren. Grenzwerte für Bauwerksverformungen und Fundamentbewegungen enthält der Anhang H des EC 7-1 [1]. Insbesondere bei setzungsempfindlichen Bauwerken sind die Gebrauchstauglichkeitskriterien so realistisch wie möglich und in enger Abstimmung mit dem konstruktiven Ingenieur festzulegen, der die Auswirkungen der Setzungen auf das Bauwerk beurteilen muss. Unnötig konservative Werte führen zu unwirtschaftlichen Abmessungen. Andererseits muss gewährleistet sein, dass die Sicherheit des Bauwerks nicht möglicherweise durch Verformungen des Baugrunds gefährdet wird, ohne dass im Baugrund selbst ein Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht ist.

Für die Ermittlung von Verformungen zur Überprüfung von Gebrauchstauglichkeitskriterien eignen sich numerische Berechnungsmethoden (z. B. FEM) wesentlich besser als herkömmliche Verfahren. Voraussetzung ist natürlich ein geeignetes Stoffgesetz, das das Verhalten des Bodens wirklichkeitsgetreu wiedergibt. Insbesondere bei nichtlinearem Bodenverhalten ergeben sich bessere Ergebnisse. Eine Kalibrierung der Modelle an Messergebnissen, z. B. aus Teilbauständen, verbessert die Prognosen erheblich. Verschiedene jüngere Untersuchungen betonen allerdings die Notwendigkeit der Berücksichtigung der erhöhten Steifigkeit bei kleinen Dehnungen, um wirklichkeitsnahe Prognosen zu erhalten. Für die Ermittlung von Setzungen als Gebrauchstauglichkeitskriterium gilt allerdings weiterhin die DIN V 4019-100 „Baugrund – Setzungsberechnungen“ [13].

## 3.3 Grenzzustand des Versagens des Baugrunds (GEO)

### *Limit state GEO: failure of the ground*

#### 3.3.1 Einleitung *Introduction*

In dem zuständigen europäischen Ausschuss wurde lange darum gerungen, welche der Formulierungen der Grenzzustandsgleichung für die verschiedenen geotechnischen Nachweise für den Grenzzustand des Versagens des Baugrunds (GEO) im EC 7-1 [1] aufgenommen werden soll. Das Ergebnis der langen und kontroversen Debatte war, dass eine Einigung auf eine gemeinsame und einheitliche Formulierung nicht möglich war. Als Kompromiss einigte man sich darauf, dass im EC7-1 [1] drei verschiedene Möglichkeiten zur Wahl gestellt werden, nach denen die Standsicherheitsnachweise und die Bemessung in der Geotechnik durchgeführt werden können. Die drei Nachweisverfahren des EC 7-1 [1] unterscheiden sich darin, wie und wann die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Widerstände mit Teilsicherheitsbeiwerten belegt werden. In Deutschland kommen nur die Verfahren 2 und 3 zur Anwendung.

Das Verfahren 2, das auch schon in der DIN 1054 [1] von 2005 für die Bemessung von Gründungen verwendet wurde, beruht auf dem Verfahren mit faktorisierten

Einwirkungen und Widerständen. Dabei werden die Einwirkungen oder die Beanspruchungen sowohl des Bauwerks als auch des Bodens mit den gleichen Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt, wie sie im gesamten Bauingenieurwesen verwendet werden. Beim Verfahren 2 können die Teilsicherheitsbeiwerte entweder gleich zu Beginn der statischen Berechnung auf die charakteristischen Werte der Einwirkungen angesetzt werden oder erst am Ende der Berechnung auf die charakteristische Werte der Beanspruchungen. Unterschiedliche Bemessungsergebnisse ergeben die beiden Verfahren nur beim Grundbruchnachweis.

Im Gegensatz zum Verfahren 2 werden beim Verfahren 3 die Bemessungswerte der Einwirkungen und der Widerstände des Baugrunds mit faktorisierten Scherparametern ermittelt. Bei den Einwirkungen aus dem Bauwerk werden die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte wie im gesamten Bauingenieurwesen verwendet.

### 3.3.2 Das Verfahren GEO-2 für Gründungen *The GEO-2 procedure for foundations*

#### 3.3.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte *Partial factors of safety*

In Deutschland wird bei den Nachweisen von Flachgründungen, Stützwänden, Pfählen und Ankern das Nachweisverfahren 2 in der Variante verwendet, bei dem die gesamte Berechnung mit charakteristischen Werten durchgeführt wird. Erst am Ende bei der Überprüfung der Grenzzustandsgleichung werden die charakteristischen Einwirkungen und Widerstände mit den Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt. Es wird mit GEO-2 bezeichnet. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass der entwerfende Ingenieur während der Berechnung immer mit den realen, charakteristischen Größen der Belastungen und Schnittgrößen arbeitet. Außerdem kann er die gleichen Schnittgrößen für die Ermittlung der Verformungen beim Gebrauchtauglichkeitsnachweis verwenden, die auch mit charakteristischen Größen durchgeführt werden. Der wichtigste Grund für die Entscheidung für das Verfahren GEO-2 liegt darin, dass nur mit diesem Verfahren das bewährte Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzept erhalten werden kann (Vogt et. al. [14])

Deutschland hat eine mehr als 70-jährige Tradition von Normen in der Geotechnik. Die erste Ausgabe der DIN 1054 wurde 1934 mit dem Titel „Richtlinie für die zulässige Belastung des Baugrunds im Hochbau“ veröffentlicht. Seitdem wurden die geotechnischen Normen laufend optimiert. Das Sicherheitsniveau des bisherigen globalen Sicherheitskonzepts hat sich bewährt und die gewählten Sicherheitsbeiwerte haben einen sicheren und wirtschaftlichen geotechnischen Entwurf ermöglicht.

Bei der Umstellung auf den Eurocode ist man daher bei der Wahl des Nachweisverfahrens und der Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte von dem Grundsatz ausgegangen, dass das bewährte Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzepts erhalten bleiben muss. Die Nachweisverfahren und die Teilsicherheitsbeiwerte waren daher so auszuwählen, dass eine Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten auf Grundlage des EC 7-1 [1] etwa zu den gleichen Abmessungen führt wie eine Gründungsbemessung nach den Normen des globalen Sicherheitskonzepts.

Um zum Beispiel das Sicherheitsniveau im Nachweisverfahren GEO-2 aufrechtzuerhalten, muss die Beziehung:

$$\gamma_R \cdot \gamma_{G/Q} \approx \eta_{global} \quad (9)$$

erfüllt sein, wobei  $\gamma_R$  der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand des Baugrunds,  $\gamma_{G/Q}$  ein mittlerer Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchungen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen und  $\eta_{global}$  der bisherige globale Sicherheitsbeiwert ist.

Da man sich geeinigt hatte, für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen ( $\gamma_{G,Q}$ ) im gesamten konstruktiven Ingenieurbau – also auch in der Geotechnik – die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte zu verwenden, kann man aus dieser Gleichung bei bekanntem globalen Sicherheitsbeiwert  $\eta_{global}$  den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_R$  für den Widerstand des Baugrunds ermitteln:

$$\gamma_R = \eta_{global} / \gamma_{G,Q} \quad (10)$$

Für den Grundbruchnachweis forderte die alte DIN 1054 [15] von 1976 zum Beispiel für den Lastfall 1 eine globale Sicherheit von  $\eta_{global} = 2,0$ . Mit einem Mittelwert von  $\gamma_{G,Q} = 1,40$  für die Teilsicherheitsbeiwerte von  $\gamma_G =$

1,35 und  $\gamma_o = 1,50$  für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen ergibt sich dann ein Teilsicherheitsbeiwert für den Grundbruchwiderstand von  $\gamma_{R,v} \approx 1,40$ . In entsprechender Weise sind die in DIN 1054 [4] angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte für die drei Bemessungssituationen festgelegt worden (siehe Tabellen A 2.1 bis A 2.3 in DIN 1054:2010-12 [4]).

Bei GEO-2 werden die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte verwendet, die auch im Anhang A des EC 7-1 [1] empfohlen werden. Allerdings muss – mit Ausnahme von Zugpfahlgruppen – nicht zwischen günstig und ungünstig wirkenden ständigen Einwirkungen unterschieden werden, weil sie als ungünstig wirkende Einwirkungen immer maßgebend sind (siehe [15]). Darüber hinaus haben im Gegensatz zum Anhang A des EC 7-1 die Teilsicherheitsbeiwerte für die wirksame Kohäsion  $c'$  und die Kohäsion des undrännierten Bodens  $c_u$  den gleichen Wert wie für den wirksamen Reibungswinkel  $\phi'$  und den Reibungswinkel  $\phi_u$  des undrännierten Bodens.

Mit dem Teilsicherheitskonzept ist zwar in den Eurocodes ein einheitliches Format für die Nachweise zur Bemessung im konstruktiven Ingenieurbau für unterschiedliche Bauarten und Baumaterialien eingeführt worden. Ein einheitliches Sicherheitsniveau im Sinne einer einheitlichen Versagenswahrscheinlichkeit wurde nicht erreicht, auch wenn weitgehend gleiche Teilsicherheitsbeiwerte bei den Einwirkungen in allen Fachbereichen des konstruktiven Bauingenieurwesens eingeführt wurden [16]. Wie oben dargestellt, wurden diese Teilsicherheitsbeiwerte auch in der Geotechnik übernommen und nicht versucht, für die geotechnischen Einwirkungen eigene Teilsicherheitsbeiwerte zu entwickeln. Sie sind daher nicht – wie ursprünglich vorgesehen – ein Maß für die Zuverlässigkeit, mit der man die Größe der geotechnischen Einwirkungen ermitteln kann. Gleiches gilt für die Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände, denn sie wurden aus der Bedingung abgeleitet, dass sich bei einer Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept etwa die gleichen Abmessungen von Gründungen ergeben sollten wie beim bisherigen globalen Sicherheitskonzept. Bei Lichte betrachtet ist also das Teilsicherheitskonzept weiterhin ein globales, deterministisches Sicherheitskonzept, dessen Sicherheitsniveau auf Erfahrungen beruht.

Die Eurocodes berücksichtigen kein menschliches Versagen (human error), menschliches Versagen wird in den Definitionen der Teilsicherheitsbeiwerte nicht

erwähnt. Stattdessen enthält der einleitende allgemeine Abschnitt aller Eurocodes eine Liste von Voraussetzungen, die definieren und sicherstellen sollen, dass das Bauwerk von fachkompetentem und erfahrenem Personal planmäßig hergestellt und unterhalten wird. In den Normen des globalen Sicherheitskonzepts wurde zwar auch nie explizit auf menschliches Versagen Bezug genommen, doch wurde stillschweigend davon ausgegangen, dass es zumindest zum Teil durch die Sicherheitsbeiwerte abgedeckt wird. Ziel war immer eine robuste und dennoch wirtschaftliche Bemessung, sodass das Bauwerk nicht schon bei kleinen Fehlern versagt. Durch die Übernahme des Sicherheitsniveaus der alten Normen sind in den Teilsicherheitsbeiwerten damit auch „kleinere“ Fehler durch menschliches Versagen abgedeckt.

### 3.3.2.2 Kombinationsregeln *Combination rules*

Mit den Kombinationsregeln wird der sehr geringen Wahrscheinlichkeit Rechnung getragen, dass die möglichen veränderlichen Einwirkungen, wie z. B. Verkehrslasten, Wind und Schnee alle gleichzeitig in voller Größe wirken. Bei mehr als einer veränderlichen Einwirkung wird daher nur eine Einwirkung, die Leiteinwirkung  $Q_{k,1}$  voll berücksichtigt, während alle weiteren Einwirkungen als Begleiteinwirkungen  $Q_{k,i}$  mit einem Kombinationsbeiwert  $y_o$  kleiner als 1 multipliziert werden.

Bisher gab es in der Geotechnik keine Kombinationsregeln. Im Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] werden sie eingeführt und im EC 7-1 [1] ist ihre Anwendung zwar vorgesehen, die Umsetzung wird jedoch den europäischen Mitgliedsstaaten überlassen.

Bei der Erarbeitung der DIN 1054:2010-12 [4] war sich der zuständige Ausschuss einig, dass z. B. der Nachweis der äußeren Abmessungen des Fundaments mit den gleichen Beanspruchungen durchgeführt werden sollte wie die Stahlbetonbemessung des Fundaments. Daher wurden in der Geotechnik die Kombinationsregeln des Eurocodes „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] übernommen.

In der deutschen Geotechnik wird so weit wie möglich das Konzept verfolgt, bei einer erdstatischen Berechnung zunächst alle Beanspruchungen als charakteris-

tische Werte zu ermitteln. Erst am Ende der Berechnungen werden mit Hilfe der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{G,j}$  für die ständigen Einwirkungen,  $\gamma_P$  für eine Vorspannkraft und  $\gamma_{Q,i}$  für die veränderlichen Einwirkungen daraus Bemessungswerte errechnet. Darauf muss auch die Anwendung der Kombinationsregeln mit Kombinationsbeiwerten abgestimmt werden. Im Regelfall, bei vorausgesetzter Gültigkeit des Superpositionsprinzips, können auf Grundlage der charakteristischen ständigen Einwirkungen  $G_{k,j}$ , der Vorspannkraft  $P_k$  und der veränderlichen Einwirkungen  $Q_{k,i}$  die entsprechenden Beanspruchungen  $E$  einzeln errechnet und der Bemessungswert  $E_d$  der Gesamtbeanspruchung unter Anwendung der Kombinationsregeln weiterhin am Ende einer Berechnung ermittelt werden – beispielhaft für die Bemessungssituationen BS-P und BS-T entsprechend der Gleichung:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot E(G_{k,j}) + \gamma_P \cdot E(P_k) + \gamma_{Q,1} \cdot E(Q_{k,1}) + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot E(Q_{k,i}) \quad (11)$$

In besonderen Fällen, bei denen das Superpositionsprinzip nicht gilt, müssen Bemessungswerte der Beanspruchungen  $E_d$  aus den Bemessungswerten der Einwirkungen, die nach den Regeln des Eurocodes „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] aus charakteristischen Einwirkungen verknüpft mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma$  und Kombinationsbeiwerten  $\psi$  entstehen, ermittelt werden – z. B. wieder für die Bemessungssituationen BS-P und BS-T nach der formalen Gleichung:

$$E_d = E \left( \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_j + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right) \quad (12)$$

Hierin bedeutet „+“: „in Verbindung mit“. Um den maßgebenden Wert der Bemessungsbeanspruchung festzustellen, müssen bei mehreren unabhängigen veränderlichen charakteristischen Einwirkungen  $Q_{k,i}$  gegebenenfalls mehrere Kombinationen untersucht werden. Dabei ist fallweise jeweils eine der unabhängigen veränderlichen Einwirkungen als Leiteinwirkung  $Q_{k,i}$  anzusetzen und die anderen – dann als zugehörige Begleiteinwirkungen bezeichnet – können gleichzeitig

je mit einem Kombinationswert  $\psi_{0,i}$  abgemindert werden, dessen Größe von der Art der Einwirkung abhängt.

In den Bemessungssituationen BS-A und BS-E sind zum Teil keine Teilsicherheitsbeiwerte vorgesehen und es werden statt des Kombinationsbeiwerts  $\psi_0$  für begleitende veränderliche Einwirkungen die kleineren Zahlenwerte der Kombinationsbeiwerte zum Festlegen des häufigen Werts der veränderlichen Leiteinwirkung  $\psi_1$  bzw. des quasi-ständigen Werts einer veränderlichen Einwirkung  $\psi_2$  verwendet, um die geringere Wahrscheinlichkeit der Gleichzeitigkeit mehrerer veränderlicher Einwirkungen im Fall des außergewöhnlichen Ereignisses bzw. Erdbebens zu berücksichtigen.

Im Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] und dem zugehörigen National Anhang [17] sind Kombinationsbeiwerte für den Hochbau festgelegt. Sie gelten auch für die Nachweise in der Geotechnik. Für in den Tabellen für den Hochbau nicht erfasste sonstige veränderliche Einwirkungen sind die Kombinationsbeiwerte  $\psi_0 = 0,8$ ,  $\psi_1 = 0,7$  und  $\psi_2 = 0,5$  zu verwenden.

### 3.3.3 Das Verfahren GEO-3 zum Nachweis der Böschungsstandsicherheit *Verification of slope stability with the GEO-3 procedure*

Beim Nachweis der Standsicherheit von Böschungen wird das Nachweisverfahren 3 – bezeichnet mit GEO-3 – angewendet, das im Wesentlichen dem Verfahren der alten DIN 4084:2009-1 [9] entspricht. Im Gegensatz zu GEO-2 werden bei diesem Nachweisverfahren die Bemessungswerte der Einwirkungen und Widerstände des Baugrunds mit Bemessungswerten der Scherparameter  $\phi'_d$  und  $c'_d$  ermittelt, die Teilsicherheitsbeiwerte also auf die Scherparameter angewendet. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherparameter in den Tabellen A 2.1, A 2.2 und A 2.3 der DIN 1054:2010-12 [4] entsprechen den im Anhang A des EC 7-1 [1] empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerten. Für Einwirkungen aus Bauwerken werden allerdings andere Werte verwendet als im EC 7-1 [1].

### 3.3.4 Charakteristische Werte *Characteristic values*

Welche Bedeutung eine möglichst realistische Festlegung der Werte der charakteristischen Bodenkenngrößen für die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit einer Gründung hat, zeigt sich am deutlichsten beim Grundbruchnachweis. So führt die verhältnismäßig geringe Erhöhung des Reibungswinkels von  $\varphi' = 30^\circ$  auf  $\varphi' = 32,5^\circ$  zu einem Anstieg der rechnerischen Tragfähigkeit eines Fundaments von über 40 %.

Für den charakteristischen Wert fordert der EC 7-1 [1] in 2.4.5.2:

„(2)P Der charakteristische Wert einer geotechnischen Kenngröße ist als eine vorsichtige Schätzung desjenigen Wertes festzulegen, der im Grenzzustand wirkt.“

Diese Formulierung entspricht derjenigen des Anhangs C 2.1.2 von DIN 4020:2003-09 [18]:

„Die charakteristischen Werte sind so festzulegen, dass die Ergebnisse der damit durchgeführten Berechnungen auf der sicheren Seite liegen.“

Wie vorsichtig die Schätzung sein muss, blieb vor dem Erscheinen des EC 7-1 [1] allein der Erfahrung des Baugrundgutachters überlassen. Im EC 7-1 [1] wurde zum ersten Mal der Versuch gemacht, zu quantifizieren, wie vorsichtig ein Gutachter bei der Festlegung von charakteristischen Werten sein sollte (EC 7-1, 2.4.5.2):

„(1) Falls statistische Verfahren benutzt werden, sollte der charakteristische Wert so abgeleitet werden, dass für den betrachteten Grenzzustand die rechnerische Wahrscheinlichkeit für einen ungünstigeren Wert nicht größer als 5 % ist.

**ANMERKUNG** In diesem Zusammenhang entspricht der vorsichtig gewählte Mittelwert einem Mittelwert mit einem 95 %-igen Vertrauensbereich für einen begrenzten Satz von Werten der geotechnischen Kenngröße. Ist dagegen örtliches Versagen angezeigt, entspricht eine vorsichtige Wahl dem einer 5 %-Fraktile zuzuordnenden unteren Wert.“

Etwas verklausuliert stecken in dem Absatz (11) und der Anmerkung zwei Aussagen:

- Zum einen hat der Geotechniker zu prüfen,
  - ob bei dem untersuchten Grenzzustand ein so großes Volumen des Baugrunds betroffen ist, dass er einen vorsichtigen Mittelwert für den cha-

rakteristischen Bodenkennwert ansetzen kann oder

- ob ein nur sehr kleiner Baugrundbereich betroffen ist, bei dem ein lokaler unterer Wert als charakteristischer Wert angesetzt werden muss.
- Zum anderen werden bei der Festlegung von charakteristischen Werten Wahrscheinlichkeiten vorgegeben, die bei einer statistischen Auswertung im Hinblick auf einen charakteristischen Wert zugrunde zu legen sind.

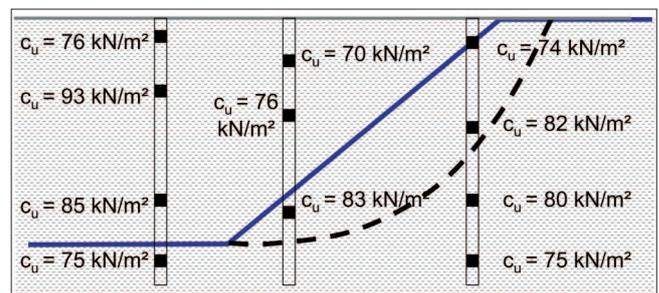


Bild 3: Beispiel für die Wahl des charakteristischen Werts als globaler charakteristischer Wert  $X_{k,m}$  (Böschungsstandsicherheit)

Figure 3: Sample selection of the characteristic value as global characteristic value  $X_{k,m}$  (slope safety)

In der praktischen Anwendung gibt es zwei unterschiedliche Fragestellungen. Im ersten Fall ist der charakteristische Wert einer Bodenkenngröße für den Fall zu ermitteln, dass der im untersuchten Grenzzustand in Anspruch genommene Bodenbereich so groß ist, dass der Mittelwert der Versuchsergebnisse der zu beurteilenden Bodenkenngröße maßgebend wird (siehe EC 7-1, 2.4.5.2 (7)). Ein Beispiel dafür ist der Nachweis der Sicherheit der Einschnittsböschung im Bild 3, für den die dargestellten Bohrungen abgeteufelt und für den an den Proben die bodenmechanischen Kenngrößen bestimmt wurden. In diesem Fall ist nach 2.4.5.2 (11) der charakteristische Wert  $X_{m,k}$  als Wert zu bestimmen, bei dem die Wahrscheinlichkeit nur 5 % beträgt, dass der (unbekannte) wahre Mittelwert  $m$  der Bodenkenngröße kleiner ist als  $X_{m,k}$ . Unter diesen Voraussetzungen kann der charakteristische Wert  $X_{m,k}$  eines Bodenkennwerts nach folgender Formel berechnet werden [18]:

$$X_k = X_m \left[ 1 - t_{(n-1)}^{0,95} V \frac{1}{\sqrt{n}} \right] = X_m \xi_1 \quad (13)$$

Dabei ist  $X_m$  der arithmetische Mittelwert der einzelnen Versuchsergebnisse,  $V$  deren geschätzter Variations-

koeffizient ( $V = s / X_m$  mit  $s^2 = \sum (X_i - X_m)^2 / (n - 1)$ ),  $n$  die Zahl der Versuchsergebnisse und

$$t_{(n-1)}^{0,95}$$

der Faktor der Student-Verteilung bei  $(n-1)$  Freiheitsgraden und einem Vertrauensbereich von 95 %. Die Tabelle 2 enthält die Werte für  $\xi_1 = X_k / X_m$  als Funktion der Anzahl  $n$  der Versuche und des Variationskoeffizienten  $V$ .

Zahl der Versuchsergebnisse $n$	Variationskoeffizient $V$				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,92	0,83	0,75	0,66	0,58
4	0,94	0,88	0,82	0,76	0,71
5	0,95	0,90	0,86	0,81	0,76
6	0,96	0,92	0,88	0,84	0,79
8	0,97	0,93	0,90	0,87	0,84
10	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86
20	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90
40	0,99	0,97	0,96	0,95	0,93

Tabelle 2: Zahlenwerte für  $\xi_1$  nach [19]  
 Table 2: Numerical values for  $\xi_1$  according to [19]

Für den Fall, dass ein charakteristischer Kennwert als „globaler“ Mittelwert gesucht wird, schlägt Schneider [19] schlägt eine sehr einfache Formel zur Ermittlung von charakteristischen Werten vor:

$$X_k = X_m - 0,5 \cdot s \tag{14}$$

wobei  $s$  die Standardabweichung der Versuchsergebnisse ist.

Im zweiten Fall ist der charakteristische Wert einer Bodenkenngroße zu bestimmen, bei dem der für den untersuchten Grenzzustand in Anspruch genommene Bodenbereich so klein ist, dass nicht der Mittelwert der Versuchsergebnisse des Untersuchungsbereiches zugrunde gelegt werden kann, sondern ein örtlich kleinerer Wert maßgebend wird. Ein Beispiel dafür ist der Nachweis der Grundbruchsicherheit eines Einzelfundaments im Bild 4.

Hier ist der „lokale“ charakteristische Wert  $X_{k,l}$  zu bestimmen, der dem Wert der 5%-Fraktile der Normalverteilung der Einzelwerte entspricht. Für den lokalen charakteristischen Wert  $X_k$  gilt, dass nur eine 5 %ige Wahrscheinlichkeit dafür besteht, dass irgendwo im Boden eine noch kleinere Festigkeit auftritt. Für diesen Fall ist der charakteristische Wert:

$$X_k = X_m \left[ 1 - t_{(n-1)}^{0,95} V \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \right] = X_m \xi_2 \tag{15}$$

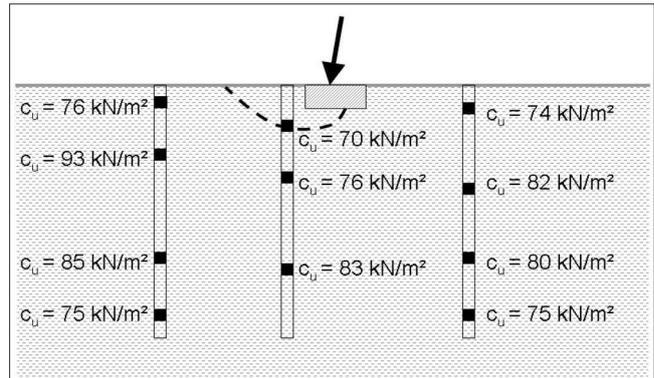


Bild 4: Beispiel für die Wahl des charakteristischen Werts als lokaler charakteristischer Wert  $X_{k,l}$  (Grundbruch eines Einzelfundaments)

Figure 4: Sample selection of the characteristic value as local characteristic value  $X_{k,l}$  (failure of a single footing)

Die Tabelle 3 enthält die Werte für  $\xi_2 = X_k / X_m$  als Funktion der Anzahl  $n$  der Versuche und des Variationskoeffizienten  $V$ .

Zahl der Versuchsergebnisse $n$	Variationskoeffizient $V$				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,83	0,66	0,49	0,33	0,16
4	0,87	0,74	0,61	0,47	0,34
5	0,88	0,77	0,65	0,53	0,42
6	0,89	0,78	0,67	0,56	0,46
8	0,90	0,80	0,70	0,61	0,51
10	0,90	0,81	0,71	0,62	0,52
20	0,91	0,82	0,73	0,65	0,56
40	0,92	0,83	0,75	0,66	0,58

Tabelle 3: Zahlenwerte für  $\xi_2$  nach [19]  
 Table 3: Numerical values for  $\xi_2$  according to [19]

Es gibt in der Praxis allerdings auch Situationen, wo der maßgebende Bodenbereich des untersuchten Grenzzustands zwar klein ist, aber trotzdem der globale charakteristische Wert angesetzt werden kann. Das ist immer dann der Fall, wenn das Bauwerk selbst so steif ist, dass es örtliche Unterschiede in der Festigkeit oder Steifigkeit des Baugrunds ausgleichen kann.

In vielen Fällen zeigen die Ergebnisse von Baugrunduntersuchungen im Labor und im Feld deutliche Einflüsse der Entnahmetiefe bzw. der örtlichen Spannungen. In diesem Fall können die Gleichungen (13), (14) und (15) zur Ermittlung von charakteristischen Werten nicht angewendet werden. Auf eine Darstellung der in solchen Fällen anzuwendenden statistischen Formeln wird hier verzichtet und auf Bauduin [19] und Fellin [21] verwiesen. Als Ergebnis erhält man dann den

charakteristischen Wert in Abhängigkeit der Tiefe bzw. der Spannung.

### 3.3.5 Beispiele *Examples*

Für die in den Bildern 3 und 4 dargestellten 11 Proben ergibt sich ein Mittelwert der in Versuchen ermittelten undränierten Scherfestigkeit von  $c_{u,m} = 79 \text{ kN/m}^2$ , bei einer Standardabweichung von  $s_{cu}^2 = 41,4$  und einem Variationskoeffizienten von  $V_{cu} = 0,08$ . Aus Tabelle 2 ergibt sich dann  $\xi_1 = 0,95$ . Mit Gleichung (13) kann dann der globale charakteristische Wert der undränierten Scherfestigkeit zum Nachweis der Böschungsstandsicherheit ermittelt werden zu:

$$c_{u,k} = c_{u,m} \cdot \xi_1 = 79 \cdot 0,95 = 75 \text{ kN / m}^2 \quad (16)$$

Die Anwendung der Faustformel von Schneider [20] (Gleichung (14)) ergibt mit  $s_{cu}/2 = 3,2$  einen charakteristischen Wert von  $c_{u,k} = 75,8 \text{ kN/m}^2$ , der sehr gut mit der aufwändigeren statistischen Auswertung übereinstimmt.

Für den Nachweis der Standsicherheit eines Einzelfundaments, bei dem der lokale charakteristische Wert der undränierten Scherfestigkeit maßgebend wird, ergibt sich aus Tabelle 3 mit den gleichen Werten  $\xi_2 = 0,83$ . Mit Gleichung (15) wird dann die lokale charakteristische undränierte Scherfestigkeit ermittelt zu:

$$c_{u,k} = c_{u,m} \cdot \xi_1 = 79 \cdot 0,83 = 65,6 \text{ kN / m}^2 \quad (17)$$

Das Beispiel zeigt, dass der lokale charakteristische Wert deutlich unter dem globalen charakteristischen Wert liegt, im vorliegenden Fall sogar unter dem kleinsten in Versuchen ermittelten Wert. In solchen Fällen empfiehlt es sich, unmittelbar an den Fundamenten Untersuchungen durchzuführen.

## 3.4 Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit (EQU) *Limit state EQU: loss of equilibrium*

Da bei einem Verlust der Lagesicherheit in der Regel keine Materialfestigkeit im Bauwerk oder Baugrund und damit kein Widerstand mobilisiert wird, werden in der Grenzzustandsgleichung die Bemessungswerte

$E_{dst,d}$  der destabilisierenden und  $E_{stb,d}$  der stabilisierenden Einwirkungen verglichen:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} \quad (18)$$

Bei einer Flachgründung auf Fels, die im Grenzzustand der Lagesicherheit um eine Fundamentkante kippt, sind als stabilisierende und destabilisierende Einwirkungen die Momente  $M_{stb,d}$  und  $M_{dst,d}$  aus den vertikalen und horizontalen, ständigen und veränderlichen Gründungslasten anzusetzen.

Beim Nachweis des Grenzzustandes EQU erlauben sowohl der Eurocode „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [7] als auch der EC 7-1 zusätzliche stabilisierende Kräfte – z. B. Scherkräfte oder Anker – in der Grenzzustandsgleichung zu berücksichtigen (siehe auch [20]). Obgleich diese Kräfte streng genommen Widerstände bzw. Reaktionskräfte sind, werden sie beim Nachweis der Lagesicherheit als stabilisierende Einwirkungen behandelt.

Bei Flächengründungen auf nichtbindigen und bindigen Böden kann eigentlich kein Nachweis der Sicherheit gegen Gleichgewichtsverlust durch Kippen geführt werden, da die Kippkante unbekannt ist. Anstatt eines Nachweises der Sicherheit gegen Kippen wurde daher in der DIN 1054:2005-1 [2] der Nachweis der Einhaltung einer zulässigen Ausmittigkeit der Sohl-druckresultierenden eingeführt (A 6.5.4 A(3)) und gefordert, dass die Fundamentsohle unter den ungünstigsten ständigen und veränderlichen Einwirkungen noch bis zu ihrem Schwerpunkt durch Druck belastet ist. Dies entspricht bei rechteckigen Fundamentflächen einer globalen Sicherheit von  $\eta = 1,50$  zwischen dem Moment der Vertikalkraft und dem zum Kippen führenden Moment der Horizontalkraft. Dieser Gedanke ist bei der Anpassung der DIN 1054 an das Konzept der Grenzzustände aufgenommen worden. Der Nachweis der zulässigen Ausmittigkeit von Flachgründungen auf Boden wird zum Nachweis des Grenzzustandes der Lagesicherheit EQU, wobei wie beim Fels ein Kippen um eine Fundamentkante und ein starrer Baugrund angenommen werden. Mit den Teilsicherheitsbeiwerten für eine veränderliche destabilisierende Momentenbeanspruchung von  $\gamma_{Q,dst} = 1,50$  und für eine günstig wirkende, ständige stabilisierende Momentenbeanspruchung  $\gamma_{Q,stb} = 0,90$  ergibt sich ein globale Sicherheit von  $\eta = \gamma_{Q,dst} / \gamma_{G,stb} = 1,67$ , die etwas größer ist als diejenige

globale Sicherheit, die sich bei Einhaltung einer zulässigen Ausmittigkeit ergibt. Die erhöhte Sicherheit ist gerechtfertigt, da damit eine Begrenzung der Schiefstellungen exzentrisch veränderlich belasteter Gründungen erreicht und bei veränderlicher Horizontalbelastung das „Aufreiten“ von Turmfundamenten sicher vermieden wird.

### 3.5 Grenzzustand des Aufschwimmens (UPL)

*Limit state UPL: uplift*

Das Aufschwimmen von Bauwerken infolge der Auftriebskraft des Wassers ist ebenfalls ein Versagen durch Verlust der Lagesicherheit, allerdings hat man ihn wegen seiner Besonderheiten nicht unter den Grenzzustand EQU eingeordnet. Der Grenzzustand UPL wird im EC 7-1 definiert (siehe 2.4.7.1 (1) P) als:

„Verlust der Lagesicherheit des Bauwerks oder Bauwerks infolge Aufschwimmens (Auftrieb) oder anderer vertikaler Einwirkungen;“

Die Grenzzustandsgleichung (Gleichung (2.8) in 2.4.7.4) zum Nachweis gegen Aufschwimmen fordert, dass der Bemessungswert der destabilisierenden ständigen und veränderlichen Vertikalkräfte  $G_{dst,d}$  und  $Q_{dst,d}$  nicht größer werden darf als die Bemessungswerte der stabilisierenden ständigen Vertikalkräfte  $G_{stb,d}$ :

$$G_{dst,d} + Q_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (19)$$

wobei gegebenenfalls der Bemessungswert eines zusätzlichen Widerstandes  $R_d$  gegen Aufschwimmen berücksichtigt werden darf, der wie eine zusätzliche stabilisierende Einwirkung behandelt wird. Die in der Tabelle A 2.1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen nicht denen der Tabelle A 16 des EC 7-1. Das Sicherheitsniveau ist allerdings gleich.

Einzelheiten der Berücksichtigung von Reibungskräften oder von Zugverankerungen bei unter Auftrieb stehenden Bauwerken sind im Abschnitt 10.2 der DIN 1054:2010-12 [4] dargestellt. Weitere praktische Anwendungsfälle werden im „Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“ [12] und der EAU [10] geregelt.

Bei bindigen, wenig durchlässigen Schichten stellt sich gelegentlich die Frage, ob zusätzlich zum Nachweis

gegen Aufschwimmen noch ein Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch erforderlich ist. Hier regelt die DIN 1054:2010-12 [4] in A 10.1.1 (2), dass dies nur erforderlich ist, wenn die bindige Bodenschicht nicht mindestens steife Konsistenz hat.

### 3.6 Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping (HYD)

*Hydraulic heave, internal erosion and piping (HYD)*

Die Definition des Grenzzustands HYD umfasst hydraulischen Grundbruch, innere Erosion und Piping im Boden, die durch Strömungsgradienten verursacht werden. Allerdings gibt es nur für den hydraulischen Grundbruch eine Grenzzustandsgleichung. Es muss nachgewiesen werden, dass für jedes in Frage kommende Bodenprisma der Bemessungswert  $S_{dst,d}$  der destabilisierenden Strömungskraft in dem Prisma nicht größer ist als der Bemessungswert des stabilisierenden Gewichts desselben Prismas unter Auftrieb  $G'_{stb,d}$ :

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (20)$$

Die Bemessungswerte der Strömungs- und der Gewichtskraft ergeben sich wieder aus dem Produkt ihrer charakteristischen Werte mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten. Die in der Tabelle A 2.1 geforderten Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen allerdings nicht denen der Tabelle A 17 des EC 7-1 [1], insbesondere wird bei dem Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft unterschieden zwischen günstigem Untergrund, dem ein kleinerer Teilsicherheitsbeiwert zugewiesen wird, und ungünstigem Untergrund, bei dem die Strömungskraft mit einem größeren Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt wird.

Der EC 7-1 enthält noch eine weitere Grenzzustandsgleichung des hydraulischen Grundbruchs (Gleichung (2.9a) in 2.4.7.5 (1) P) in totalen Spannungen, die jedoch in Deutschland nicht angewendet wird, da sie physikalisch nicht korrekt ist.

Einzelheiten zur Durchführung des Nachweises gegen hydraulischen Grundbruch enthält der Abschnitt 10.2 der DIN 1054:2010-12 [4] und die EAU [10]. Für die Wichte des Bodens ist dabei im Sinne von Abschnitt 3.3.3 A (3) von DIN 1054:2010-12 [4] ein unterer charakteristischer Wert der Wichte festzulegen. Der schwierigste

Teil des Nachweises liegt in der Bestimmung der Größe der Strömungskraft  $S'_k$  bzw. in der Ermittlung des für den Nachweis maßgebenden waagerechten Schnitts durch den Baugrund, bei dem das Verhältnis von Strömungskraft  $S_k$  und Eigenlast  $G'_k$  des Bodenprismas unter Auftrieb am ungünstigsten ist. Bei geschichteten Böden stellt sich in Schichten mit geringerer Durchlässigkeit immer ein größeres hydraulisches Gefälle und damit eine größere Strömungskraft ein. Dies ist beim Nachweis zu berücksichtigen, um den maßgebenden Bodenkörper mit der kleinsten Sicherheit zu ermitteln. Die Ermittlung des dazu erforderlichen Grundwasserpotenzialfeldes erfolgt am zweckmäßigsten durch eine numerische Grundwasserströmungsberechnung, wobei zumeist eine zweidimensionale, vertikal-ebene Modellierung ausreichend ist. Für einfache geometrische Verhältnisse und homogenen Baugrund gibt es Näherungslösungen zur Bestimmung des Grundwasserpotenzials, z. B. entlang einer unterströmten Baugrubenwand in der EAU [10]. Räumliche Wirkungen, z. B. bei der Zuströmung zu einer Baugrubenecke, können durch Korrekturbeiwerte (z. B. Ziegler und Aulbach [22]) oder durch dreidimensionale Strömungsberechnungen berücksichtigt werden.

Am zuverlässigsten kann die Strömungskraft bzw. die Auftriebskraft durch Messungen des Porenwasserdrucks im Untergrund bestimmt werden, was allerdings in der Planungsphase zumeist nicht möglich ist. In vielen Fällen empfiehlt es sich aber im Sinne der Beobachtungsmethode beim Bau oder nach Fertigstellung des Bauwerks Messungen durchzuführen, um die Berechnungsannahmen zu überprüfen und das Bauwerk zu überwachen.

Für die innere Erosion und für das Piping geben EC 7-1 [1] und die DIN 1054:2010-12 [4] keine Grenzzustandsgleichungen und Teilsicherheitsbeiwerte an, mit denen man eine ausreichende Sicherheit gegen den die Standsicherheit gefährdenden Materialtransport im Baugrund nachweisen kann. Bei der inneren Erosion wird die Einhaltung von Filterkriterien gefordert. Die in Deutschland anzuwendenden Filterregeln sind z. B. im „Merkblatt Anwendung von Kornfiltern (MAK)“ [23] zusammengestellt. Für das Piping empfiehlt der EC 7-1 einen indirekten Nachweis, wie er auch im „Merkblatt Standsicherheit von Böschungen an Bundeswasserstraßen (MSD)“ [12] beschrieben wird.

## 4 Literatur *References*

- [1] DIN EN 1997-1:2009-9: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1: 2004 + AC:2009, Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN 1054:2005-1: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau, Beuth Verlag, Berlin
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2002): Leitpapier L – Anwendung der Eurocodes, Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe LP Heft L
- [4] DIN 1054:2010-12 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzenden Regelungen zu DIN EN 1997-1, Beuth Verlag, Berlin
- [5] DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1; Allgemeine Regeln, Beuth Verlag, Berlin
- [6] Handbuch Eurocode 7 (2011) Geotechnische Bemessung, Band 1 Allgemeine Regeln, Beuth Verlag, Berlin
- [7] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Beuth Verlag, Berlin
- [8] DIN EN 1991 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Beuth Verlag, Berlin
- [9] DIN 4084:2009-1: Baugrund – Geländebruchberechnung, Beuth Verlag, Berlin
- [10] EAU Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufer-einfassungen, Häfen und Wasserstraßen“ (EAU), herausgegeben von der Hafenbautechnischen Gesellschaft e. V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), 10. Auflage, Verlag Ernst & Sohn (2005)
- [11] EAB Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn (2006), Nachdruck 2007
- [12] Bundesanstalt für Wasserbau (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2011
- [13] DIN V 4019-100 Baugrund – Setzungsberechnungen, Beuth Verlag, Berlin

- [14] Vogt, N., Schuppener, B. und Weißenbach, A. (2006). Nachweisverfahren des EC 7-1 für geotechnische Bemessungen in Deutschland, geotechnik 29 Nr. 3
- [15] DIN 1054:1976-11: Baugrund – Zulässige Belastung des Baugrunds, Beuth Verlag, Berlin
- [16] Schuppener, B. und Heibaum, M. (2011): Reliability Theory and Safety in German Geotechnical Design, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, München
- [17] DIN EN 1990/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Beuth Verlag, Berlin
- [18] DIN 4020:2003-09 Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, Beuth Verlag, Berlin
- [19] Bauduin, Ch., Ermittlung charakteristischer Werte, in Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlage, 6. Auflage, Herausgeber U. Smoltczyk, Ernst und Sohn, Berlin, 2001
- [20] Schneider, H. R. (1999). Determination of characteristic soil properties, Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, S 273 – 281
- [21] Fellin, W., Berghamer, S. und Renk, D., Konfidenzgrenzen der Scherfestigkeit als Grundlage zur Festlegung charakteristischer Scherparameter, geotechnik 32, (2009), Nr. 1
- [22] Ziegler, M. und Aulbach, B. (2010): Zur Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch, Baugrundtagung München
- [23] Bundesanstalt für Wasserbau (1989), Merkblatt Anwendung von Kornfiltern (MAK), Karlsruhe, Ausgabe 1989