

Aktuelle Entwicklungen bei den Sicherheitsnachweisen im Erd- und Grundbau

Karl Josef Witt

1. Die Sicherheitsphilosophie im Erd- und Grundbau

Die Erkenntnisse der Physik, insbesondere die der Statik und der Festigkeitslehre, haben uns im Laufe der Zeit in die Lage versetzt, vom rein empirischen Bauen zum Planen und Berechnen von Bauwerken zu gelangen. Aus der Festigkeitslehre hat sich zunächst das Prinzip der zulässigen Spannung entwickelt, das bis heute der Kern des Sicherheitsverständnisses ist. Das zunächst für den Stahlbau entwickelte Prinzip beruht auf dem Vergleich einer zu erwartenden mit einer verträglichen Spannung oder Schnittgröße. Als zulässige Kenngrößen werden experimentell ermittelte oder empirisch festgelegte Bauteilfestigkeiten herangezogen, die um empirische Sicherheitsabschläge abgemindert werden.

$$\text{vorh}S \leq \text{zul}S \quad (1)$$

Auf die Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau übertragen hat sich international als Maß der Sicherheit das Verhältnis günstiger zu ungünstiger Bedingungen durchgesetzt [Terzaghi u. Peck, 1956]. Der Sicherheitsfaktor η ist danach als Verhältnis der Beanspruchbarkeit zur Beanspruchung definiert.

$$h = \frac{\text{günstige Schnittgrößen}}{\text{ungünstige Schnittgrößen}} = \frac{\text{Beanspruchbarkeit}}{\text{Beanspruchung}} \quad (2)$$

Die physikalischen Größen der Beanspruchbarkeit werden durch die Bedingungen im Versagensfall bestimmt, der als Grenzzustand bezeichnet wird. Die Beanspruchung wird aus der erwarteten Einwirkung auf die nachzuweisenden Bauteile aus inneren und äußeren Lasten oder aus Verformungen ermittelt. Diese Betrachtungsweise wurde bisher auf die wesentlichen Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau wie auch auf weiterentwickelte Bruchhypothesen oder Versagensmechanismen angewendet.

Die Unsicherheiten der den Grenzzustand bestimmenden Parameter, z. B. Lasten, geometrischen Größen, Scherwiderstände oder Festigkeitseigenschaften, können bei dieser Betrachtung nicht ihrem Einfluß entsprechend gewichtet werden. Man spricht daher vom *globalen Sicherheitsfaktor* h , der keine Berücksichtigung der Empfindlichkeit, der Modelleinwirkung oder der Unsicherheit bei der Bestimmung einzelner Parameter zuläßt. Als Einwände gegen dieses Prinzip wurde bereits früh aufgeführt:

- Für die wesentlichen geotechnischen Nachweise - Gleiten, Kippen, Grundbruch, Auftrieb, Hydraulischer Grundbruch, Böschungsbruch und axiale Tragfähigkeit von Pfählen - gibt es unterschiedliche, empirisch oder willkürlich festgelegte Sicherheitsfaktoren.
- Das Verfahren läßt keine konsequente Trennung von Einwirkung und Widerstand zu. Auf der Seite der Einwirkung kann insbesondere der Einfluß der gut vorhersehbaren ständigen Lasten und der Einfluß der in weiten Bereichen schwankenden Verkehrslasten nicht getrennt berücksichtigt werden.

- Als Folge der Gleichbewertung aller Einflüsse bietet das Verfahren keine Transparenz bzgl. der tatsächlichen Sicherheitsreserven oder des Ausnutzungsgrades der Konstruktion oder der Konstruktionsteile.
- Alle über die Belastungsannahmen hinausgehenden Einflußfaktoren wie Unsicherheiten des Baugrundmodells, der Bodenparameter, die Unschärfen des mechanischen Modells wie auch Imperfektionen der Ausführung können nicht getrennt bewertet werden. All diese Unsicherheiten sind im globalen Sicherheitsfaktor diffus berücksichtigt, jedoch für den Anwender nicht nachvollziehbar darzustellen.

Schon lange vor dem Wunsch der europäischen Harmonisierung wurden diese Schwächen für das Bauingenieurwesen erkannt und zunächst von MAYER, 1926, später speziell für den Erd- und Grundbau auch von LEUSINK, 1942, BRINCH HANSEN, 1959 und GUDEHUS, 1987, kritisiert. Die sicherheitsrelevanten Einflüsse lassen sich transparenter darstellen, wenn die Parameter der Einwirkungen und der Widerstände individuell durch Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt werden.

Die weitblickenden Anregungen von MAYER, LEUSSINK, und BRINCH HANSEN wurden erst viel später aufgegriffen, als man auch im Bauingenieurwesen versuchte, Unsicherheiten der Parameter und Unschärfen der Berechnungsverfahren mit den Erkenntnisse der Wahrscheinlichkeitstheorie in Sicherheitsbetrachtungen zu berücksichtigen. In den 70er Jahren machte sich allgemein das Bedürfnis nach einer Quantifizierung von technischen Risiken breit. Man begann, statt von einer vermeintlichen Sicherheit von der Zuverlässigkeit oder von deren Komplement, von der Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks zu sprechen. Die grundlegenden Arbeiten wurden von BENJAMIN u. CORNELL, 1970 vorgelegt. Im deutschsprachigen Raum bildet ein umfassendes Werk des NABau, 1980 mit dem unglücklichen Namen GruSiBau den Ausgangspunkt für vielseitige Aktivitäten auf nahezu allen Gebieten des Bauingenieurwesens. Das sog. β -Verfahren wird als grundlegendes probabilistisches Sicherheitskonzept zur Begründung von Teilsicherheitsfaktoren empfohlen. Einzelheiten der Entwicklung und der Bedeutung von probabilistischen Sicherheitsnachweisen in der Geotechnik werden in WITT, 1998 erläutert.

Die anfängliche Euphorie, ein einheitliches Niveau der Zuverlässigkeit von Bauwerken zu erreichen, wurde mit dem Versuch praktischer Anwendungen bald gedämpft. Defizite zeigten sich sowohl in der Deterministik, dem mechanische Modell, als auch in der Datenstruktur. Für manche Nachweise waren die Grenzzustandsfunktionen nicht handhabbar oder nicht verfügbar. Und selbst für simple Nachweise konnte die erforderliche Datenmenge zur statistischen Beschreibung der Basisvariablen für baupraktische Fälle nicht mit angemessenem Aufwand beschafft werden. In der Ernüchterungsphase zeigte sich, dass sich die Sicherheitsphilosophie mehr oder weniger auf Empirie und Intuition reduzieren wird. In ENV 1991-1 (EC1) wird zwar noch das **b**-Konzept unverbindlich aufgeführt, jedoch wegen der erwähnten Schwierigkeiten bei der Umsetzung nicht zur Anwendung empfohlen. In einigen Teilgebieten, insbesondere bei der Festlegung charakteristischer Bauteilfestigkeiten, hat sich das Konzept bewährt. Ansonsten kann es nur für das Verständnis der Zusammenhänge der Einflussgrößen bei der Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte dienen. Die statistische Natur der Kenngrößen des Baugrundes spiegelt sich in der Empfehlung des ECS 7 zur Festlegung der Charakteristischen Kenngrößen wieder, das u.a. in BAUDUIN, 2002 erläutert ist.

2. Die aktuellen Regelwerke

Als erste normative Festlegung des Grundbaus erschien 1934 das Normblatt DIN 1054, in der auf einigen Seiten die zulässige Belastung des Baugrundes für verschiedene Bodenarten angegebene wurde. Etwas umfassender war die erste Überarbeitung aus dem Jahre 1947 [WEDLER, 1947], die auch Pfahlgründungen einschloss. Im Hinblick auf die Sicherheitsnachweise im geotechnischen Ingenieurwesen ist die 1976 erschienene DIN 1054 aufzuführen, die unter dem Titel „Zulässige Belastung des Baugrundes“ auf 30 Seiten (einschl. Anhang und Beiblatt) die Themen Baugrund, Lasten, Baugrundverhalten und Flächengründungen behandelt. In den Folgejahren ist in der Bundesrepublik Deutschland eine unüberschaubare Normenvielfalt entstanden, in der die Durchführung von Feld- und Laborversuchen geregelt wurden, die Nachweisverfahren für Flächen- und Tiefgründungen beschrieben sind, Rechenverfahren für Böschungs- und Geländebruch vereinheitlicht und Ausführungshinweise für die Verfahren des Spezialtiefbaus erläutert werden. Vergleichbare Normen wurden als TGL mit großer Präzision in der DDR entwickelt. Aus dem ehemals kreativen Charakter des geotechnischen Ingenieurwesens, das Spielraum für Innovationen und den weisen Rat von Experten lies, die ihre Entscheidungen auf Sachverstand und Erfahrung gründeten, wurde ein schlichtes Anwenden von Regeln. Der sog. geotechnische Sachverständige zeichnet sich heute durch die mit Fleiß, Ausdauer, Versuch und Irrtum erlernbare Kenntnis dieser vielen Regeln und Vorschriften aus. Die ehemals wesentliche Qualifikation, ein vertieftes Verständnis der Bodenmechanik, des Erd- und Grundbaus und der Wechselwirkung von Bauwerk und Baugrund, steht nicht mehr im Vordergrund, die fundierte wissenschaftliche Ausbildung tritt in den Hintergrund.

EN 1990	Eurocode:	Grundlagen der Tragwerksplanung <i>Basics of structural design</i>
EN 1991	Eurocode 1:	Einwirkung auf Tragwerke <i>Actions on structures</i>
EN 1992	Eurocode 2:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten <i>Design of concrete structures</i>
EN 1993	Eurocode 3:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten <i>Design of steel structures</i>
EN 1994	Eurocode 4:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten <i>Design of composite steel and concrete structures</i>
EN 1995	Eurocode 5:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten <i>Design of timber structures</i>
EN 1996	Eurocode 6:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten <i>Design of masonry structures</i>
EN 1997	Eurocode 7:	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik <i>Geotechnical design</i>
EN 1998	Eurocode 8:	Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben <i>Design of structures for earthquake resistance</i>
EN 1999	Eurocode 9:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen <i>Design of aluminium and aluminium alloy structures</i>

Tabelle 1: Europäische Normen des konstruktiven Ingenieurbaus, (Original EN kursiv)

Ziel der neuen Regelwerke ist nicht, diese Folgeerscheinungen der nationalen Überregulierung zu beseitigen. Der Ausgangspunkt war vielmehr der Auftrag des Europäischen Normeninstitutes CEN, die Vorschriften innerhalb der Gemeinschaft zu harmonisieren. Dieser Auftrag leitet sich aus einem Beschluss der EU von 1975 ab. Unter der Leitung des Technischen Komitees CEN/TC 250 „Bautechnische Eurocodes“ sollte mit den Eurocodes E0 bis E9 für

das gesamte Bauingenieurwesen Rahmennormen mit einem einheitlichen Sicherheitskonzept geschaffen werden. Die Grundsätze sollten in E0 festgelegt werden, die Eurocodes E1 bis E9 sollten die fachspezifischen Normen behandeln, die wiederum teils aus mehreren Teilen bestehen können. Das Eurocode-Programm des konstruktiven Ingenieurbaus umfasst derzeit die in Tabelle 1 aufgeführten Normen bei unterschiedlichem Stand der Bearbeitung.

Der EN 1997-1 Eurocode 7 „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik „ - Teil 1: Allgemeine Regeln - liegt seit Juli 2002 als Entwurf einer Deutschen Norm vor, nachdem bereits 1996 eine erste deutsche Fassung als Vornorm erschienen ist. Derzeit wird die endgültige Fassung redaktionell bearbeitet, die in 2004 erwartet wird. Teil 2 wird die Laboruntersuchungen, Teil 3 die Felduntersuchungen behandeln. Beide Teile sind im Stadium einer Vornorm. Neben dieser grundlegenden Norm, die alle geotechnischen Entwurfs- und Bemessungsaufgaben beinhaltet, werden unter der Leitung des CEM/TC 288 eine Reihe von Fachnormen der Bauausführung mit dem Haupttitel *Execution of special geotechnical work* , in deutscher Fassung unter „Ausführung von besonderen Arbeiten des Spezialtiefbaus“ erarbeitet. Tabelle 2 gibt einen Überblick über den derzeitigen Bearbeitungsstand.

DIN EN 1536	Bohrpfähle	<i>Bored piles</i>
DIN EN 1537	Verpressanker	<i>Anchors</i>
DIN EN 1538	Schlitzwände	<i>Diaphragm walls</i>
DIN EN 12063	Spundwandkonstruktionen	<i>Sheet piles</i>
DIN EN 12699	Verdrängungspfähle	<i>Displacement piles</i>
DIN EN 12715	Injektionen	<i>Grouting</i>
DIN EN 12716	Düsenstrahlverfahren	<i>Jet-grouting</i>
DIN EN 14199	Pfähle mit kleinem Durchmesser (Minipfähle)	<i>Micro-piles</i>
DIN EN 14475	Bewehrte Schüttkörper	<i>Reinforced soil</i>
DIN EN 14490	Bodenvernagelung	<i>Soil nailing</i>

Tabelle 2: Normenreihe Spezialtiefbau (*Original EN kursiv*), Status siehe www.betonverein.de

Da die EN 1997-1, die für alle Mitglieder der EU geltenden allgemeinen Grundsätze beschreibt, sollten die länderspezifischen Besonderheiten in einem sog. Nationalen Anwendungsdokument NAD hinterlegt werden. Hierzu wurden zunächst viele der bestehenden Fachnormen und Regelwerke mit dem Zusatz -100 den Europäischen Rahmennormen angepasst (z. B. DIN 4084-100, EAB-100). In diesem Zusammenhang ist 1996 auch die DIN 1054-100 erschienen, die ursprünglich als NAD des EC 7 gedacht war. In der Endphase der Bearbeitung beider Normen war in einigen Punkten kein Konsens zu finden, ohne das bestehende Sicherheitsniveau der deutschen Norm aufzugeben. So sollte nach deutscher Sicht die wesentlichen Nachweise von Flachgründungen, Gleiten, Kippen und Grundbruch in GZ 1B (Versagen Bauwerk u. Boden) eingestuft werden, während dies nach EC 7 dem GZ 1C (Versagen Boden) zugeordnet wird. Eine weitere Unstimmigkeit betrifft die Bemessungswerte bei der Erddruckermittlung. Einzelheiten hierzu werden unten und in den Beispielen der Folgevorträge behandelt. Diese Unstimmigkeiten führten letztlich zu einer parallelen Ausarbeitung des EC 7 und der DIN 1054, die im Januar 2003 als Weißdruck erschienen ist, aber noch nicht bauaufsichtlich eingeführt wurde. Die Europäische Norm EC 7 und die Deutsche Variante DIN 1054 werden für eine Zeitdauer von 5 Jahren parallel erprobt. Nach dieser Koexistenzperiode gilt ausschließlich EC 7. Die divergierenden Inhalte und die Freiräume sollen durch ein bis dahin neu zu erstellendes NAD (Ergänzungsnorm) geregelt werden, das sich eng an DIN 1054 orientieren wird.

Auch wenn sich derzeit durch die Zweigleisigkeit alter und neuer Normen einerseits und nationaler und Europäischer Normen andererseits vermeintliche Freiräume ergeben, ist die Linie für die Sicherheitsnachweise in der Geotechnik klar vorgezeichnet. Da die übrigen Disziplinen des Bauingenieurwesens zunehmend die Europäischen Standards anwenden werden, ist auch die Geotechnik in den EC 1 und EC 2 eingebunden. Eine konsistente Bemessung ist dann nur mit den Regelwerken möglich, die auf dem Teilsicherheitskonzept aufbauen. Ob nun in der Koexistenzperiode nach DIN 1054 oder nach EC 7 (+NAD) bemessen wird ist eher eine nachgeordnete Frage, die Unterschiede sind geringer als zunächst vermutet. Die derzeitige Normenvielfalt wird sich lichten, DIN 1054 bzw. EC 7 regeln künftig die Bemessung und die Sicherheitsnachweise und ersetzen zusammen mit den in Tab. 2 aufgeführten Anwendungsnormen die bisherigen Fachnormen DIN 4014, DIN 4125, DIN 4126 und DIN 4128.

3. Das Teilsicherheitskonzept im aktuellen Normenwesen

Beim Teilsicherheitskonzept werden Grenzzustände betrachtet, bei deren Überschreiten Teile des Bauwerks oder das Bauwerk als Ganzes die gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllen. Eine ausreichende Sicherheit ist nachgewiesen, wenn die Grenzzustandsbedingungen nicht verletzt werden, wenn für den Bemessungsfall die Beanspruchung kleiner ist als die Beanspruchbarkeit. Die erwarteten Einwirkungen (Charakteristische Werte) werden dabei durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht, die erwarteten Widerstände werden abgemindert.

Hierzu werden zwei Gruppen von Grenzzuständen unterschieden:

- *Grenzzustand der Tragfähigkeit* (ULS Ultimate Limit State) oder allgemein **GZ 1**
- *Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit* oder Gebrauchstauglichkeit (SLS Serviceability Limit State) oder allgemein **GZ 2**.

Unter *Grenzzustand der Tragfähigkeit* werden Zustände betrachtet, bei deren Überschreiten Menschen akut gefährdet sind. Wegen der unterschiedlichen Modellbildung und Empfindlichkeit gelten für die verschiedenen Versagensarten unterschiedliche Grenzzustandgleichungen, Nachweisverfahren und Teilsicherheitsfaktoren. Die bei geotechnischen Nachweisen zu betrachtenden Grenzzustände sind in DIN 1054 wie auch in EC 7 abgegrenzt. Tabelle 3 zeigt die Bezeichnungen und Zuordnungen.

Die Definition der Grenzzustände ist in beiden Normen sinngemäß, wengleich sich die formelmäßige Beschreibung und die empfohlenen Werte der Teilsicherheitsfaktoren unterscheiden.

Alle Auftriebs- Aufschwimm- und Abhebephänomene von Bauteilen oder Konstruktionen werden nach GZ 1A bzw. UPL nachgewiesen:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} \quad (3)$$

$V_{dst;d}$ = Bemessungswert der ständigen und veränderlichen destabilisierenden vertikalen Einwirkungen, i.w. Wasserdruckkräfte

$G_{stb;d}$ = stabilisierende ständige vertikale Einwirkungen

Für Bauteile, Konstruktionen und Strukturen wird nach GZ 1B bzw. nach EQU oder STR die ausreichende Abmessung nachgewiesen oder im Entwurf ermittelt. Der Nachweis ist erbracht, wenn gilt:

$$\sum E_{d,i} \leq \sum R_{d,i} \quad (4)$$

$E_{d,i}$ = Bemessungswerte der Beanspruchung

$R_{d,i}$ = Bemessungswerte der Widerstände

Die Beanspruchung wird nach DIN 1054 für diesen Grenzzustand mit charakteristischen Kenngrößen des Baugrundes ermittelt und erst unmittelbar zum Nachweis des Bauteils in einen Bemessungswert umgerechnet. Diese Vorgehensweise wird Verfahren mit faktorisierenden Widerständen (VFW) genannt.

Grenzzustände der Tragfähigkeit	
DIN 1054 (4.3)	EC 7 (2.4.7)
<p>GZ1A: Verlust der Lagesicherheit ohne Bruch im Boden <i>Auftrieb, Aufschwimmen, Abheben, Hydraulischer Grundbruch</i></p> <p>.....</p> <p>GZ1B: Versagen von Bauwerken und Bauteilen durch Bruch der Konstruktion oder des Bodens. <i>Gleiten und Grundbruch von Gründungskörpern, Nachweis von Pfählen, Stützbauwerken, Schlitzwänden, Verankerungen, Boden- und Felsnägel....</i></p> <p>.....</p> <p>GZ1C: Verlust der Gesamtsicherheit durch Bruch im Baugrund. <i>Böschungs-, Geländebruch.....</i></p>	<p>UPL: Versagen durch Auftrieb infolge vertikaler Kräfte <i>Auftrieb, Aufschwimmen</i></p> <p>EQU: Versagen durch Verlust des statischen Gleichgewichtes des als starrer Körper angesehenen Tragwerkes oder des Baugrundes, ohne Einfluss der Festigkeit. <i>Kippen, Abheben durch Herausziehen</i></p> <p>HYD: Baugrundversagen infolge hydraulischer Gradienten <i>Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion, Röhrenbildung im Boden</i></p> <p>.....</p> <p>STR: Inneres Versagen oder sehr große Verformung des Tragwerkes oder seiner Bauteile einschl. Fundamente, Pfähle, Kellerwände usw.. wobei die Festigkeit der Baustoffe entscheidend ist. <i>Tragelemente wie Gründungskörper, Stützbauwerke, Schlitzwände, Pfähle, Verankerungen....</i></p> <p>.....</p> <p>GEO: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrundes, wobei die Festigkeit des Baugrundes entscheidend ist. <i>Böschungs-, Geländebruch, Grundbruch, Gleiten, Grundbruch..</i></p>

Tabelle 3: Definition und Abgrenzung der verschiedenen Grenzzustände der Tragfähigkeit

Alle Versagensfälle, die durch Bodenwiderstände bestimmt werden - typischer Fall ist der Böschungsbruch - werden GZ 1C bzw. GEO zugeordnet. In der Grenzzustandsgleichung werden die Bemessungseinwirkungen den Widerständen gegenübergestellt, die mit den Bemessungswerten der Scherfestigkeiten ermittelt wurden. Diese Betrachtungsweise wird Verfahren mit faktorisierenden Scherparametern (VFS) genannt.

Der EC 7 sieht zusätzlich den Grenzzustand HYD vor, in dem geohydraulische Phänomene wie innere Erosion oder Hydraulischer Grundbruch betrachtet werden. Im Gegensatz zu GZ 1A bzw. EQU werden bei diesem Grenzzustand Bemessungswerte der Boden- und Wasserspannungen betrachtet:

$$u_{dst;d} \leq s_{st;d} \quad (5)$$

$u_{dst;d}$ = Bemessungswert des destabilisierenden totalen Porenwasserdrucks

$s_{st;d}$ = Bemessungswert der stabilisierenden totalen Vertikalspannung

Nach DIN 1054 (Kap. 11) wird der Hydraulische Grundbruch dem GZ 1A zugeordnet, wobei die Strömungskräfte den Gewichtskräften gegenübergestellt werden. Für Nachweise der Grenzzustände GZ 1B und GZ 1C setzt DIN 1054 eine ausreichende Duktilität des Gesamtsystems voraus, eine unschädliche Umlagerung von Kräften im Baugrund und im Baugrund bei steigender Einwirkung.

Ein weiterer Unterschied der beiden Normen besteht in der Zuordnung der einzelnen Versagensarten. Gleiten und Grundbruch werden nach DIN 1054 in GZ 1B behandelt, während der EC 7 diese Versagensarten als reines Bodenversagen im Grenzzustand GEO auffasst. Auf einen weiteren Unterschied, dem Übergang zu den Bemessungswerten in GZ 1B bzw. STR, wird unten eingegangen.

Der *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit* GZ 2 ist in der Regel nicht mit der akuten Gefahr für Menschen verbunden. Jedoch ist bei dessen Überschreiten die Nutzungsfähigkeit des Bauwerks eingeschränkt oder gar auszuschließen, ohne dass die Tragfähigkeit verloren geht. Kriterien können sowohl Spannungen oder Kräfte als auch Verformungen sein. Typische Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind:

- Verformungen, die die planmäßige Nutzung ausschließen
- Eigenschwingungen, die eine Nutzung ausschließen
- Beanspruchungen, die im Laufe der Zeit die Dauerhaftigkeit beeinflussen

Zum Nachweis der Grenzzustände werden die Einwirkungen (Beanspruchung) wie auch die Widerstände (Beanspruchbarkeit) durch charakteristische Werte beschrieben. Es ist nachzuweisen, dass ein vorgegebener oder festgelegter Grenzwert der Beanspruchung unter den Gebrauchlasten nicht überschritten wird.

Einwirkungen sind gem. Definition in EN 1990 Kraft- oder Verformungsgrößen, die auf das Bauwerk oder auf den Baugrund wirken. Sie können direkt, indirekt, statisch, dynamisch, ständig, lokal, zeitlich oder räumlich veränderlich sein. Typische Einwirkungen in geotechnischen Nachweisen sind Gründungslasten durch das aufliegende Tragwerk, Gewichtskräfte, Erd- und Wasserdruck auf Bauteile, Strömungskräfte, Seitendruck und negative Mantelreibung auf Pfähle, Lasten aus Zwangsverformungen oder auch Scherfestigkeitsverluste infolge Entfestigung. Zu den dynamischen Einwirkungen zählen Verkehrslasten, Maschinenlasten,

Anprall- oder Stoßlasten und Erdbeben. Der Effekt aus mehreren Einwirkungen oder sog. Einwirkkombinationen ergibt die Beanspruchung des Bauteils oder des Baugrundes.

Der *Widerstand* wird i. A. als Schnittgröße, meist als Spannung im Tragwerk oder im Baugrund beschrieben. Er ist die Reaktion des Bauteils auf die Einwirkung und hängt von der Festigkeit oder der Steifigkeit des Baustoffes oder des Baugrundes ab. In den Grenzzuständen GZ 1C bzw. GEO treten nur Bodenwiderstände auf, i. e. Scherfestigkeiten oder Steifigkeiten. Aus der Summe der Bauteil- oder Bodenwiderstände ergibt die Beanspruchbarkeit des Bauteils oder des Baugrundes.

Charakteristische Werte sind „vorsichtige“ Mittelwerte einer Einwirkung oder eines Widerstandes, die aus Berechnungen oder aus Materialuntersuchungen abgeleitet werden. Sie erhalten den Index „k“. Nach DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke“ sind die charakteristischen Bodenkenngößen so festzulegen, dass die Ergebnisse von Berechnung und Abschätzungen auf der „sicheren Seite“ liegen. DIN 1054 und EC 7 definieren die charakteristischen Werte als Nennwerte, die unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Bauwerks nicht zur ungünstigen Seite hin unterschritten (Widerstände) bzw. überschritten (Einwirkungen) werden. EC 7 gibt ergänzend zu dieser sehr allgemeinen Definition konkrete Empfehlung zur Festlegung dieser Werte nach statistischen Verfahren [BAUDUIN, 2002].

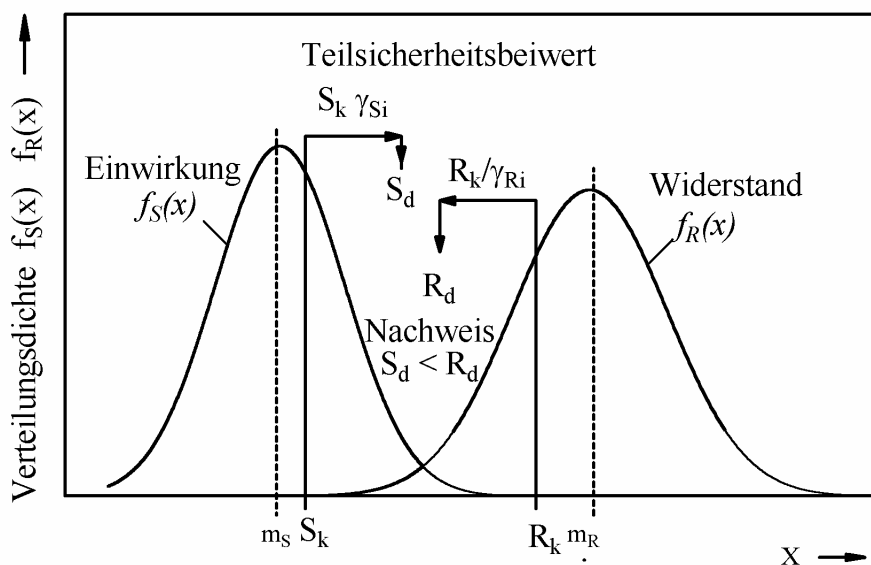


Bild 1: Übergang von Charakteristischen Werten zu Bemessungswerten durch Multiplikation bzw. Division mit Teilsicherheitsbeiwerten

Die charakteristischen Werte der Einwirkung S_k und des Widerstandes R_k werden durch die *Teilsicherheitsbeiwerte* g (partial safety factors, in EC 7 mit Teilsicherheitsfaktoren übersetzt) in *Bemessungswerte* (design values) überführt, die durch den Index d gekennzeichnet werden. Die Multiplikation bzw. Division mit den Teilsicherheitsfaktoren wird in den Regelwerken „faktorisieren“ genannt. Die Bemessungswerte sind damit die durch Faktoren erhöhte (Einwirkungen S_d) und abgeminderte (Widerstände R_d) Größen, mit denen letztlich die Grenzzustandsgleichung grenzzustandsspezifisch nach den Gl. 3 bis 5 bzw. allgemein mit Gl. (6) nachgewiesen wird.

$$E_d \leq R_d \quad (6)$$

E_d = Bemessungswert der Einwirkung, Beanspruchung

R_d = Bemessungswert des Widerstandes, Beanspruchbarkeit

Bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit (Widerstand) ist das dem Grenzzustand zugrundeliegende physikalische Modell für das System Bauwerk/Boden zu berücksichtigen. Generell bilden sich die Bemessungswerte des Widerstandes

$$R_d = \sum \frac{R_{k,i}}{g_{r,i}} \quad (7)$$

Soweit es sich bei den Widerständen um Scherfestigkeiten oder Reibungsbeiwerte handelt, werden diese gem. Gl (8)- (10) von charakteristischen Werten mit den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten in Bemessungswerte umgerechnet.

Reibungswinkel und Kohäsion $\tan j'_d = \frac{\tan j'_k}{g_j} \quad (8) \quad c'_d = \frac{c'_k}{g_c} \quad (9)$

Wand- und Sohlreibungswinkel $\tan d_d = \frac{\tan d_k}{g_j} \quad (10)$

Die Teilsicherheitsbeiwerte bzw. -faktoren selbst sind getrennt für Einwirkungen und Widerstände in den Regelwerken tabellarisch aufgeführt (DIN 1054, Tab. 2 und 3; EC 7 Anhang A). Sie unterscheiden sich nach der Art der Einwirkung bzw. des Widerstandes und nach dem Lastfall (DIN 1054) bzw. nach der Kombination der Einwirkungen. Die einzelnen Schritte des Sicherheitsnachweises nach dem Teilsicherheitskonzept sind in Tab. 4 aufgezeigt.

Der in EC 7 bezeichnete Widerstands-Nachweis, die Gegenüberstellung von Bemessungsbeanspruchung und Bemessungswiderständen nach Gl. 6, stellt sich in konkreten Bemessungssituationen nicht immer klar dar. Rein formal bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Grenzzustandsparameter mit Teilsicherheitsfaktoren zu belegen. So können die Einwirkungen erhöht, die Bodenkenngrößen reduziert oder aber analog zum globalen Sicherheitskonzept der Gesamtwiderstand abgemindert werden. Für einige der geotechnischen Nachweise ist keinesfalls vor einer Berechnung zu erkennen, ob eine Einwirkung zu einer Beanspruchung oder zur Erhöhung der Beanspruchbarkeit führt. Als Beispiel seien hier die Eigengewichtskräfte und Auflasten beim Nachweis der Sicherheit eines Geländesprungs oder die außermittigen Lasten beim Grundbruchnachweis aufgeführt. Bei der Bearbeitung des EC 7 zeigte sich, dass die Europäische Bemessungspraxis, die Festlegung der Grenzzustände, in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich gehandhabt wird. Je nach Grenzzustandsdefinition können Teilsicherheitsfaktoren auf Einwirkungen (A), auf Bodenkenngrößen oder Materialkennwerte (M) und Bodenwiderstände bzw. Gesamtwiderstände, angewendet werden. Während DIN 1054 hier klare Vorgaben zu den Grenzzustandsgleichungen und zu den Teilsicherheitsbeiwerten gibt, versucht der EC 7, der unterschiedlichen Bemessungspraxis der einzelnen Mitgliedsländer gerecht zu werden. Die Rahmennorm EC 7 lässt daher dem Anwender in Kap. 2.4.7.3.4 drei prinzipielle Nachweisverfahren offen, die sich in der Kombination der Faktorisierung, i. e. in den zugeordneten Teilsicherheitsfaktoren unterscheiden. Dem nach DIN 1054 häufigsten Nachweis nach GZ 1B kommt Nachweisverfahren 2 am nächsten, bei dem die Beanspruchung und die Widerstände des Baugrundes oder des Bauteils faktorisiert werden. Für Nach-

weis-Verfahren 2 wird in EC 7 die Kombination A1 “+“ M1 “+“ R2 empfohlen. Die Kombination bezieht sich auf die zu verwendenden Teilsicherheitsfaktoren nach den Tabellen des Anhangs A, EC 7, worin Teilsicherheitsfaktoren für Lasteinwirkungen (Gruppe A1 u. A2), solche für Bodenkenngrößen (Gruppe M1 u. M2) und solche für Widerstände (Gruppe R1 bis R4) unterschieden werden. Die Werte für die häufig vorkommenden Grenzzustände STR und GEO sind hier im Anhang 2 wiedergegeben. Für einen Grundbruchnachweis nach Verfahren 2 bedeutet die oben aufgeführte Kombination A1 “+“ M1 “+“ R2, dass die Charakteristischen Lasten mit den TSF (A1): $\gamma_G = 1,35$ u. $\gamma_Q = 1,5$ zu erhöhen sind, die Bodenwiderstände bleiben wegen M1: $\gamma_\phi = \gamma_c = 1$ unverändert, und der Grundbruchwiderstand ist nach R2 mit γ_{Gr} abzumindern. Wählt man dagegen das Nachweisverfahren 1, hier die Kombination A2 “+“ M2 “+“ R1, so sind die charakteristischen Lasten mit den TSF A2: $\gamma_G = 1,00$ u. $\gamma_Q = 1,3$ zu erhöhen, die Scherparameter sind nach M2 mit $\gamma_\phi = \gamma_c = 1,25$ zu faktorisieren und der Grundbruchwiderstand bleibt für R1: $\gamma_{Gr} = 1,00$ unverändert. Als weiteres Beispiel wird in WOLFF u. WITT, 2003 eine Bohrpfahlbemessung erläutert. Die genaue Zuordnung der einzelnen Nachweisverfahren zu den Grenzzuständen der Geotechnik bleibt den Nationalen Anwendungsdokumenten überlassen, so dass auch nationale Unterschiede im Ergebnis bestehen bleiben werden. Jedoch kann es durchaus vorkommen, dass bei Unklarheit über den Sicherheitseinfluss einer Größe nach EC 7 mehrere Nachweisverfahren durchgerechnet und verglichen werden müssen.

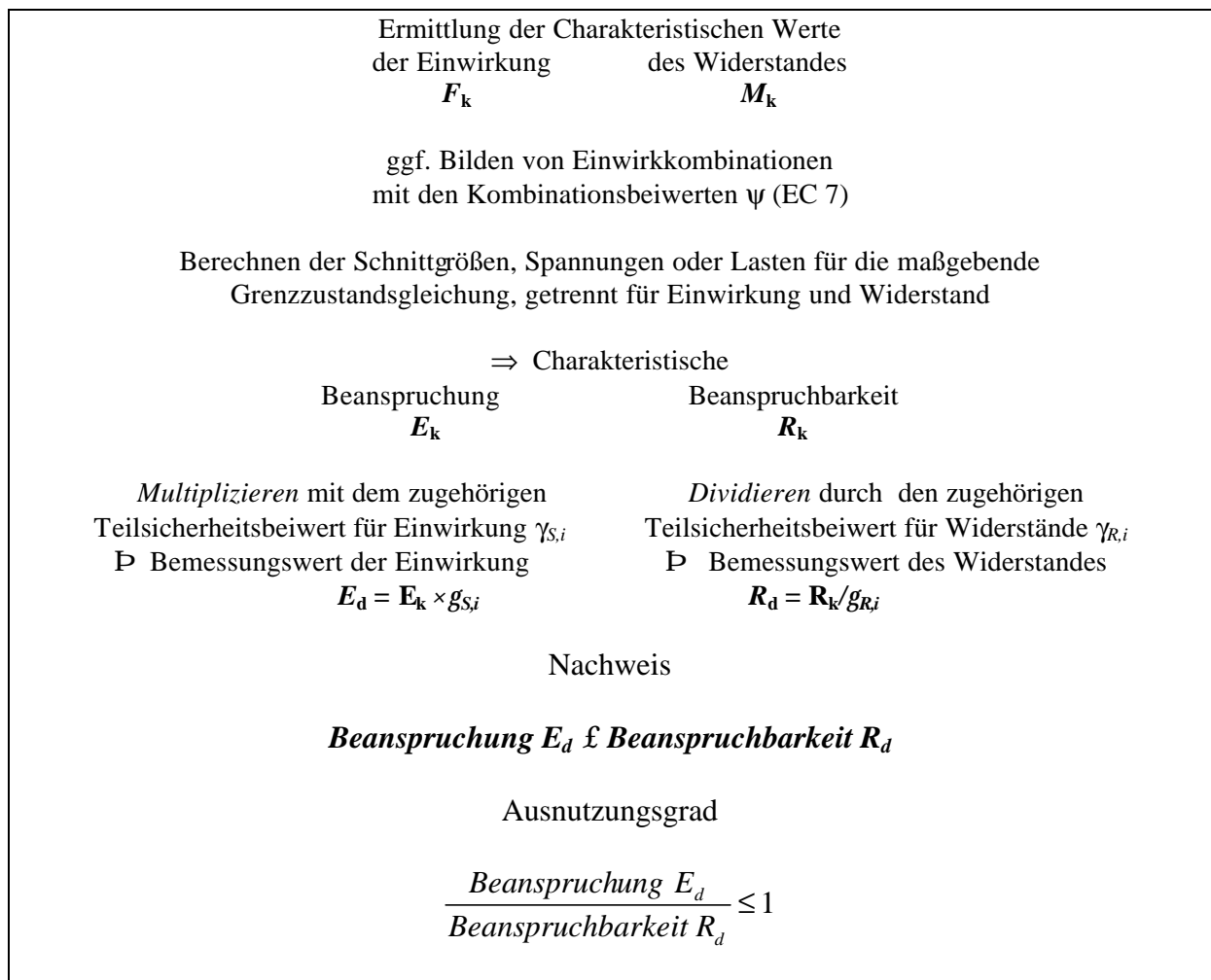


Tabelle4: Generelles Vorgehen beim Nachweis von Grenzzuständen mit Teilsicherheitsbeiwerten

Für die praktische Anwendung ergeben sich grenzzustandsspezifisch eine Reihe von Besonderheiten und Abweichungen, die in den Regelwerken beschrieben sind und in den nachfolgenden Vorträgen an Beispielen erläutert werden. Hier sollen zum prinzipiellen Verständnis nur einige wichtige Festlegungen und auch Unterschiede von DIN 1054 und EC 7 behandelt werden. Weitere Beispiele und Erläuterungen zu den geotechnischen Nachweisen nach DIN 1054 finden sich in ZIEGLER, 2003.

In den bisherigen Normen, die auf dem globalen Sicherheitskonzept basieren, wurden i. A. drei *Lastfälle* betrachtet. In EC 7 wird dies aufbauend auf EN 1990 über die Wichtung der Einwirkungskombinationen geregelt. In DIN 1054 wurde der Begriff des Lastfalls übernommen. In Tabelle 2 (Einwirkungen) und Tabelle 3 (Widerstände) der DIN 1054 sind die Teilsicherheitsbeiwerte jeweils für drei Lastfälle unterschieden (vgl. Anhang). Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, die Unsicherheiten und die Einflüsse der einzelnen Grenzzustandparameter zu berücksichtigen. Die Lastfälle werden jedoch nicht generell definiert, sondern ergeben sich aus der Einwirkungskombination und der Sicherheitsklasse des Bauwerks. Damit werden im Sinne einer Risikobetrachtung die Eintrittswahrscheinlichkeit (Einwirkungskombination) und die Schadensfolgen (Sicherheitsklasse) berücksichtigt. Vergleichbar mit der klassischen Lastfalldefinition werden betrachtet:

Regel-Kombination	EK 1: Ständige und regelmäßig auftretende Lasten
Seltene Kombination	EK 2: seltene oder einmalige planmäßige Einwirkungen
Außergewöhnliche Kombination	EK 3: Gleichzeitig mögliche außergewöhnliche Einwirkungen, Katastrophen, Unfälle

Auf Seiten der Widerstände werden Sicherheitsklassen SK 1 bis SK 3 betrachtet, mit denen die Anforderung an die Sicherheit in Abhängigkeit von der Dauer und Intensität der maßgebenden Einwirkungen auf den Widerstand des Bauteiles berücksichtigt wird:

SK 1: Auf die Funktionszeit des Bauwerks angelegte Zustände

SK 2: Bauzustände bei der Herstellung und Reparatur des Bauwerkes

SK 3: Während der erwarteten Funktionszeit einmalig oder nie auftretende Zustände

	SK 1	SK 2	SK 3
EK 1	LF 1	LF 2	
EK 2	LF 2	LF 2-3 interpoliert	LF 3
EK 3		LF 3	$\gamma_E = \gamma_R = 1$

Tabelle 5: Zuordnung der Lastfälle über Einwirkungskombinationen und Sicherheitsklassen

Die Lastfälle werden je nach Kombination von Einwirkung und Sicherheitsanforderung nach Tab. 5 zugeordnet. Hieraus ergibt sich wie bisher, dass LF 1 der ständigen Bemessungssituation entspricht, während LF 2 die vorübergehende und LF 3 die außergewöhnliche Bemessungssituation charakterisieren. Offen bleiben Kombinationen aus einer Regeleinwirkung und einer Sicherheitsklasse mit außergewöhnlichen Zuständen sowie umgekehrt.

In der deutschen Bemessungspraxis wird der eigenen Einschätzung zufolge derzeit DIN 1054 bevorzugt angewendet. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass sich diese Norm eng an den bisherigen Nachweisen und dem Sicherheitsniveau anlehnt, während der EC 7 auch die Besonderheiten der anderen Mitgliedsländern der EU berücksichtigt und daher nicht die für deutsche Normen gewohnte Klarheit besitzt. Zur Abrundung sollte die Rahmennorm EC 7 immer in Verbindung mit dem noch ausstehenden nationalen Anwendungsdokument gesehen werden. Das Nachweisprinzip und die Terminologie beider Normen sind weitestgehend identisch, die Unterschiede in den Zahlenwerten der Teilsicherheitsbeiwerte bzw. -faktoren lassen sich ebenfalls im nationalen Anwendungsdokument synchronisieren. Aktuell liegt der wesentliche Unterschied in der Zuordnung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit bei einem Versagen eines Bauteils infolge Bruch des Bodens i. w. im Nachweis der Sicherheit gegen Grundbruch, der nach DIN 1054 in GZ 1B fällt, nach EC 7 als reines Bodenversagen dem Grenzzustand GEO zugeordnet wird. DIN 1054 verfolgt in der empfohlenen Nachweismethode das Prinzip, dass die Beanspruchung und die Beanspruchbarkeit eines Bauteils infolge Boden, z. B. Erddruck oder Grundbruchwiderstand, immer mit charakteristischen Bodenkenngrößen zu führen ist. Erst unmittelbar zum Nachweis des Bauteils (z. B. Fundament, Stützmauer oder Baugrubenwand) werden Beanspruchung und Beanspruchbarkeit in Bemessungswerte umgerechnet. Dieses Nachweisprinzip wird Verfahren mit faktorisierenden Widerständen genannt (VFW). Ermittelt man dagegen die Belastung und die Belastbarkeit direkt mit Bemessungswerten der Scherparameter des Bodens, ergeben sich andere, realitätsfernere Belastungsfiguren für das Bauteil. So würde man z. B. zur Erddruckermittlung oder für die Grundbruchfigur andere Gleitkörper als die charakteristischen betrachten. Diese Vorgehensweise, Verfahren mit faktorisierenden Scherparameter VFS genannt, sollte nach Ansicht der Aufsteller der DIN 1054 ausschließlich dem dort beschriebenen GZ 1C, dem Nachweis des Böschungs- und Geländebruchs, vorbehalten bleiben.

Die Europäische Normen wie auch die nationale Umsetzung sind auf dem Gebiet der Geotechnik bis zur Gebrauchstauglichkeit entwickelt. Die Nachweismethoden mit Teilsicherheitsbeiwerten bzw. -faktoren wird zur Anwendung und Erprobung empfohlen. Die Vorgehensweise ist konsistent und in den umfangreichen Normenwerken ausführlich beschrieben. Zur Anwendung werden in Kürze noch Kommentare erscheinen. Die in den nachfolgenden Beiträgen behandelten Beispiele typischer und häufig vorkommender Nachweise orientieren sich an der DIN 1054, sind aber sinngemäß mit den obigen Einschränkungen hinsichtlich der Zuordnung der Grenzzustände ebenso auf EC 7 übertragbar.

Literatur

Bauduin, Ch.: Ermittlung charakteristischer Werte. In Smolczyk (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch,, Teil 1, 6. Auflage, S. 17-48, Verlag Ernst&Sohn, 2002

Benjamin, J.R. und Cornell, C.A.: Probability, Statistics, and Desision for Civil Engineers. Mc Graw-Hill Book Company, New York , 1970

Brinch Hansen, J.: Definition und Größe des Sicherheitsgrades im Erd- und Grundbau. Der Bauingenieur 34, 1959, S. 87-89.

Gudehus, G.: Sicherheitsnachweise für Grundbauwerke. Geotechnik 10, 1987, H. 1, S. 4-34

Leussink, H.: Die Sicherheit im Grund- und Erdbau. Die Bautechnik 33, 1942, S. 297-302

Mayer, M.: Die Sicherheit der Bauwerke. Julius Springer Verlag, Berlin 1926

NABau-Arbeitsausschuß „Sicherheit im Bauwesen“: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen (GruSiBau). Beuth-Verlag GmbH Berlin, Köln, 1981

Smolczyk, U. u. Bauduin, Ch.: Internationale Vereinbarungen. In Smolczyk (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch,, Teil 1, 6. Auflage, S. 1-16, Verlag Ernst&Sohn, 2002

Terzaghi, K. u. Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice. 9th Ed. John Wiley&Sons Inc. New York, 1956

Wedler, D. B.: Richtlinien für die zulässige Belastung des Baugrundes und der Pfahlgründungen DIN 1054; Erläuterungen. Verlag W. Ernst Sohn, 1947

Wolff, T. u. Witt, K. J.: Sicherheitsnachweise für axial belastete Bohrpfähle. In Schanz, T. u. Witt K. J. (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Bauhaus-Universität Weimar, Heft 9: Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Geotechnik, Universitätsverlag Bauhaus-Universität Weimar, 2003

Witt, K. J.: Grundsätzliches zum Teilsicherheitskonzept in der Geotechnik. Schriftenreihe Geotechnik Bauhaus-Universität Weimar, Heft 1: Geotechnische Nachweise nach dem neuen Sicherheitskonzept, Universitätsverlag Bauhaus-Universität Weimar, 1998

Ziegler, M.: Geotechnische Nachweise nach der neuen DIN 1054 in Beispielen. Verlag Ernst& Sohn, 2003

Verfassers: Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Professur Grundbau
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11c
D-99423 Weimar
Tel. 03643/584560
email: kj.witt@uni-weimar.de

Anhang 1: Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054:2003-01

Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen (Tab. 2, DIN 1054)

Einwirkung	Formelzeichen	Lastfall		
		LF 1	LF 2	LF 3
GZ 1A: Grenzzustand des Verlustes der Lagesicherheit				
Günstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G, stb}$	0,90	0,90	0,95
Ungünstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G, dst}$	1,00	1,00	1,00
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	γ_H	1,35	1,30	1,20
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	γ_H	1,80	1,60	1,35
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q, dst}$	1,50	1,30	1,00
GZ 1B: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken und Bauteilen				
Ständige Einwirkungen, allgemein ^{a)}	γ_G	1,35	1,20	1,00
Ständige Einwirkungen aus Erdruchdruck	γ_{E0g}	1,20	1,10	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,50	1,30	1,00
GZ 1C: Grenzzustand des Verlustes der Gesamtstandsicherheit				
Ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
GZ 2: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
$\gamma_G = 1,00$ für ständige Einwirkungen				
$\gamma_Q = 1,00$ für veränderliche Einwirkungen				
^{a)} einschließlich ständigem und veränderlichem Wasserdruck				

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände (Tab. 3, DIN 1054)

Widerstand	Formelzeichen	Lastfall		
		LF 1	LF 2	LF 3
GZ 1B: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken und Bauteilen				
Bodenwiderstände				
Erdwiderstand und Grundbruchwiderstand	γ_{Ep}, γ_{Gr}	1,40	1,30	1,20
Gleitwiderstand	γ_{Gl}	1,10	1,10	1,10
Pfahlwiderstände				
Pfahldruckwiderstand bei Probelastung	γ_{Pc}	1,20	1,20	1,20
Pfahlzugwiderstand bei Probelastung	γ_{Pt}	1,30	1,30	1,30
Pfahlwiderstand auf Druck und Zug aufgrund von Erfahrungswerten	γ_P	1,40	1,40	1,40
Verpressankerwiderstände				
Widerstand des Stahlzugliedes	γ_M	1,15	1,15	1,15
Herausziehwiderstand des Verpresskörpers	γ_A	1,10	1,10	1,10
Widerstände flexibler Bewehrungselemente				
Materialwiderstand der Bewehrung	γ_B	1,40	1,30	1,20
GZ 1C: Grenzzustand des Verlustes der Gesamtstandsicherheit				
Scherfestigkeit				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens	γ_φ	1,25	1,15	1,10
Kohäsion c' des dränierten Bodens und Scherfestigkeit c_u des undrinierten Bodens	γ_c, γ_{cu}	1,25	1,15	1,10
Herausziehwiderstände				
Boden- bzw. Felsnägel, Ankerzugpfähle	γ_N, γ_Z	1,40	1,30	1,20
Verpresskörper von Verpressankern	γ_A	1,10	1,10	1,10
Flexible Bewehrungselemente	γ_B	1,40	1,30	1,20

Anhang 2: Teilsicherheitsfaktoren für den Nachweis der konstruktiven (STR) und geotechnischen (GEO) Grenzzustände nach EN 1997 Eurocode 7

A.2.1 Teilsicherheitsfaktoren für Einwirkungen (γ_F) oder Beanspruchungen (γ_E)

Einwirkung		Symbol	Werte	
Dauer	Bedingung		A1	A2
ständig	ungünstig	γ_G	1,35	1,00
	günstig	γ_G	1,00	1,00
veränderlich	ungünstig	γ_Q	1,50	1,30
	günstig	γ_Q	0	0

A.2.2 Teilsicherheitsfaktoren für Bodenkenngrößen (γ_M)

Bodenkenngröße	Symbol	Werte	
		M1	M2
Scherwinkel	γ_ϕ^1	1,00	1,25
effektive Kohäsion	γ_c	1,00	1,25
undrainierte Kohäsion	γ_{c_u}	1,00	1,40
einaxiale Festigkeit	γ_{qu}	1,00	1,40
Wichte	γ_σ	1,00	1,00
¹ Dieser Faktor wird auf $\tan\phi$ angewendet			

A.2.3 Teilsicherheitsfaktoren für Widerstände (γ_R)

A.2.3.1. Flachgründungen

Widerstand	Symbol	Werte		
		R1	R2	R3
Grundbruch	γ_{R_v}	1,00	1,40	1,00
Gleiten	γ_{R_h}	1,00	1,10	1,00

Weitere Teilsicherheitsfaktoren für Widerstände siehe Beispiele