

**Zeitschrift:** Tec21  
**Herausgeber:** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
**Band:** 135 (2009)  
**Heft:** 19: Robustheit

**Artikel:** Tragfunktion sichern  
**Autor:** Vogel, Thomas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-108260>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 04.02.2026

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

# TRAGFUNKTION SICHERN

Robuste Tragwerke schränken allfälliges Versagen ein, der gefährliche Dominoeffekt wird verhindert. Ingenieure planen darum Konstruktionen, die bei Ausfall eines Tragelementes beispielsweise eine Lastumlagerung über das Resttragwerk zulassen.

## Titelbild

World Trade Center New York City,  
Schadenbild der Nordfassade des Nordturms  
(Bild: NIST <http://wtc.nist.gov/>)

Robust wird umgangssprachlich diffus verwendet – nämlich als Synonym für stark, kräftig und widerstandsfähig. Die Tragwerksplaner hingegen setzen den Begriff Robustheit präzisiert ein. Er wird in der Norm SIA 260 «Grundlagen der Projektierung von Tragwerken»<sup>1</sup> wie folgt definiert: «Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, Schädigungen oder ein Versagen auf Ausmasse zu begrenzen, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Ursache stehen». Weiter hält die Norm als Anforderung fest, dass ein Tragwerk «bei angemessener Einpassung, Gestaltung und Zuverlässigkeit wirtschaftlich, robust und dauerhaft» sein soll.<sup>2</sup>

## EINGRENZUNG DES BEGRIFFS

Robustheit steht in den Normen somit auf gleicher Hierarchiestufe wie die Wirtschaftlichkeit und die Dauerhaftigkeit. Zudem werden in diesem Zusammenhang Begriffe wie Redundanz, Verletzbarkeit und progressiver Kollaps – umgangssprachlich der Dominoeffekt – verwendet. Müllers<sup>3</sup> gebraucht diese drei Begriffe in seiner Dissertation, um Robustheit zu definieren und abzugrenzen (Abb. 1), wobei er die Definition von Robustheit aus der Norm SIA 260 übernimmt. Als differenzierendes Kriterium fand er den Grad des Versagens. Redundanz ist bei Tragwerken kaum jemals gegeben, da jedes Versagen zumindest die Gebrauchstauglichkeit einschränkt und jede Lastumlagerung auf ein Reservesystem mit Deformationen gekoppelt ist. Der progressive Kollaps ist ein denkbarer Versagensmechanismus für ein Tragwerk, der jedoch nicht impliziert, dass die Ursache im Vergleich zur Auswirkung klein ist, sondern lediglich umschreibt, dass sich der versagende Bereich ausbreitet. Verletzbarkeit umschreibt am ehesten den Gegensatz von Robustheit, ist aber als negativ wertender Begriff schlecht als Anforderung an ein Tragwerk geeignet.

Faber und Schubert<sup>4</sup> benützen den Begriff der Verletzbarkeit, um den Zusammenhang zwischen der Gefährdung und den direkten Konsequenzen zu beschreiben, und den Begriff der Robustheit, um den Anteil indirekter – das heisst ausserhalb der Systemgrenzen liegender – Konsequenzen darzulegen (Abb. 2). Wird nun als System ein Tragelement definiert, entspricht diese Betrachtungsweise der Definition der Norm SIA 260.

Die Verletzbarkeit soll nicht vertieft werden, da – wie die Vergangenheit zeigt – die auslösende Gefährdung häufig nicht in Betracht gezogen werden kann, weil sie zum Zeitpunkt der Planung nicht vorstellbar ist. Fokussiert sich der Planer ausserdem darauf, die Verletzbarkeit zu reduzieren – auch für Gefährdungen, die noch nicht bekannt sind –, führt dies zu überaus klobigen Tragwerken. Die Stärke des Konzepts der Robustheit besteht gerade darin, dass es eben keine Rolle spielt, weshalb ein Bauteil versagt – entsprechend konzipiert, können auch äusserst schlanke Tragwerke robust sein.

## FALLWEISE SPEZIFIZIEREN

Konkrete Ereignisse haben die Entwicklung im Bereich der Robustheit vorangetrieben (siehe Kasten S. 17). Spezifische Massnahmen wurden getroffen und in die Planung von neuen Projekten mit einbezogen. Um bereits in der Planungsphase standardisierte Vergleichswerte als Grundlage für einen Tragwerksentwurf beiziehen zu können, stellt sich die Frage, ob und wie Robustheit quantifiziert werden kann. Obwohl es plausible Ansätze gibt, ist es nicht sinnvoll, eine Quantifizierung zu definieren und allenfalls ein bestimmtes Mass zu fordern, bevor die Robustheit des Tragwerks nicht unter allen möglichen, auch qualitativen, Aspekten

01 Abgrenzung der Fachbegriffe nach Müllers  
(Grafik: Müllers<sup>3</sup>)

02 Abgrenzung der Fachbegriffe nach Faber und Schubert (Grafik: Faber und Schubert)

## GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG

### Ronan Point, London, 1968

Am frühen Morgen des 16. Mai 1968 ereignete sich in einer Küche im 18. Stock eines Wohnhauses in Ronan Point, Newham, einem östlichen Vorort von London, eine Gasexplosion. Sie riss die Eckstütze weg, wodurch die gesamte Gebäudeecke über 23 Stockwerke einstürzte. Fünf Personen starben, und 17 wurden verletzt. In der Folge wurden die britischen Baunormen mit Vorschriften zur Robustheit ergänzt. Die Hauptmassnahme waren Vorschriften für Zuelemente entlang den Fassaden und in den Stützenachsen: Beim Ausfall einer Stütze konnten Hängewerke entstehen. Diese Massnahme ist vor allem notwendig bei Stahl-, Stahlverbund- und vorfabrizierten Betonbauten; bei Ortbetonbauten hingegen ist durch die durchlaufende Bewehrung in der Regel ohnehin Kontinuität und Zugkapazität vorhanden.

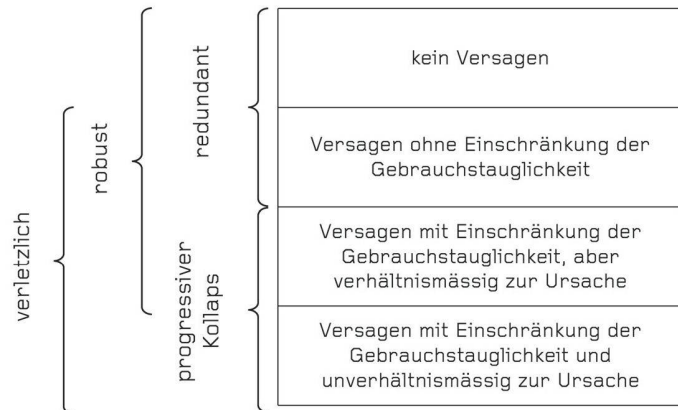
### Alfred P. Murrah Federal Building, Oklahoma City, 1995

Am 19. April 1995 detonierte ein Lieferwagen vor der Nordfassade des Alfred-P.-Murrah-Bürogebäudes in Oklahoma City (USA). Die explosive Ladung zerstörte eine Stütze unter einem Abfangträger. Die benachbarten zwei Stützen hielten der kombinierten Beanspruchung nicht stand. Daraufhin stürzte fast die ganze Nordfassade ein. Der Anschlag forderte 168 Tote und über 800 Verletzte. Die amerikanischen Behörden realisierten, wie verletzlich ihre Infrastruktur diesbezüglich ist – die meisten Gebäude wiesen unkontrollierte Zufahrten für Motorfahrzeuge auf. Als bauliche Massnahme wurde empfohlen, künftig biegesteife, duktile Rahmen, wie sie beim erdbebengerechten Bauen üblich sind, zu konstruieren und diese so auszubilden, dass der Ausfall einer Stütze überbrückt werden kann.

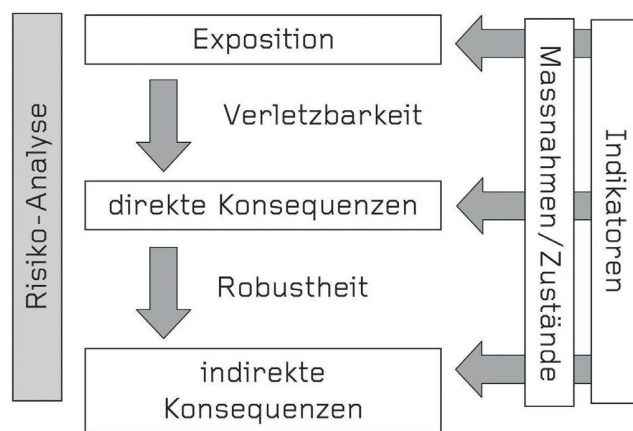
### World Trade Center, New York City, 2001

Der Einsturz der Twin Towers vom 11. September 2001 infolge zweier Flugzeuganprall-Ereignisse kann unter dem Aspekt der Robustheit beurteilt werden. Nicht die Zerstörung des Tragwerks war die Ursache für den Einsturz, denn obwohl viele Stützen der tragenden Fassaden durch den Anprall ausfielen (Titelbild), blieb die globale Tragwirkung erhalten. Der andauernde Brand, der durch das Kerosin der vollgetankten Flugzeuge ständig Nahrung erhielt, führte zum Einsturz. Die Twin Towers waren auf eine Kollision mit einer etwa 10% leichteren Boeing 707 im Landeanflug auf den nächstgelegenen Flughafen, d.h. mit nur teilweise gefüllten Treibstofftanks, bemessen. Seit den Ereignissen vom 11. September wird die Robustheit nicht nur von Tragwerken, sondern auch von übergeordneten Systemen weltweit wieder vertieft erforscht.<sup>5</sup>

01



02



ausgeleuchtet wird. Es geht vor allem auch darum, «das Udenkbare zu denken», da die üblichen Gefährdungsbilder durch eine konventionelle Bemessung bereits abgedeckt sind. Bereits einfache Beispiele (siehe S. 18) zeigen jedoch, dass die Robustheit einer Konstruktion nicht einfach oder eindeutig zu erreichen ist – voreilige Schlüsse können falsch sein. Das Problem liegt darin, dass nie alle möglichen Einflüsse bekannt sind und eine Disposition im einen Fall nützen, im anderen aber schaden kann.

## MASSNAHMEN ZUR ERZIELUNG VON ROBUSTHEIT

Um Tragwerksversagen einzuschränken, werden verschiedene Massnahmen eingesetzt. Einzelne davon sind kombinierbar oder gehen nahtlos ineinander über, andere schliessen sich gegenseitig aus (siehe auch Kasten S. 20).

Die Robustheit von Tragwerken kann beispielsweise gesteigert werden, indem Baustoffe verwendet werden, die eine entsprechende Festigkeit aufweisen; ohne es detailliert zu spezifizieren, wird die Tragkonstruktion auf (zu) hohe Einwirkungen dimensioniert, womit ihre Traglast erhöht wird. So wurden zum Beispiel die Tragseile grosser Hängebrücken in den USA mehrheitlich mit grossen Reserven bemessen, die nachträglich für zusätzliche Eigen- und Verkehrslasten mobilisiert werden konnten.

Duktilen Verhalten eines Tragwerks trägt ebenfalls zur Steigerung der Robustheit bei. Überbeanspruchte Bereiche von Baustoffen, die wie Stahl nach der elastischen Phase ein Fließverhalten aufweisen, entziehen sich einer Übernahme von weiteren Lasten. Dies ist vor allem dann wirksam, wenn die Last nach einem kurzfristigen Maximum wieder abnimmt oder wenn die Beanspruchung aus einer aufgezwungenen Verformung besteht. Ein ähnliches Verhalten können auch an sich spröde Materialien zeigen. Die Festigkeit darf in einem solchen Fall nach dem Überschreiten der Bruchlast nicht auf null absinken, sondern es muss eine Restfestigkeit vorhanden bleiben – ein Beispiel dafür ist Beton, der durch Umschnürung dreiaxsig druckbeansprucht werden kann.



## ROBUSTHEIT AUFGEZEIGT AN EINEM EINFACHEN BEISPIEL

An einem Beispiel soll verfolgt werden, welche Folgen der Ausfall eines Tragelements auf das Bauteil oder sogar das ganze Tragwerk hat. Es kommt aus dem Stahlbau – ähnliche Beispiele liessen sich auch für andere Bauweisen darstellen.

Für eine Schraubenverbindung zweier Zugglieder soll die robustere der beiden alternativen Ausführungen A oder B bestimmt werden. Der Einfachheit halber wird als Versagen der Verbindung lediglich das Abscheren des Schraubenschafts betrachtet.

### Ein- oder zweischraubige Verbindung

Vergleicht man eine einschraubige Verbindung mit einer zweischraubigen, ist, wenn als Ursache das Versagen einer Schraube betrachtet wird, diejenige mit zwei Schrauben (Abb. 4 B) robuster als diejenige mit einer Schraube mit doppeltem Tragwiderstand (Abb. 4 A). Jedoch nur, wenn eine Schraube die auftretende Kraft allein aufnehmen kann, die Gesamtsicherheit also anfangs grösser als 2.0 war.

Wo mehrere Schrauben vorgesehen sind, können allerdings auch solche bei der Montage vergessen werden. Damit würde im Tragwerk ein Mangel eingebaut, der allenfalls erst bemerkt wird, wenn das Zugglied beansprucht wird. Eine intensive Baukontrolle ist somit Voraussetzung dafür, dass die Robustheit zum Tragen kommt.

Ausserdem müssen konstruktive Aspekte berücksichtigt werden: Um eine gleichmässige Beanspruchung beider Schrauben zu gewährleisten, muss der Lochabstand in beiden Blechen derselbe sein. Ansonsten wäre eine Plastifizierung der einen Schraube Voraussetzung dafür, dass auch die zweite trägt. Im Extremfall werden die Schrauben bereits bei der Montage plastifiziert, wenn sie nur mit Zwang eingeführt werden können. Die bisherigen Überlegungen basieren darauf, dass das Plastifizierungsvermögen der erstbeanspruchten Schraube nicht erschöpft ist, bevor die zweite ins Fließen kommt.

Mit zwei Schrauben wird der Anschluss grundsätzlich robuster und sicherer, da die Summe der Scherwiderstände eine kleinere Streuung aufweist: Der Scherwiderstand ist keine deterministische Grösse, sondern streut mit einer Standardabweichung  $\sigma_R$  um einen Mittelwert  $\mu_R$ . Der Anschluss 4A weist darum den Widerstand  $R = R(\mu_R^A, \sigma_R^A)$  und der Anschluss 4B den Widerstand  $R = R(\mu_R^B, \sigma_R^B) = (\mu_R^A, \sqrt{0.5} \sigma_R^A)$  auf.

### Zweischraubige Verbindungen –

#### Anordnung längs oder quer zur Wirkungslinie

Mit der Schraubenanordnung nebeneinander statt in Krafrichtung hintereinander kann die zwingende Genauigkeit des Lochabstandes entschärft werden. Mit einem Langloch wird eine zusätzliche Toleranz für den Lochabstand geschaffen (Abb. 5 A).

Ein solcher Anschluss gewinnt aber nicht unbedingt an Robustheit: Durch den Ausfall einer Schraube entsteht eine Exzentrizität, wodurch für das Tragverhalten der Verbindung die Lagerung der Zugglieder relevant wird. Sind diese gelenkig gelagert, werden sich die beiden Laschen so verdrehen, dass alle drei Gelenke auf der Wirkungslinie der Zugkraft liegen. Damit geht eine grosse Deformation einher, sodass die Zugglieder erst wieder Kraft aufnehmen, wenn die Gelenke ausgerichtet sind. Sind die Verdrehungen der Stabenden behindert, entsteht zwar eine Biegebeanspruchung, aber diese setzt der Verschiebung einen Widerstand entgegen, was für die Funktion des Zuggliedes im Gesamtsystem wichtig sein kann. Exzentrisch angeschlossene Fachwerkstäbe verhalten sich beispielsweise bei einer zyklischen Beanspruchung besser als zentrisch angeschlossene Stäbe, da sie trotz lokaler Plastifizierung einigen Lastzyklen standhalten. Zentrisch angeschlossene Stäbe werden hingegen bei Zugbeanspruchung plastisch gedehnt und knicken nach der Lastumkehr aus, sodass ihre Wirkung verloren geht.

Variante 5A ist somit robuster als Variante 5B, da das Ausweichen der Verbindungsstellen diese entlastet – aber nur, wenn die Deformationen vor-

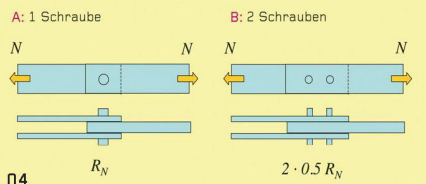
gegeben sind (verformungsgesteuertes Verhalten). Wenn die Kraft vorgegeben ist (kraftgesteuertes Verhalten, wie dies bisher stillschweigend vorausgesetzt wurde), weist die Variante 5B eine höhere Robustheit auf.

### Dreischraubige Verbindungen –

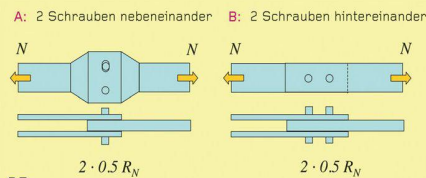
#### Anordnung längs oder quer zur Wirkungslinie

Wenn bei einer Verbindung mit drei Schrauben, die alle auf einer Risslinie quer zur Krafrichtung angeordnet sind (Abb. 6 A), die mittlere ausfällt, verteilt sich die Kraft nach wie vor symmetrisch auf die beiden verbleibenden Schrauben. Fällt eine der beiden äusseren Schrauben aus, wird die auf der Wirkungslinie der Kraft liegende mittlere alleine beansprucht. Erst bei sehr grossen Deformationen des Schraubenschafts weicht allenfalls der Anschluss seitlich aus, sodass auch die zweite verbliebene Schraube teilweise mitträgt. Um die Robustheit der Verbindung zu beurteilen, müssen also verschiedene Fälle betrachtet und unterschieden werden.

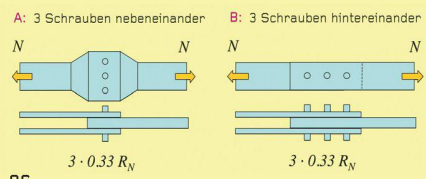
Auch für drei hintereinander angeordnete Schrauben (Abb. 6 B) ist eine gleichmässige Lastverteilung auf alle Schrauben nicht gegeben, denn ein solcher Anschluss ist statisch unbestimmt. Es kommt auf das Steifigkeitsverhältnis der Schrauben  $c_e$  und der Zuglaschen EA an, wie gleichmässig sich die Schrauben an der Lastaufnahme beteiligen. Die Diagramme in Abb. 7 zeigen, dass die Verteilung der Zugkraft umso ungleichmässiger ist, je steifer die Schrauben sind und je mehr davon hintereinander angeordnet werden. Bei vier Schrauben kann die Belastungsdifferenz bereits über 50% betragen. Die Stahlbaunorm des SIA<sup>6</sup> enthält darum für den Scherwiderstand langer Anschlüsse einen Reduktionsfaktor  $\beta_L$ . In Bezug auf die Robustheit der Verbindung sind also mehr Schrauben nur dann besser, wenn sie auch nachgiebig und dadurch gleichmässiger belastet sind.



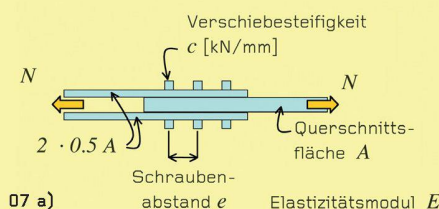
04



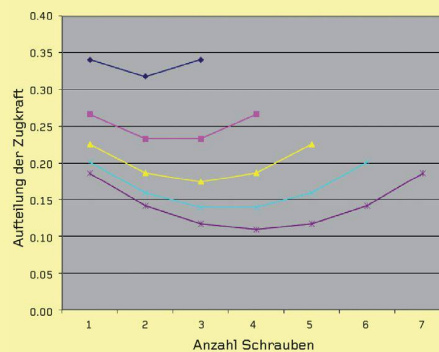
05



06

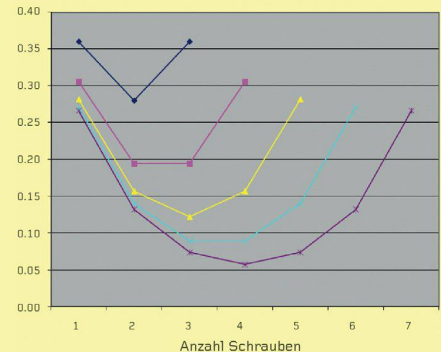


07 a)



07 b)

- 04 Schraubenanschluss mit einer bzw. zwei Schrauben;  $R_N$ : Scherwiderstand
- 05 Schraubenanschluss mit zwei Schrauben neben- bzw. hintereinander
- 06 Schraubenanschluss mit drei Schrauben neben- oder hintereinander
- 07 a) bis c): Verteilung der Zugkraft N auf mehrere Schrauben hintereinander
- a) Bezeichnungen, b) nachgiebige Schrauben  $c_e/EA=0.075$ , c) steife Schrauben  $c_e/EA=0.3$  (Grafiken: Autor)



07 c)

Mit der Kapazitätsbemessung können spröde Versagen nicht massgebend werden, weil die Bemessung der Tragelemente auf spröde Versagensmechanismen wie Querkraftversagen nicht mit den Einwirkungen erfolgt, sondern mit dem Tragwiderstand der benachbarten, sich duktil verhaltenden Elemente. Damit wird zum Beispiel bei Rahmen erreicht, dass sich die plastischen Gelenke in den Riegeln bilden, die nur lokal tragen, und nicht in den Stützen, die auch eine globale Tragfunktion zu erfüllen haben.

Mit einer Sollbruchstelle (Opfer- und Schutzelement), die wie eine Sicherung knapp über dem durch die normale Bemessung abgedeckten Lastniveau versagt, lässt sich die Versagensstelle im Voraus festlegen. Solche explizit festgelegten Stellen können abschnittsbildend wirken – allerdings nicht im Gebrauchszustand, sondern erst bei aussergewöhnlichen Einwirkungen. Durch eine Abschnittsbildung mittels Fugen wird ein allfälliges Versagen auf einen Teilbereich beschränkt. Dies wird im Erdbebeningenieurwesen angewandt, wenn sich Baukörper unterschiedlich verhalten und die Gefahr besteht, dass sie sich gegenseitig ungünstig beeinflussen.

Ein Versagen kann auch durch eine sogenannte zweite Verteidigungslinie eingegrenzt werden: Massive Bauteile schützen andere, indem sie bei ihrem Versagen Energie dissipieren, die dann für weitere Zerstörungen nicht mehr zur Verfügung steht. Für das Tragwerk relevante Stützen können beispielsweise durch Leitplanken, Leitmauern oder andere deformierbare Elemente vor Anprall geschützt werden.

Alternative Lastpfade halten die Lastabtragung über das Resttragwerk aufrecht, auch wenn in der Planung nicht genauer untersucht wird, welches Bauteil weshalb ausgefallen ist. Statisch unbestimmte Tragwerke weisen wegen ihrer Kontinuität beispielsweise mehrere Möglichkeiten auf, eine Last abzutragen. Voraussetzung dafür ist, dass sich die überbeanspruchten Bereiche duktil verhalten. Kontinuität kann allerdings dazu führen, dass sich ein Versagen ausbreitet. So genügt bei Rahmen, die an sich viele Lastpfade aufweisen, ein schräg stehendes, druckbeanspruchtes Element oder ein durchhängendes Zuelement, um grosse Horizontalkräfte zu erzeugen, die das ganze Tragwerk gefährden können.

### IM SPANNUNGSFELD DER ANFORDERUNGEN

Viele der genannten Massnahmen sind Teil der gängigen Entwurfspraxis für Tragwerke und als allgemeine Grundsätze in den Tragwerksnormen verankert.<sup>7</sup> Für Einzelfälle existieren auch konkretere Bestimmungen, um die Robustheit von Tragwerken zu steigern. So kann die Einsturzsisicherung für Platten ohne Durchstanzbewehrung<sup>8</sup> als zweite Verteidigungslinie oder als alternativer Lastpfad interpretiert werden. Beim Einsatz von Klebebewehrungen ist auch das Gefährdungsbild «Ausfall der Klebebewehrung» zu untersuchen; ein alternativer Lastpfad muss zumindest für die quasiständigen Einwirkungen ohne Lastfaktoren nachgewiesen werden.<sup>9</sup> Ausfallfähige Bauteile werden auch im Zusammenhang mit Fahrzeuganprall gefordert: bei Schienenfahrzeugen in einem Anhang zur Eisenbahnverordnung<sup>10</sup> und für Strassenfahrzeuge in einer Richtlinie des Bundesamts für Strassen (Astra)<sup>11</sup>.

Es gibt Normbestimmungen, die dazu verleiten, wenig robuste Tragwerke zu entwerfen. So ist in Biegebalken nach Norm SIA 262 immer eine Verbügelung erforderlich, in Platten hingegen nicht. Unverbügelte Platten versagen spröde, da der Beton auf Druck versagt. Sie sollten nur ausgeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass ein Biegeversagen vor einem Querkraftversagen eintritt. Ein absoluter Wert für den Querkraftwiderstand ohne Verbügelung verleitet jedoch dazu, die Plattenstärke so zu wählen, dass just keine aufwendige und kostenintensive Verbügelung erforderlich ist.

Beim Durchstanzwiderstand wirken die Bestimmungen der Norm SIA 262 ähnlich; er lässt sich steigern, indem die Biegebewehrung verstärkt wird. Dadurch wird aber das Versagen zunehmend spröder. Den durchstanzgefährdeten Bereich zu verbügeln – auch wenn dies etwas mehr Aufwand erfordert – wäre hier bezüglich Versagensart vernünftiger, da das Verhalten duktil wird. Ebenso können die an sich begrüssenswerten Bestrebungen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten, wie sie in einer kürzlich erschienenen Richtlinie von Astra und SBB<sup>12</sup> festgelegt sind, zu einer Reduktion



## MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER ROBUSTHEIT –

### ANALOGIE ZUM DOMINOEFFEKT

Die im Artikel erwähnten Massnahmen sollen auf eine Reihe von zwölf Dominosteinen – eine bekannterweise nicht sehr robuste Konstellation – angewandt werden.

**Ausgangslage:** Die Reihe ist so aufgestellt, dass ein kleiner Stoss auf den vordersten Stein alle umfallen lässt (Abb. 8 a).

**Festigkeit:** Steine mit Untergrund verkleben oder vermauern (Abb. 8 b).

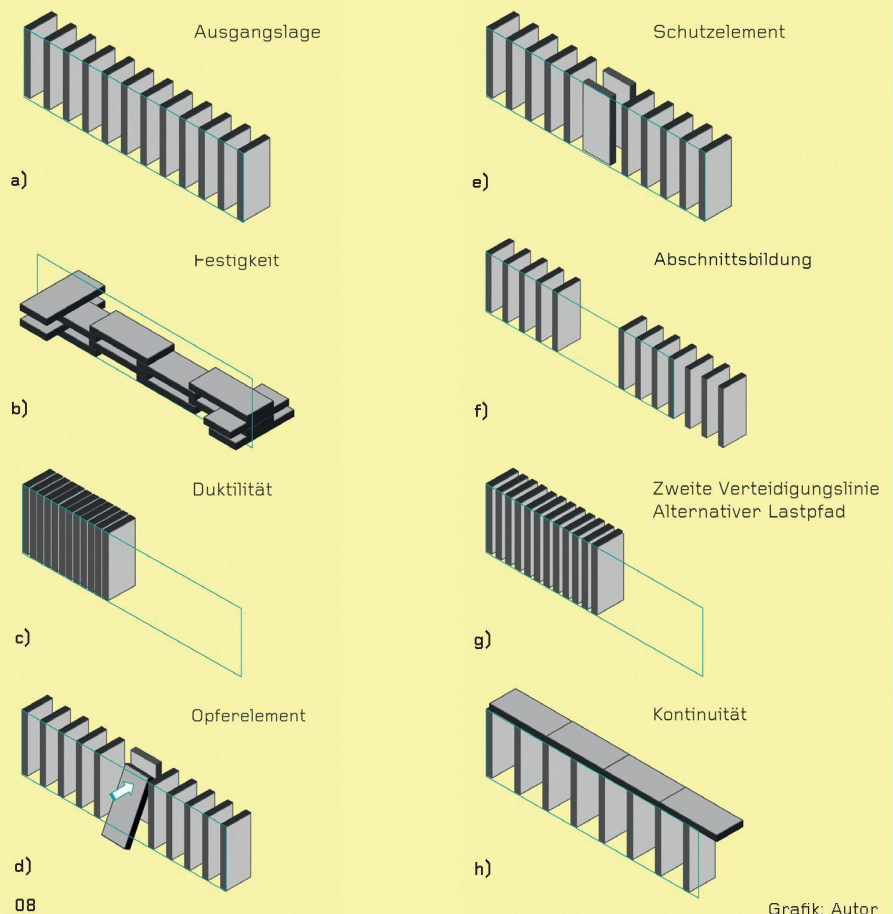
**Duktilität:** Steine berühren sich und setzen einer angreifenden Kraft durch Reibung einen nahezu konstanten Widerstand entgegen – ähnlich wie dies bei duktilen Baustoffen auf dem atomaren Niveau geschieht (Abb. 8 c).

**Opferelement:** Zwei quer stehende Steine werden rechtzeitig umgeworfen und unterbrechen damit die Reihe (Abb. 8 d). Können diese den Stoss auffangen, bilden sie ein **Schutzelement** (Abb. 8 e) – werden sie ganz weggelassen, entspricht dies einer **Abschnittsbildung** (Abb. 8 f).

**Zweite Verteidigungslinie:** Steine so nahe aneinander aufstellen, dass sie zwar umfallen können, sich aber dabei gegenseitig so behindern, dass mit einem alternativen Lastpfad wieder eine stabile Gleichgewichtslage entsteht (Abb. 8 g).

**Kontinuität:** Stehende Steine sind mit darauf liegenden verbunden. Dadurch entsteht eine Solidarisierung; ein Stoss wird jedoch wesentlich direkter weitergegeben mit allenfalls auch negativen Folgen (Abb. 8 h).

Die Gegenüberstellung der Massnahmen im selben Massstab zeigt je nach bedecktem Flächenanteil, wie unterschiedlich aufwendig sie sind.



#### Anmerkungen

- 1 Norm SIA 260: Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003, 44 pp.
- 2 Norm SIA 260, Ziffer 2.3.1
- 3 Müllers, Ingo: Zur Robustheit im Hochbau. IBK Bericht Nr. 304, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Juli 2007, 111 pp.
- 4 Faber, Michael H.; Schubert, Matthias: Beurteilung von Restrisiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten. In: Neues aus der Brückenforschung, Dokumentation SIA D 0223, November 2007, pp. 123–132
- 5 Als Einstieg in die umfangreiche Fachliteratur eignet sich ein demnächst erscheinendes Buch in englischer Sprache, das der Autor mitverfasst hat. Knoll, Franz; Vogel, Thomas: Design for Robustness; Structural Engineering Documents No 11. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Zürich (in Vorbereitung)
- 6 Norm SIA 263: Stahlbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003, Ziffer 6.2.2.2
- 7 Zum Beispiel in Ziffer 2.4.6 der Norm SIA 260<sup>1</sup>
- 8 Norm SIA 262: Betonbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003, Ziffer 4.3.6.7
- 9 Vornorm SIA 166: Klebebewehrungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2004, Ziffer 2.3.5f.
- 10 Bundesamt für Verkehr: Bauten an, über und unter der Bahn. Anhänge zu den Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung, Anhang Nr. 1, Juli 2006, Tabelle 75
- 11 Bundesamt für Strassen (Astra): Anprall von Strassenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten; Richtlinie, Ergänzungen zur Norm SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke, 2005, Ziffer 2.1.2
- 12 Bundesamt für Strassen (Astra) in Zusammenarbeit mit SBB AG, Infrastruktur Ingenieurbau: Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten. Richtlinie Ausgabe 2007 V2.00, Astra Bern, 2007, 49 pp.
- 13 Solche Spannglieder müssen der Kategorie c zugewiesen werden

der Robustheit führen: Spannglieder, die die Tragsicherheit von Eisenbahnbrücken gewährleisten, müssen mit Kunststoffhüllrohren elektrisch isoliert und somit kontrollierbar ausgeführt werden.<sup>13</sup> Diese Konstruktion verursacht höhere Unterhaltskosten. Somit besteht die Versuchung, den Einsatz der Vorspannung einzuschränken und stattdessen weniger schlanke, schlaff bewehrte Biegeträger einzusetzen – diese versagen aber tendenziell eher spröde auf Querkraft als duktil auf Biegung.

Die Robustheit steht in einem Spannungsfeld mit der Wirtschaftlichkeit und der Dauerhaftigkeit. Es bleibt dem Ingenieur überlassen, wie er die verschiedenen Ansprüche im Einzelfall gewichten will und welche Folgerungen sich daraus ergeben.

Thomas Vogel, Prof., dipl. Bauing. ETH Zürich, IBK, vogel@ibk.baug.ethz.ch