

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Band:** 101 (1983)  
**Heft:** 7: Prof. Dr. Bruno Thürlimann zum 60. Geburtstag II.

**Artikel:** Denkanstösse im Grundbau oder die Lösung grundbaulicher Probleme mittels Gefährdungsbildern  
**Autor:** Vollenweider, Ulrich  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-75082>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Denkanstösse im Grundbau oder die Lösung grundbaulicher Probleme mittels Gefährdungsbildern

Von Ulrich Vollenweider, Zürich

Der Ingenieurgrundbau ist in Entwicklung, im Umbruch. Das zeigt schon die Flut neuer Vorschläge und neuer Theorien. Aber trotz dieser oder gerade wegen dieser Betriebsamkeit ist ein tiefes Missverständnis über die Stellung des Ingenieurgrundbaus nicht zu übersehen. Die Vorstellung ist weit verbreitet, dass der Grundbau sich vom konstruktiven Ingenieurbau nur in der Grösse des Variationskoeffizienten unterscheidet. Ein Missverständnis, das auf Verständigungsschwierigkeit bezüglich Möglichkeit und Grenzen der Geotechnik zurückzuführen ist.

Der vorliegende Beitrag versucht, für die speziellen Probleme des Ingenieurgrundbaus Verständnis zu wecken. In Richtung Verständigung zielt auch die Bemühung, die Gefährdungsbildtheorie, wie sie als Grundsatz in der Weisung SIA 260 verankert ist, anschaulich darzulegen. Am Beispiel des hydraulischen Grundbruchs wird die Sicherheitsbetrachtung erläutert und auf die Vorzüge der Problemerkennung und der Risikoabwägung aufmerksam gemacht. Der Verfasser sieht im neuen Sicherheitsdenken auch eine Möglichkeit, den bestehenden Graben zwischen den Traditionalisten und den Progressiven im Lager der Grundbauer überbrücken zu können.

## Einleitung

### Ein Zeitbild

Im April 1980 ist der Entwurf zur Norm SIA 193 «Baugruben» zur Vernehmlassung erschienen und hat eine überaus lebhaft und intensive Diskussion ausgelöst. Eine ähnliche intensive Anteilnahme hat die Weisung SIA 260 «Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken» erfahren, die in langen Jahren und unter heftigen Geburtswunden bis zu der nun bereinigten Fassung vom September 1982 heranreifen musste. In der Zeitschrift «Geotechnik», 1982/1, hat Smolczyk unter dem Titel Denkanstösse mit dem Beispiel Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch eine Diskussion in Gang gebracht, die kaum leidenschaftlicher hätte geführt werden können. Im «Canadian Geotechnical Journal», 1980/4, hat Peck mit seinem bemerkenswerten Beitrag «Where has all the judgment gone» die derzeitige Entwicklung auf dem Gebiet des Grundbaus aus seiner reichen und langjährigen Erfahrung recht unverblümt in Frage gestellt. Die erst kürzlich erfolgte Mitteilung über die Kreierung einer neuen ISO-Norm 182 «Geotechnik», basierend auf dem ebenfalls in Entwicklung begriffenen Eurocode EC 7 «Foundations», hat auch nicht überall nur helle Bewunderung erfahren. Der kritischen Beispiele wären noch viele, und aus Ingenieurkreisen ist deshalb die berechtigte Frage wohl kaum zu überhören: Wieso und wozu all diese Ereiferung? Was sollen diese widersprüchlichen Standpunkte? Stimmt hier etwas nicht?

### Eine Erklärung

In der Tat, hier stimmt etwas nicht. Aber die Unstimmigkeit ist nicht so sehr, wie viele meinen, materiellen oder natürlichen Ursprungs, sondern vielmehr eine Frage der immer schwerer werdenden Verständigung. Im Grunde genommen dreht sich die Diskussion doch immer um das Gleiche: die ingenieurmässige Behandlung grundbaulicher Aufgaben auf der Grundlage unvollständiger, unsicherer, schlecht verifizierbarer bis gar fragwürdiger Unterlagen, verbunden mit all den Fragen nach Sicherheit, Risiko, Verantwortung und Reglementierung. Ingenieurwesen und Unklarheit passen nun irgendwie einmal nicht zusammen, so meinen wenigstens viele. Stimmt das?

### Ein Versuch

Mit dem Beitrag trägt der Schreibende die Absicht, etwas zur Verständigung auf dem Gebiet Sicherheit und Grundbau beizutragen, indem er vor allem die Gedanken der Weisung SIA 260 möglichst praxisnah darzulegen versucht. Grundsätzlich enthält das Dargelegte wenig Neues, beschreibt es doch uraltes ingenieurmässiges Denken und Handeln, das nur leider in jüngster Zeit, wohl als Folge der rasanten Entwicklung von Erkenntnis und Technik, manchem Ingenieur etwas verloren ging. Wenn auch die Überlegungen wenig wissenschaftlich erscheinen, so müssen sie nicht auch gleich einen Schritt zurück bedeuten.

Im vorliegenden Beitrag werden viele Fragen aufgeworfen. Dies ganz be-

wusst, um – wie der Titel bereits sagt – Denkanstösse auszulösen.

## Der Fall Grundbau

Für viele ist nicht einzusehen, wieso der Grundbau etwas Besonderes sein soll. Es gelten doch die gleichen physikalischen Gesetzmässigkeiten und somit auch die gleichen allgemein anerkannten ingenieurtechnischen Spielregeln. Wieso soll sich dann der Grundbau vom übrigen konstruktiven Ingenieurbau in spezieller Weise ausnehmen? – hört man sagen.

Ingenieurmässiges Handeln wird allgemein von der Maxime geleitet, bei der Errichtung von Bauwerken, unter Wahrung bestimmter Ansprüche, Gebrauchsfähigkeit und Tragfähigkeit sicherzustellen. Dies gilt für den konstruktiven Ingenieurbau und dies gilt auch für den Grundbau. Doch die Wege, dieses Ziel zu erreichen, sind für die betrachteten Fachgebiete doch recht verschieden. Nachfolgende Hinweise mögen die Richtigkeit dieser Ausführung mit Argumenten belegen.



### Grundlagen

Während im konstruktiven Ingenieurbau die ingenieurtechnischen Grundlagen weitgehend im konstruktiven Normenwerk, insbesondere SIA 160, 161, 162 usw., verbindlich geregelt sind, gilt es im Grundbau, die gleiche Ausgangslage doch erst durch die Baugrunderkundung objektspezifisch zu erarbeiten. Überspitzt formuliert wäre zu folgern: Der Gegenpart zum konstruktiven Normenwerk auf der einen Seite bildet das geotechnische Gutachten auf der anderen Seite. Der Stellung der Normkommission entspricht die Stellung des Baugrundgutachters! Die Frage stellt sich: Wie verhält es sich mit der Qualität der erarbeiteten Grundlagen, insbesondere wenn man auch die zur Verfügung stehende Zeit und die eingesetzten Mittel mit in Betrachtung zieht?

### Lastseite

Die Norm SIA 160 «Lasten» liefert für die meisten Ingenieuraufgaben klar definierte Lastwerte, sei es für ständige Lasten, Wind, Schnee usw. Vergleichsweise sind im Grundbau diese Einwirkungen auf der Basis der Baugrunderkundung und in ingenieurmässiger Beurteilung durch den Ingenieur selbst zu ermitteln. Haben diese Werte in jedem Fall die Qualität von Normwerten?

### Materialseite

Im konstruktiven Ingenieurbau kann der Ingenieur seinen Werkstoff, sei es Stahl, Beton oder Holz, meist massgeschneidert im Werk bestellen und in bestimmter Güte liefern lassen. Wie verhält es sich diesbezüglich im Grundbau? Entspricht ein Kies-Sand einer bestimmten Materialbeschreibung einem Baustahl der Güteklasse Fe 510? Ein toniger Silt einem Beton BN 250? Und hat der Ingenieur auch wirklich Gewähr, dass ihm der Baugrund Kies-Sand und nicht toniger Silt als Werkstoff für sein Bauwerk liefert?

### Qualitätsgarantie

Der vom Ingenieur vorgesehene Werkstoff wird gemäss Bestellung in definierter und garantierter Güte geliefert. Entspricht er nicht der geforderten Qualität, so kann die Annahme vom Ingenieur verweigert werden, oder wenn nicht erkennbar, so kann der Lieferant für allfällige Mängel haftbar gemacht werden. Wie steht's hier im Grundbau? Der Ingenieur hat zwar eine Baugrundbeschreibung, die aber wohl kaum das Gütesiegel einer Qualitätsgarantie trägt. Es wird auch kaum je möglich sein, die Annahme des Baugrundes mit ähnlichen Argumenten zu verweigern. Ungeklärt bleibt die Frage, wieweit der Lieferant, d. h. der Bauherr, für Mängel an dem von ihm gelieferten Baugrund haftbar ist. Eine überaus interessante juristische Frage, die zu klären eigentlich für alle Beteiligten von grösstem Interesse sein müsste.

### Massgarantie

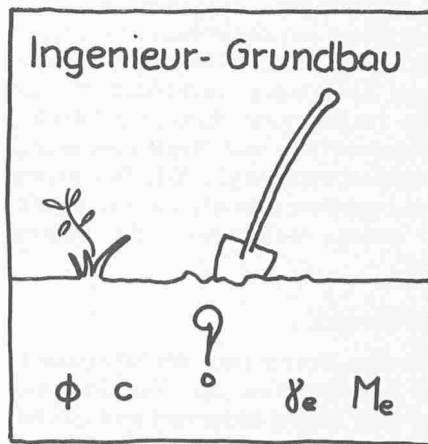
Im konstruktiven Ingenieurbau wird das Tragwerk masshaltig bestellt und gemäss Spezifikationen unter Toleranzgarantie geliefert, der Beton gemäss Schalungsplan, der Profilträger gemäss Werkstattplan. Im Grundbau liefert die Baugrunderkundung mit dem Baugrundmodell zwar auch so etwas wie eine Baugrundvermessung. Aber wie verbindlich sind denn die darin eingetragenen, mit Fragezeichen versehenen Schichtabgrenzungen? Die Angaben können doch wohl kaum mehr als eine nach bestem Wissen erfolgte Schätzung sein.

### Bemessungswerte

Das Normenwerk liefert für den konstruktiven Ingenieurbau klar definierte Bemessungswerte wie  $\sigma_e$ ,  $\beta_w$ ,  $E_b$  usw., die, da statistische Unterlagen vorhanden sind, klar definierten Fraktil- bzw. Erwartungswerten entsprechen. Was bedeutet aber vergleichsweise im Grundbau ein Scherparameter  $\phi'$  oder ein Steifemodul  $E_s$ ? Sind dies nicht Wertangaben, die meist nur empirisch geschätzt, oder wenn schon labormässig untersucht, so nur unter stark veränderten Randbedingungen gewonnen werden können.

### Risiko-Kosten-Betrachtung

Während es im konstruktiven Ingenieurbau kaum üblich ist, Risiko-Kosten-Überlegungen bei der Wahl des konstruktiven Sicherheitsmasses anzustellen, da ja die Sicherheit normmässig verbindlich vorgeschrieben ist, sind dagegen solche Betrachtungen im Grundbau nicht selten die Regel. Fragen wie die folgenden: sind weitere Baugrunduntersuchungen auszuführen, soll die Baugrube gesichert werden, ist eine Böschungsneigung 3:4 vertretbar, benötigt das Lehrgerüst eine Pfahlfundation, ist ein Brunnen zur Grundwasserentspannung erforderlich, ist die Wand auf erhöhten Erddruck zu bemessen, stellen sich sehr oft. Mit der Risiko-Kosten-Betrachtung erhält der Grundbau eine dem konstruktiven Ingenieurbau kaum bekannte weitere Dimension.



### Bauwerkabnahme

Im konstruktiven Ingenieurbau kann in der Regel mit relativ geringem Aufwand das Bauwerk auf der Baustelle begutachtet und kontrolliert werden. Im Grundbau ist dies nur sehr bedingt der Fall, da man zwar das anstehende Material, z. B. die Baugrubensohle, beurteilen kann. Ein Einblick in die tieferen Zonen bleibt dem Ingenieur jedoch meist verwehrt.

Die vorstehenden Hinweise sollten Beweis genug sein, dass *erhebliche Unterschiede zwischen den Fachbereichen*

*konstruktiver Ingenieurbau und Grundbau* bestehen. Diese Unterschiede sind nicht nur, wie vielfach die Meinung besteht, eine Frage der Grösse des Variationskoeffizienten. Der Baugrund wurde nun einmal unter einer dem Ingenieur verborgenen Entwicklung erschaffen. Die Nadelstiche, die ausgeführt werden, um den Baugrund zu erkunden, werden selten volle Klarheit über die Beschaffenheit und das physikalische Verhalten des *Werkstoffes Baugrund* vermitteln. Dementsprechend sollte auch versucht werden, dem Grundbau mit einer liberaleren Betrachtungsweise gegenüberzutreten und ihn nicht unangemessen reglementiert in ein enges Korsett legen zu wollen.

## Das Gefährdungsbild

Im Zentrum der Weisung SIA 260 «Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken» steht der Begriff Gefährdungsbild. Das Konzept fordert, dass bei der Formulierung von Sicherheitszielen stets von der Vorstellung von Gefährdungsbildern auszugehen sei. Eine höchst triviale Forderung und dennoch eine, die speziell auch für die Behandlung grundbaulicher Probleme von eminent wichtiger Bedeutung ist.

### Gefährdungsbild allgemein

Die Zuordnung einer ganz bestimmten Gefahr zu einem bestimmten Zeitabschnitt im Leben eines Bauwerkes legt ein Gefährdungsbild fest. Die betrachtete Gefahr wird *Leitgefahr* genannt. Andere im gleichen Zeitabschnitt auftretende Gefahren oder Umstände von Bedeutung werden als *Begleitumstände* bezeichnet. Die Leitgefahr von Gefährdungsbildern ist stets in extremer Wirkung, Form und Grösse, die Begleitumstände mit dem betrachteten Gefährdungsbild zuzuordnenden Erwartungswert anzunehmen. Zum Gefährdungsbild gehört, im Blick auf die Planung von Sicherheitsmassnahmen, auch stets eine konkrete Vorstellung möglicher Konsequenzen.

Gefährdungsbilder dienen ganz allgemein als *Grundlage für die Sicherheitsplanung im weitesten Sinn* und nicht, wie man meinen könnte, nur als Grundlage der Bemessung und der Festlegung von Bemessungswerten. Mit der Gefährdungsbildstudie lassen sich kritische Gefährdungszustände erkennen, denen auch mit anderen geeigneten Massnahmen wie Konzeptänderungen, zusätzliche Baugrunduntersuchungen, Bauüberwachungen usw. begegnet werden kann. Der Merksatz gilt, und

dies speziell für den Grundbau: *Jede Gefahr muss erkannt werden, aber nicht auf jede Gefahr muss bemessen werden.*

**Gefährdungsbild Grundbau**

Im Grundbau sind es im allgemeinen folgende Gefahren, die ein Gefährdungsbild beschreiben und somit für die Sicherheit eines Bauwerkes eine Gefährdung darstellen können:

- Erddruck
- Wasserdruck
- Wasseranfall
- Baugrunddeformation
- Baugrundbewegungen
- Modellbildung

Die Liste ist sicher unvollständig, denn man könnte sie ohne weiteres um Gefahren wie Frostdruck, Bodenchemismus usw. erweitern. Die genannten Gefahren lassen sich oft, aber sicher nicht immer, durch eine oder mehrere physikalisch oder geometrisch erfassbare Basisvariablen ausdrücken. Als *wichtigste Variablen* sind zu erwähnen:

- äussere Lasten  $p$
- Geländeaufasten  $q$
- Terrainveränderungen  $\Delta h$
- Temperatur  $t$
- Erschütterungen  $\sqrt{\quad}$
- Baugrundsichtung  $S$
- Materialparameter  $\gamma, \varphi, c, E_s,$
- Durchlässigkeit  $k$
- Grundwasserspiegel  $h_w$
- Porenwasserdruck  $p_u$
- Grundwasserströmung  $i$

Diese Variablen sind alle *mehr oder weniger zuverlässig erfassbar*. Daneben gibt es aber auch Einflüsse, die kaum mathematisch erfasst werden können und dennoch in die Gefährdungsbildbetrachtung miteinbezogen werden müssen, wie: menschliches Fehlverhalten, ungeklärtes Baugrundverhalten, Leitungsbrüche usw.

Bei der Untersuchung grundbaulicher Stabilitätsprobleme kann es durchaus angezeigt sein, eine Basisvariable wie z. B. die Scherfestigkeit  $\varphi$ , die Baugrundsichtung  $S$  oder der Grundwasserspiegel  $h_w$  als *Leitgefahr* eines Gefährdungsbildes zu nehmen. Dem steht nichts im Wege, da grundsätzlich alle, einen Gefährdungszustand beschreibenden Einflüsse, als Leitgefahr auftreten können. Die Praxis lehrt einen jedoch rasch, welche Gefahren für ein bestimmtes Problem als Leitgefahr und welche nur als Begleitumstand in Frage kommen können.

**Bemessung und Nachweis**

Im Falle der Bemessung, als einem Teilgebiet der gesamten Sicherheitsplanung, sind den zunächst qualitativ erfassten Gefährdungsbildern durch Ab-

straktion und Vereinfachung Gefährdungsmodelle zuzuordnen. Im Gefährdungsmodell werden die einzelnen Gefahren durch eine oder mehrere Basisvariablen  $Y_i$  erfasst. Der sichere Bereich des Tragwerkverhaltens für das betrachtete Gefährdungsbild und den zugehörigen Grenzzustand der Tragfähigkeit wird durch eine Sicherheitsbedingung der Form

$$(1) \quad G(y_1, y_2 \dots y_n) \geq 0$$

oder was gleichbedeutend und für grundbauliche Probleme oft zweckmässiger ist mit

$$(2) \quad G(y_1, y_2 \dots y_n) \geq 1$$

definiert. Hierin bedeuten die  $y_i$  ausreichend auf der sicheren Seite liegende Bemessungswerte der Basisvariablen  $Y_i$ . Die Bemessungswerte  $y_i$  sind unter Beachtung von Kenntnis und Streuung der Basisvariablen festzulegen und enthalten alle notwendig erscheinenden Sicherheitsvorgaben. Der Unschärfe der Modellbildung und des Berechnungsmodells ist mit einer angemessenen Sicherheitsvorgabe bei der Festsetzung des Wertes  $y'_1$  der Leitvariablen der Leitgefahr Rechnung zu tragen.

$$(3) \quad G(y'_1, y_2 \dots y_k) \geq 1$$

Wie die einzelnen Bemessungswerte  $y_i$  festgesetzt werden, hängt vom einzelnen Fall ab. Sie können auf Grund statistischer Unterlagen, auf Grund empirischer Erfahrung oder aber in rein ingenieurmässiger Beurteilung festgesetzt werden. Bei mangelnder Kenntnis der Baugrundverhältnisse dürfte letzteres nicht selten der beste Weg darstellen.

**Beispiel hydraulischer Grundbruch**

Die Technik der Lösung grundbaulicher Probleme mittels Gefährdungsbildern soll am Beispiel des hydraulischen Grundbruches erläutert werden. Dieses Beispiel wurde insbesondere auch deshalb gewählt, weil erst kürzlich in der Zeitschrift «Geotechnik» 1982/1 das gleiche Beispiel eine überaus intensive und auch interessante Fachdiskussion über den Begriff der hydraulischen Grundbruchsicherheit ausgelöst hat.

**Ausgangslage**

Die Ausgangslage ist rein hypothetisch und gestellt, aber deshalb nicht minder repräsentativ für den Fall aus der Praxis.

Für die Erstellung eines Bauwerkes ist der Aushub einer grossräumigen Baugrube von 3,5 m Tiefe ab OK Terrain erforderlich. Eine Baugrunderkundung liegt vor, die auszugsweise und in we-

sentlichen Teilen den Baugrund wie folgt beschreibt:

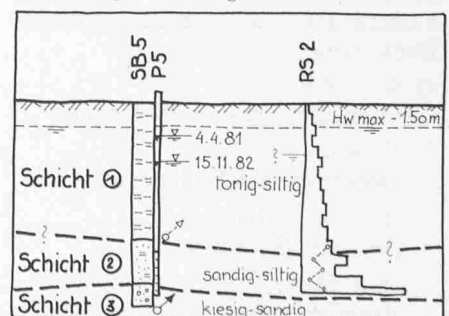
- Bis in eine Tiefe von 8-9 m besteht der Baugrund aus weichen, stark tonig-siltigen Seeablagerungen, Schicht 1. Darunter folgen eher grobkörnige sandige bis leicht siltig-sandige Seeablagerungen, Schicht 2, die in etwa 10-13 m Tiefe ab OK Terrain von kiesiger und kiesig-sandiger Flussablagerung, Schicht 3, abgelöst werden.
- In den Sondierungen wurde in den grobkörnigen Seeablagerungen artesisch gespanntes Grundwasser festgestellt. Der in der Zeit vom April 1981 bis November 1982 beobachtete piezometrische Wasserspiegel wurde zwischen 2,0 und 3,5 m Tiefe unter OK Terrain gemessen. Extreme Wasserspiegellagen konnten bis zur Zeit keine in Erfahrung gebracht werden, doch dürfte der höchste Grundwasserstand etwa 0,5 m über dem maximal gemessenen Wasserspiegel liegen.
- Für die Schicht 1 kann mit einem Raumgewicht  $\gamma_e$  von etwa 16-17 kN/m<sup>3</sup> und mit einer Durchlässigkeit von  $k = 10^{-5}-10^{-7}$  cm/s gerechnet werden.
- Für die Schicht 2 betragen die entsprechenden Werte  $\gamma_e = 19-21$  kN/m<sup>3</sup> bzw.  $k = 10^{-1}-10^{-3}$  cm/s.
- Beim Aushub der Baugrube wird speziell auf das Problem des hydraulischen Grundbruchs aufmerksam gemacht.

Die Baugrundbeschreibung ist sicher nicht vollständig, aber für die vorliegende Problemstellung durchaus ausreichend. Der Hinweis sei sicher erlaubt, dass in der Praxis nicht selten grundbautechnische Probleme selbst mit dürftigeren Baugrundbeschreibungen behandelt und gelöst werden müssen. Eine in allen Belangen vollkommene Beschreibung wird selten als Grundlage zur Verfügung stehen.

**Der konventionelle Lösungsweg**

Basierend auf der Baugrundbeschreibung wird ein Baugrundmodell (Bild 1) erstellt. Dieses Modell dient als Grundlage für den Nachweis der hydraulischen Grundbruchsicherheit, wie ihn

Bild 1. Allgemeines Baugrundmodell





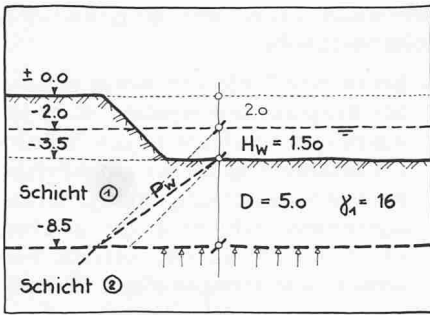


Bild 2. Bemessungsmodell hydraulischer Grundbruch

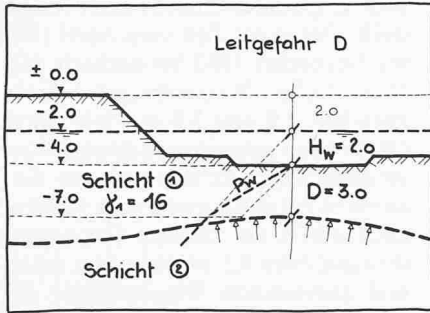


Bild 3. Gefährdungsmodell Schichtstärke D. Allgemein

die klassische Lehre kennt. Ausgehend vom Baugrundmodell wird das Bemessungsmodell (Bild 2) gebildet.

Die massgebenden Variablen, die das Problem des hydraulischen Grundbruches beschreiben, sind:

- $H_w$  Wasserspiegeldifferenz des gespannten Grundwassers
- $D$  Mächtigkeit der undurchlässigen Schicht unter der Aushubsohle
- $\gamma_1$  Raumgewicht Schicht 1 wassergesättigt
- $\gamma_w$  Raumgewicht Wasser ( $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ )

Ausgehend von der derzeitigen Lehre bieten sich für die Lösung des gestellten Problems grundsätzlich zwei Wege an. Die hydraulische Grundbruchsicherheit kann nach der Theorie des kritischen Auftriebs oder nach der Theorie der kritischen Sickerströmung untersucht werden.

#### Lösungsweg 1: Auftriebskriterium

Nachweis der hydraulischen Stabilität auf der Basis einer globalen Gleichgewichtsbetrachtung. Als Bruchmodell wird angenommen, dass die undurchlässige Schicht 1 unter der Wirkung des Wasserdruckes als Ganzes aufbricht (Deckelwirkung).

- (4)  $G - A = 0$   
 Grenzgleichgewichtsbedingung  
 $G = D \cdot \gamma_1$   
 Deckelgewicht, Widerstand  
 $A = (H_w + D) \gamma_w$   
 Auftrieb, Belastung  
 $A_0 = H_w \cdot \gamma_w$   
 Auftrieb Anteil Strömungsdruck

$A_1 = D \cdot \gamma_w$   
 Auftrieb Anteil hydrostatischer Druck

(5)  $\eta_1 = \frac{D\gamma_1}{(H_w + D)\gamma_w}$   
 hydraulische Grundbruchsicherheit

(6)  $\eta_1 = \frac{G}{A_0 + A_1}$   
 alternative Schreibweise für  $\eta_1$

#### Lösungsweg 2: Strömungskriterium

Nachweis der hydraulischen Stabilität auf der Basis einer Sickerströmungsbetrachtung. Als Bruchmodell wird angenommen, dass die gesamte Wasserspiegeldruckdifferenz in der undurchlässigen Schicht 1 abgebaut wird und der vorhandene Strömungsdruck  $A_0$  die Schwere des Korngerüsts  $G'$  überwindet; d. h. dass der Boden im kritischen Zustand aufzuschwimmen beginnt.

(7)  $G' - A_0 = 0$   
 Grenzgleichgewichtsbedingungen

$G = D(\gamma_1 - \gamma_w)$   
 Gewicht Korngerüst unter Auftrieb, Widerstand  
 $A_0 = H_w \cdot \gamma_w$   
 Strömungsdruck, Belastung

(8)  $\eta_2 = \frac{D(\gamma_1 - \gamma_w)}{H_w \cdot \gamma_w}$   
 hydraulische Grundbruchsicherheit

(9)  $\eta_2 = \frac{G - A_1}{A_0}$   
 alternative Schreibweise für  $\eta_2$

Die Bedingung Gleichung (7) drückt nichts anderes aus, als dass im Grenzgleichgewichtszustand die effektiven Spannungen im betrachteten Schnitt gleich Null sind, womit der Lösungsweg 2 auch als eine Betrachtung der effektiven Spannung bezeichnet werden könnte. Die vorstehende hydraulische Grundbruchbetrachtung bzw. Grundbruchsicherheit  $\eta_2$  ist identisch mit der in der Literatur üblicheren Betrachtung des Strömungsgradientenvergleichs

$\eta_2 = i_{\text{krit}} / i_{\text{vorh}}$   
 hydraulische Grundbruchsicherheit

$i_{\text{krit}} = \frac{\gamma_1 - \gamma_w}{\gamma_w}$   
 Grenzströmungsgradient

$i_{\text{vorh}} = \frac{H_w}{D}$   
 vorhandener Strömungsgradient

#### Resultatvergleich

Mit den in Bild 2 angenommenen massgebenden Bemessungswerten für die entsprechenden Basisvariablen erhält man folgende hydraulischen Grundbruchsicherheiten:

$\eta_1 = \frac{5,0 \cdot 16}{(1,5 + 5,0) \cdot 10} = 1,2$

$\eta_2 = \frac{5,0(16-10)}{1,5 \cdot 10} = 2,0$

Der erhebliche Unterschied der beiden, anerkanntermassen physikalisch wie ingenieurmässig vertretbaren Sicherheitsbeziehungen ist erstaunlich. Der Ingenieur wundert sich und fragt: Was ist richtig, wie soll er nun bemessen? Er erinnert sich an die Lehre und studiert aufmerksam die entsprechende Literatur und findet, dass je nach Baugrundverhältnisse und Baugrundkenntnis der minimale Sicherheitsfaktor für den Nachweis Auftriebsicherheit  $\eta_1 \geq 1,1-1,3$  und für den Nachweis Strömungssicherheit  $\eta_2 \geq 1,5-2,5$  betragen soll. Aber wie nun weiter?

#### ... mit Hilfe des Gefährdungsbildes

##### Ausgangslage

Für den Aushub der Baugrube wird die hydraulische Instabilität der Baugrubensohle als Gefährdungszustand betrachtet. Grundlage für die Schaffung der Gefährdungsbilder bilden im wesentlichen die Bauabsicht, die Baugrundbeschreibung und die Baugrund- und Bauwerkbeurteilung. Dabei erkennt man, dass der Wasserstand  $H_w$ , die Schichtstärke  $D$  und das Materialgewicht  $\gamma_1$  eine Gefahr für die Instabilität der Baugrube darstellen. Jede dieser Variablen ist deshalb als Leitgefahr eines Gefährdungsbildes zu betrachten.

Für die betrachteten Gefährdungsbilder sind, wie z. B. Bild 3 zeigt, Gefährdungsmodelle zu bestimmen. Entsprechend den Ausführungen im Kapitel «Gefährdungsbild» sind für die Basisvariablen Bemessungswerte festzusetzen - für die Variablen der Leitgefahr in extremer Wirkung, für die Variablen der Begleitumstände mit den der Leitgefahr zugeordneten jedoch vorsichtig beurteilten Erwartungswerten.

##### Bemessungswerte

Bei der Festsetzung der Bemessungswerte für die massgebenden Basisvariablen gelangt man in ingenieurmässiger Beurteilung aller Unterlagen und Informationen zu folgender Erkenntnis:

**Wasserstand.** Der höchste Wasserstand wird mit etwa 1,5 m, die gemessen mit 2-3 m, ab OK Terrain angegeben. Noch höhere Stände sind offenbar nicht ganz auszuschliessen. Der Extremwert wird deshalb mit -1,0, der Erwartungswert mit -2,0 m ab OK Terrain angenommen.

**Aushub.** Der Aushub ist auf -3,5 m ab OK Terrain geplant. Im Extremfall und lokal begrenzt könnte aus Versehen der

Aushub aber auch tiefer erfolgen. Als Extremwert wird deshalb der Aushub mit  $-4,0$  m, als Erwartungswert  $-3,7$  m angenommen. Baugrubenvertiefungen für Lift- und Sickergraben und dergleichen sind nicht vorgesehen und deshalb auszuschliessen.

**Schichtung.** Die Untergrenze der undurchlässigen Schicht wird mit 8–9 m ab OK Terrain angegeben. In Beurteilung der Baugrunduntersuchung und der geologischen Verhältnisse wird als Extremwert die Tiefe mit  $-7,0$  m, als Erwartungswert mit  $-8,0$  m angenommen.

**Raumgewicht.** Nach geologischem Gutachten wird das wassergesättigte Raumgewicht der undurchlässigen Schicht 1 mit etwa  $16\text{--}17$  kN/m<sup>3</sup> angegeben. In Beurteilung der Verhältnisse wird als Extremwert  $\gamma_1 = 15$  kN/m<sup>3</sup>, als Erwartungswert  $16$  kN/m<sup>3</sup> angenommen.

**Modellungenauigkeit.** Ungenauigkeiten in der Modellbildung und dem Ersatz von Basiswerten durch Bemessungswerte ist mit der Festsetzung des Bemessungswertes der Leitvariablen Rechnung zu tragen. Wirkt die Leitvariable lastmässig, so ist der Wert um einen bestimmten Betrag zu erhöhen, wirkt sie widerstandsmässig, so ist er entsprechend zu reduzieren. Wie Tabelle 1 zeigt, wurde zur Kompensation dieser Unschärfen und Ungenauigkeiten im Falle Gefährdungsbild Grundwasser  $H_w$  um  $0,5$  m erhöht bzw. bei Gefährdungsbild Schichtstärke  $D$  um  $0,5$  m und bei Gefährdungsbild Raumgewicht  $\gamma_1$  um  $1$  kN/m<sup>3</sup> reduziert. Die angegebenen Sicherheitsvorgaben erfolgten auf Grund ingenieurmässiger Beurteilung der Verhältnisse. Statistische Überlegungen dürften im vorliegenden Fall auch zu keiner besseren Annahme führen.

#### Sicherheitsnachweis

Der Nachweis der hydraulischen Grundbruchsicherheit erfolgt mit den gleichen bereits im vorstehenden Kapitel gewählten Bemessungsmodellen und hergeleiteten Sicherheitsbedingungen, insbesondere den Gleichungen (4) und (5) bzw. (7) und (8). Entgegen der klassischen Lehre gilt im vorliegenden Fall eine genügende Stabilitätssicherheit als nachgewiesen, wenn die Sicherheitsbedingung  $\eta \geq 1$  erfüllt ist.

In Tabelle 1 ist das Ergebnis der Untersuchung für die 3 betrachteten Gefährdungsbilder unter Berücksichtigung der vorstehend angegebenen Bemessungswerte zusammengestellt. Die unterstrichenen Werte berücksichtigen die Modellungenauigkeit.

Wie das Resultat zeigt, kann für die Gefährdungsbilder Grundwasser und

Tabelle 1. Sicherheitsnachweis auf Basis Gefährdungsbilder

Gefährdungsbild	Basisvariablen	Basisvariablen			Sicherheitsbedingung	
		$H_w$	$D$	$\gamma_1$	$\eta_1$	$\eta_2$
Grundwasser $H_w$		<u>2,7 + 0,5</u>	4,3	16	0,92	0,80
Schichtstärke $D$		2,0	<u>3,0 - 0,5</u>	16	0,80	0,75
Raumgewicht $\gamma_1$		1,7	4,3	<u>15 - 1</u>	1,00	1,01

Schichtstärke kein sicherer Zustand nachgewiesen werden. Das letzte bedeutet jedoch noch nicht zwingend, wie nächstes Kapitel ausführt, dass das Problem nur mit konstruktiven Massnahmen zu lösen wäre. Interessant und beruhigend ist aber die Feststellung, dass im Grenzzustand beide Sicherheitsbedingungen (5) und (8)  $\eta = 1,0$  ergeben.

### Ingenieurmässige Entscheidungsfindung

#### Grundsatz

Im Grundbau sollten Entscheidungen immer unter Berücksichtigung aller Einflüsse und insbesondere in ingenieurmässiger Beurteilung der in Tabelle 2 aufgeführten Entscheidungskriterien gefällt werden.

Anerkennt man diesen Grundsatz, so ist unschwer einzusehen, dass Sicherheit im Grundbau sinnvollerweise nicht einfach  $\eta \geq 1,5$  und auch nicht  $W \leq 10^{-5}$  bedeuten kann. Im einen Fall kann es aus wirtschaftlichen Erwägungen durchaus zweckmässig sein, gewisse Risiken einzugehen, während im anderen Fall solche Risiken ebenso entschieden ausgeschlossen werden müssen. In jedem Fall die richtige Lösung zu finden, setzt einiges an kreativem und auch kritischem Denken voraus. Die Technik der Gefährdungsbilder bietet eine Möglichkeit, diesen Denkprozess hilfreich zu unterstützen.

#### Beispiel hydraulischer Grundbruch Grundsätzliche Feststellung

Die Gefährdungsbildstudie zeigt für die Gefährdungsbilder Grundwasser und Schichtstärke eine ungenügende hydraulische Grundbruchsicherheit. Diesem Zustand könnte auf einfache Weise mit einer Reduktion der Baugrubentiefe (diese Möglichkeit wird im vorliegenden Fall ausgeschlossen) oder auch mit einer zielgerichteten Grundwasserentlastung begegnet werden. In beiden Fällen könnte eine genügende Grundbruchsicherheit erreicht und auch nachgewiesen werden.

Sicherheit lässt sich aber nicht nur durch Bemessung erreichen, sondern und vielfach auch zweckmässiger mit

Tabelle 2. Ingenieurmässige Entscheidungskriterien

Baugrund und hydrologische Verhältnisse
Bauwerkkonzeption und Bauausführung
Erdbaumechanische Erfassbarkeit des Problems
Spezielle Verhältnisse nachbarschaftlicher Bauten
Gefährdung von Personen
Grösse und Bedeutung des Bauwerks
Finanzielle Auswirkungen
Öffentliche Interessen, Gesetze, Verordnungen

anderen Mitteln und Massnahmen schaffen. In Beurteilung der Entscheidungskriterien in Tabelle 2, und insbesondere in Abwägung der finanziellen Aspekte, lässt sich im vorliegenden Fall die Inkaufnahme gewisser Risiken durchaus vertreten. Dabei ist aber klar festzuhalten, auf welche Gefährdungszustände bemessen wird und welche Gefahren mit anderen Massnahmen abgedeckt bzw. welche Risiken bewusst in Kauf genommen werden. Das Spiel mit dem Akzeptieren von Risiken ist nicht in jeder Hinsicht frei, denn es gilt, dabei nachfolgende Bedingungen sehr sorgfältig zu beachten:

- Akzeptierte Risiken dürfen sich nur auf Sachschäden und niemals auf Personenschäden beziehen.
- Risiken sind auf der Baustelle stets durch geeignete Kontrollen zu überwachen.
- Für den Risikofall sind entsprechende Vorsorgemassnahmen zur Reduktion des Sachschadens vorzusehen.
- Akzeptierte Risiken sollten mit dem Risikoträger vereinbart werden.

#### Gefährdungsbild Bemessung

In ingenieurmässiger Beurteilung aller Faktoren (Tabelle 2) lässt sich der Entscheidungskriterien durchaus rechtfertigen, dass aus dem gesamten Gefahrenkatalog nur gerade folgende Gefahren durch Bemessung abgedeckt werden sollen:

- Baugrundmodell entsprechend dem allgemeinen Gefährdungsbild, jedoch minimale Tiefe Schicht 1  $-7,5$  m ab OK Terrain (zusätzliche Baugrunduntersuchungen eventuell erforderlich).
- Maximaler piezometrischer Wasserstand  $-2,0$  m ab OK Terrain (bei höherem Stand wird das Grundwasser mittels Brunnen entspannt bzw. als akzeptiertes Risiko in Kauf genommen).

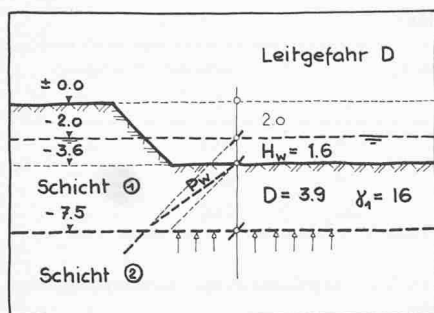


Bild 4. Gefährdungsmodell Schichtstärke D. Bemessung

- Maximale Aushubkote  $-3,50$  m ab OK Terrain mit Toleranzmass von  $-0,10$  m (grössere Aushubtiefen sind durch Kontrollen auszuschliessen).

Unter den angegebenen Restriktionen kann nun für die verschiedenen Gefährdungsbilder, wie leicht zu zeigen ist, eine genügende hydraulische Grundbruchsicherheit nachgewiesen werden.

- Gefährdungsbild Grundwasser  $H_w$   $\eta_1 = 1,1$
- Gefährdungsbild Schichtstärke  $D$   $\eta_1 = 1,0$
- Gefährdungsbild Raumgewicht  $\gamma_1$   $\eta_1 = 1,0$

Mit  $\eta \geq 1,0$  gilt das Sicherheitsziel Bemessung als erfüllt.

#### Bauwerkkontrollen

Werden, wie vorstehend entschieden, gewisse Risiken eingegangen, so sind diese in jedem Fall mit geeigneten Bauwerkkontrollen zu überwachen. In der gewählten Fallstudie könnte beispielsweise entschieden werden:

- den Wasserdruck periodisch durch geeignete Wasserstands- und Wasserdruckmessungen zu überwachen,
- während dem Aushub die Aushubarbeiten zu überwachen und die Aushubkote strikte zu kontrollieren,
- zur genaueren Abklärung der Mächtigkeit der undurchlässigen Schicht noch eine Reihe von Sondierungen ausführen zu lassen.

Unter Umständen könnten noch weitere Kontrollen, wie z. B. visuelle Geländeüberwachung, Kontrollpunktvermessungen oder spezielle Hebungsmessungen, veranlasst werden. Der Umfang der Überwachungsmassnahmen hängt von den Entscheidungskriterien (Tabelle 2) ab.

#### Vorsorgemassnahmen

Zur Vermeidung von Personenschäden und zur Beschränkung des Sachschadenrisikos sind im Falle akzeptierter Risiken entsprechende Massnahmen für den Risikofall vorzubereiten. Das Ausmass der Vorsorgemassnahmen hängt sehr stark vom eingegangenen

Risiko und von der Möglichkeit, schadenverhütend oder schadenmindernd eingreifen zu können, ab. Als spezielle Vorsorgemassnahmen könnten in Betracht gezogen werden:

- Den Aushub in einzelnen Etappen ausführen zu lassen, um im Risikofall eine allfällige Gewichtskompensation auf beschränktem Raum ausführen zu können;
- bereits vorsorglich eine Reihe Filterbrunnen zu erstellen, um bei Überschreitung des kritischen Grundwasserstandes (Kote  $-2,0$  m ab OK Terrain) eine teilweise Entspannung des Grundwassers vornehmen zu können;
- kann auch mit Hilfe der Filterbrunnen keine genügende Grundwasserentlastung (Kote  $-1,7$  m ab OK Terrain) erreicht werden, so ist die Baustelle zu räumen und die Baugrube zu fluten (akzeptiertes Risiko).

#### Ordnungsmittel

Die Grundlagen der Bemessung und die getroffenen Massnahmen sind im Sicherheitsplan, die zur Bauüberwachung angeordneten Kontrollen im Kontrollplan festzuhalten. Zudem ist der Risikoträger, im allgemeinen der Bauherr, über die eingegangenen Risiken zu informieren. Ohne Vereinbarung zwischen Risikoträger und Beauftragtem sollten keine akzeptierten Risiken eingegangen werden.

### Der Versuch einer Kritik

Gesamthaft betrachtet zählt der Ingenieurgrundbau mit Geotechnik und Bodenmechanik zu den jüngeren Wissenschaften. Dies ist kein Zufall, denn der materialtechnischen Erfassung des Baugrundes waren lange Zeiten enge Grenzen gesetzt. Heute aber, wo auf allen Teilgebieten intensiv geforscht wird, hat sich der Stand der Kenntnis wesentlich erweitert. Gleichwohl kann aber nicht übersehen werden, dass auf dem mathematisch-theoretischen im Vergleich zum materialtechnisch-verhaltenstechnischen Gebiet deutlich grössere Fortschritte erzielt wurden.

Der skizzierte Erkenntnisprozess führte auch dazu, dass sich bezüglich dem Nachweis von Sicherheit im Grundbau recht unterschiedliche Auffassungen entwickelt haben. Die einen verfechten mit Überzeugung das *Globalfaktorenkonzept*, andere wiederum sind überzeugte Anhänger des *Partialfaktorenkonzeptes* und einzelne glauben gar, Sicherheit nur auf *probabilistischen Grundlagen* nachweisen zu können. Diese divergierenden Auffassungen

sind mitunter eine Ursache für das einleitend festgestellte disharmonische Zeitbild.

#### Die Traditionalisten

Für die Traditionalisten unter den Grundbauern bedeutet Sicherheit  $G(y_1 \dots y_n) \geq \eta_0$ , wobei das globale Sicherheitsmass  $\eta_0$  vornehmlich auf Grund langjähriger empirischer Erfahrung und in Anpassung von Baugrund und Problemstellung festgelegt wird. Der Lösungsweg ist einfach und dem Ingenieur bestens vertraut. Die Traditionalisten haben, als unbestreitbaren Vorteil, die *praktische Erfahrung auf ihrer Seite*. Die Frage sei jedoch berechtigt, ist mit dieser Methode in Anpassung an die Entwicklung auch ein Fortschritt zu erzielen? Hat der Ingenieur in jedem Fall auch eine Ahnung, welche Unsicherheiten mit einem globalen Sicherheitsfaktor  $\eta_0$  abgedeckt sind?

#### Die Reformisten

Die Reformisten unter den Grundbauern versuchen, das Sicherheitsproblem zu sezieren, indem sie den einzelnen Einflussgrössen ein bestimmtes partielles Sicherheitsmass zuordnen. Für sie schreibt sich Sicherheit  $G(\gamma_1^* \dots \gamma_n^*) \geq \eta_r$ , wobei  $\gamma^*$  Bemessungswerte und  $\eta_r$  das partielle Sicherheitsmass für die Modellunsicherheit bedeuten. Ihr primäres Ziel ist die Unsicherheit quellenbezogen zu berücksichtigen. Die Schwierigkeit liegt hauptsächlich darin, das richtige Mass für die einzelnen Partialfaktoren zu finden und die weitverbreitete Skepsis der Ingenieure in der Praxis zu überwinden.

#### Die Progressiven

Die Progressiven unter den Grundbauern versuchen über den probabilistischen Weg eine exaktere Lösung zu finden. Für sie bedeutet grundsätzlich Sicherheit  $W(\gamma_1 \dots \gamma_n) \leq \mu_0$ . Auf Grund *wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen* soll eine akzeptierbare kleine Versagenswahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Die Zielsetzung allein wäre sicher ideal. Doch genügen im Grundbau die Grundlagen für eine probabilistische Betrachtungsweise? Da als Sicherheitsziel eine sehr kleine Versagenswahrscheinlichkeit  $\mu$  gefordert wird, sind für die Behandlung des Problems auch nur Werte mit kleiner Eintretenswahrscheinlichkeit von Bedeutung. Sind aber gerade für diesen Grenzbereich die statistischen Unterlagen, soweit überhaupt vorhanden, aussagekräftig und stimmen auch die angenommenen Verteilungsgesetze?

#### Der neue Weg oder die Pragmatiker

Der neue Weg hat viel Gemeinsames mit dem Weg der Reformisten. Anstelle



eines deterministischen Sicherheitsmasses  $\eta_0$  bzw.  $\mu_0$  tritt das den Gefährdungszustand beschreibende Gefährdungsbild. Der Ingenieur wird gezwungen, sich den Grenz Zustand der Tragfähigkeit durch eine *wirklichkeitsnahe Extremal Betrachtung bildlich vorzustellen*: Der Sicherheitsnachweis erfolgt am abgeleiteten Gefährdungsmodell, wobei die Festsetzung der Bemessungswerte sowohl auf Grund empirischer Erfahrung als auch Wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen erfolgen kann.

Der Vorteil der Methode der Gefährdungsbilder ist hauptsächlich darin zu sehen, dass sie den Ingenieur anregt, alle Gefahren zu erfassen und die kritischen Gefährdungszustände selbst bauwerkspezifisch zu beurteilen. Die Arbeit wird dadurch dem Ingenieur nicht leichter gemacht. Im Gegenteil. Der beschriebene Weg setzt ein höheres Mass an Denkarbeit und grundbautechni-

scher Erfahrung voraus. Aber verdient der Grundbau nicht einen vermehrten Aufwand an kritischem Denken?

### Eine Schlussfolgerung

Die ganze Schwierigkeit um die ingenieurmässige Behandlung grundbaulicher Probleme kann mit nachstehenden Merksätzen bewusst gemacht werden:

- Massgebend für die Behandlung grundbaulicher Probleme ist nicht in erster Linie die Wahl der Berechnungsmethode, noch die Wahl der Sicherheitsdefinition, sondern das richtige Erfassen des Baugrundverhaltens.
- Bei grundbaulichen Arbeiten entstehen immer dann Schwierigkeiten, wenn irgendwelche bedeutsamen Einflüsse übersehen oder nicht richtig erfasst werden.

- Im Grundbau ist immer mit Überraschungen zu rechnen. Alle Risiken bereits im voraus bemessungsmässig abdecken zu wollen, wäre im allgemeinen wirtschaftlich nicht zu vertreten.
- Bei der Lösung grundbaulicher Probleme ist der Weg der beste, auf dem die naturgemäss versteckten Gefahren und Risiken rechtzeitig erkannt werden können.

Sicherheit im Grundbau schaffen bedeutet nicht einfach  $\eta \geq 1,5$  oder  $\mu \leq 10^{-5}$  nachweisen, sondern: den Baugrund erfassen, Informationen beurteilen, Risiken abwägen, Entscheidungen treffen, Bauausführung beobachten, Verhalten kontrollieren, Erkanntes analysieren und Schlussfolgerungen ziehen.

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. U. Vollenweider, Büro Dr. U. Vollenweider, Beratende Ingenieure ETH/SIA, Hegarstr. 22, 8032 Zürich.

## Traglastberechnung gekrümmter Stahlbeton- und Spannbetonträger aufgrund der Plastizitätstheorie

Von René Walther, Lausanne, und Bernard Houriet, Tramelan

International gesehen setzt sich immer mehr das Prinzip durch, Tragwerke für die beiden Grenzzustände der Gebrauchsfähigkeit und der Tragfähigkeit zu bemessen. Dies wird auch bei der neuen SIA-Norm 162 der Fall sein.

Die Grundlagen dazu wurden bereits in der von B. Thürlimann massgeblich beeinflussten Richtlinie 34 zur Norm SIA 162 gelegt, die erstmals die Plastizitätstheorie für den Tragfähigkeitsnachweis von Stahlbeton- und Spannbeton-Tragwerken offiziell zulässig. Allerdings bleibt man noch vielerorts auf halbem Wege stehen, indem zwar wohl die einzelnen Querschnitte plastisch, d. h. aufgrund ihres Bruchwiderstandes bemessen werden, die Schnittkraftverteilung jedoch den mit Hilfe der Elastizitätstheorie bestimmten Grenzwertlinien entnommen wird. Der Grund für die Wahl dieser hybriden Methode liegt darin, dass der Plastizitätstheorie noch vielfach mit einiger Skepsis begegnet wird und diese noch nicht für alle Beanspruchungsarten und Tragsysteme erarbeitet worden ist. So wird die genannte hybride Methode nach wie vor bei der Schubbemessung angewendet, was allerdings keine grossen Konsequenzen hat, denn da sich die Querkraft als erste Ableitung aus den Biegemomenten ergibt  $Q = (dM/dx)$ , schlägt eine plastische Umlagerung der letzten nur wenig auf die Querkraftverteilung durch.

Bei gekrümmten Trägern hingegen besteht eine derart ausgeprägte Interaktion zwischen Querkraft, Biege- und Torsionsmomenten, dass diese bei Traglastbetrachtungen unbedingt berücksichtigt werden muss, was aber bisher wegen noch unvollständiger plastizitätstheoretischer Grundlagen kaum möglich war. Aus diesem Grunde wurde an der ETH Lausanne ein Forschungsprojekt über die Plastizitätstheorie gekrümmter Stahlbeton- und Spannbetonträger durchgeführt, über deren Ergebnisse hier kurz berichtet wird.

### Modellbildung

Die ersten theoretischen und experimentellen Untersuchungen über das plastische Verhalten von gekrümmten Trägern wurden für prismatische Stäbe

mit konstanten Querschnitten aus Stahl durchgeführt [2, 3]. Dies ist wohl der Grund, weshalb man auch bei entsprechenden Arbeiten über Stahlbeton zunächst nur von prismatischen Querschnitten mit konstantem Widerstand und zentralsymmetrischer Beweh-

Bezeichnungen	
$n_{rp}$	Anzahl der Fließgelenke
$n_h$	Grad der statischen Unbestimmtheit
$a$	vertikale Verschiebung
$\omega_m$	aufsummierte Biegerotation
$\omega_t$	aufsummierte Torsionsrotation
$W_{i,m}$	innere Biegearbeit
$W_{i,t}$	innere Torsionsarbeit
$M_o, T_o, V_o$	plastische Bezugsschnittkräfte
$M_*, T_*, V_*$	plastische Bezugsschnittkräfte im fiktiven Bezugsquerschnitt
$m = M/M_o, m_* = M/M_*$	dimensionslose Schnittkräfte
$t = T/T_o, t_* = T/T_*$	
$v = V/V_o, v_* = V/V_*$	
$B_f = A_t \cdot \sigma_f$	plastische Bügelkraft
$u = 2(b + h)$	Querschnittsumfang
$\kappa = \text{Max. } (A_s/A_t, A_t/A_s)$	max. Verhältnis der Längsarmierungsflächen

rungsanordnung über die ganze Stablänge ausging [4, 5], obwohl dies hier nur von geringem Interesse ist, da man im Stahlbeton bestrebt ist, die Bewehrung dem Beanspruchungsverlauf anzupassen. Im übrigen wurden auch nur einfeldrige Träger unter Einzellasten behandelt.

Daher bestand ein Hauptziel der durchgeführten Untersuchung [1] darin, ein Rechenmodell zu entwickeln, das den folgenden spezifischen Gegebenheiten des Stahlbetons und des Spannbetons gerecht wird:

- Variable Querschnittswiderstände