

**Zeitschrift:** Tec21  
**Herausgeber:** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
**Band:** 134 (2008)  
**Heft:** 35: Erdbebensicher

**Artikel:** Tragwerksverformung bei Erdbebeneinwirkung  
**Autor:** [s.n.]  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-108965>

#### **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](#)

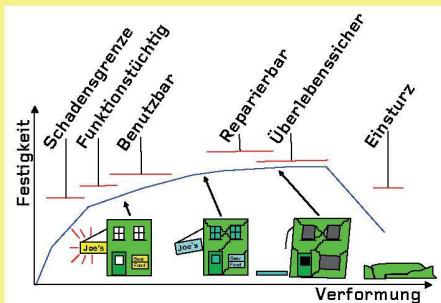
#### **Terms of use**

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:** 22.02.2026

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

# TRAGWERKSVERFORMUNG BEI ERDBEBENEINWIRKUNG



01



02

Verformungsbasierte Verfahren haben das Erdbebeningenieurwesen signifikant weiterentwickelt. Sie erlauben eine im Vergleich zu kr ftebasierten Verfahren realitätsnähere Erfassung des seismischen Verhaltens eines Tragwerks und führen somit in der Regel zu einer günstigeren Bemessung bzw. Überprüfung. Erdbebenforschung und -lehre an der ETH Zürich haben zum Ziel, verformungsbasierte Verfahren für die Praxis zu erschliessen.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat im Erdbebeningenieurwesen ein Paradigmenwechsel stattgefunden: Das primäre Ziel ist es nicht mehr nur, Einst ze zu vermeiden, um Menschenleben zu retten, sondern im Voraus abzuschätzen, welche Schäden unter bestimmten seismischen Einwirkungen zu erwarten sind. Das gilt sowohl für die Bemessung eines Neubaus als auch für die Überprüfung eines bestehenden Tragwerks. Dieser Ansatz ist als verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen («Performance-Based Earthquake Engineering»<sup>1</sup>) bekannt und stellt sicher, dass das Verhalten des Bauwerks die Bedürfnisse der Ben utzer, der Bauherrschaft und der Gesellschaft möglichst optimal erfüllt. Um diesen Ansatz anwenden zu können, muss das Erdbebenverhalten mit einer quantitativ bestimmbaren Genauigkeit vorhergesagt werden können. Diese Information ermöglicht es dem Auftraggeber, zweckmässige und sachkundige Entscheidungen über Zielkonflikte zu treffen, die den ganzen Lebenszyklus des Bauwerks berücksichtigen und nicht lediglich seine Baukosten. Die Verhaltenszust nde (Bild 1), die von einer bestimmten Erdbebenbeanspruchung hervorgerufen werden können, berücksichtigen Schäden am Tragwerk, an den nichttragenden Bauteilen und an den Einrichtungen sowie sich daraus ergebende Konsequenzen. Sie werden anhand von Indikatoren charakterisiert, die erfassbaren Ereignissen entsprechen wie Rissbildung, Fliessbeginn der Bewehrung, Abplatzen des Betons, Reissen der Bewehrung, erreichte Stockwerksschiefstellungen und bleibende Verformungen.

Aus Bild 1 ist ersichtlich, dass Erdbebenschäden besser mit den auftretenden Verformungen als mit den Kräften korrelieren. Aus diesem Grund sind sogenannte verformungsbasierte Bemessungsverfahren, die die seismische Beanspruchung eines Tragwerks durch eine möglichst realistische Abbildung seines inelastischen Verformungsverhaltens erfassen, immer häufiger in Literatur und Normen zu finden. Typische Beispiele dafür sind die «Capacity Spectrum Method»<sup>1</sup> in ihren unterschiedlichen Varianten oder das «Direct Displacement Based Design (DDBD)»<sup>2,3</sup>. Unabdingbare Voraussetzung für die Anwendung dieser Methoden sind ausreichende Kenntnisse über das elastische sowie das inelastische Verformungsverhalten der Bauteile des Tragwerks. In Anbetracht der unterschiedlichen Baugewohnheiten in verschiedenen Ländern ist es erforderlich, dass diese Kenntnisse die lokalen Gegebenheiten widerspiegeln.

## ...IN DER FORSCHUNG AN DER ETH ZÜRICH

Am Lehrstuhl für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik der ETH Zürich laufen zurzeit eine Reihe von Forschungsprojekten, die sich mit dem Verformungsverhalten von verschiedenen für die Schweiz typischen Tragwerken beschäftigen. Sie haben zum Ziel, bessere Grundlagen für die verformungsbasierte Bemessung bzw. Überprüfung von Bauwerken zu erarbeiten. Beispielsweise wird dabei das seismische Verhalten von bestehenden Schweizer Stahlbetonbr cken aus den 1960er-Jahren untersucht, das nichtlinear-zyklische Verfor-

01 Mögliche Verhaltenszust nde eines erdbebenbeanspruchten Tragwerks (nach Hamburger in Anm. 2) (Bilder: Alessandro Dazio/IBK)

02 Einrichtung für die statisch-zyklischen Versuche an U-förmigen Stahlbetontragw nden in Anm. 5. Der eigentliche Versuchskörper wurde weiss gestrichen, um das Rissbild besser erkennbar zu machen, die Hydraulikzylinder zum Aufbringen von Vertikallasten und Horizontalkräften sind blau

mungsverhalten von unbewehrten Mauerwerksbauten numerisch und experimentell analysiert oder – wie in Bild 2 dargestellt – das Erdbebenverhalten von Gebäuden erforscht, die durch U-förmige Stahlbetontragwände ausgesteift sind.<sup>4</sup>

Stahlbetonkerne weisen unter Erdbebeneinwirkung ein sehr komplexes Verhalten auf. Sie werden auf biaxiale Biegung und Schub sowie auf Torsion bis weit innerhalb ihres inelastischen Verformungsbereichs beansprucht. Trotz häufiger Anwendung in der Praxis wurde ihr seismisches Verhalten weltweit kaum untersucht. Deshalb wurde an der ETH ein Forschungsprojekt zu dieser Problemstellung initiiert. In einer ersten Phase wurden mittels nichtlinearer Zeitverlausberechnungen an einem sechsstöckigen Prototypgebäude die für den Kern ungünstigsten Beanspruchungszustände identifiziert (Bild 3, a). Die Resultate der Simulationen wurden dann benutzt, um Versuchskörper und Versuchseinrichtung zu planen. Zwei Modelle des plastischen Bereichs des Kerns im Massstab 1:2 wurden anschliessend unter statisch-zyklischer Beanspruchung getestet.<sup>5</sup> Die verwendete Belastungsgeschichte ist in Bild 3, b), dargestellt und umfasste Auslenkungen sowohl parallel zu den Hauptrichtungen des Kerns als auch in diagonaler Richtung.

#### ...IN DER LEHRE AN DER ETH ZÜRICH

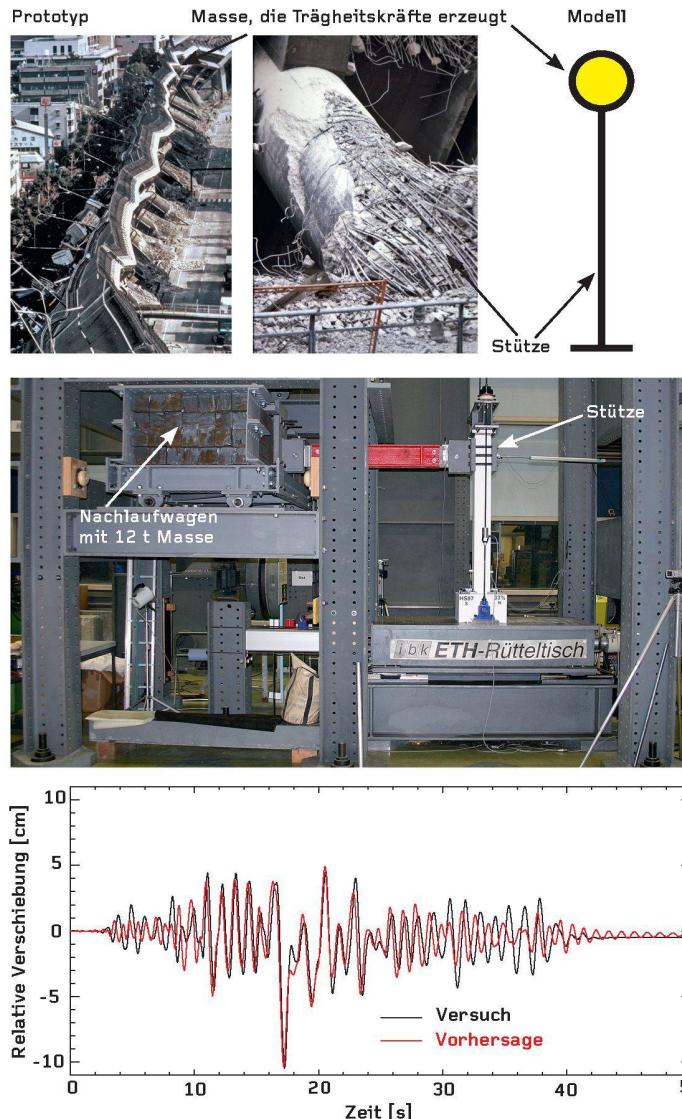
Neben einer traditionellen Grundlagenvorlesung wird am Institut für Baustatik und Konstruktion IBK der ETH Zürich seit dem Herbstsemester 2007 eine Vertiefungsvorlesung im Erdbebeningenieurwesen angeboten. Die Vorlesung behandelt hauptsächlich das nichtlineare Verformungsverhalten von Tragwerken unter Erdbebeneinwirkung. Dabei werden sowohl die theoretischen Kenntnisse als auch die analytischen und numerischen Werkzeuge vermittelt, die die erfolgreiche Anwendung von modernen verformungsbasierten Verfahren ermöglichen.

Als besondere Herausforderung werden die Teilnehmenden aufgefordert, das seismische Verhalten einer duktil ausgelegten Stahlbetonstütze anhand von vereinfachten Handberechnungen sowie von nichtlinearen Zeitverlausberechnungen vorherzusagen. Die Stahlbetonstütze wird am Ende des Semesters auf dem Rütteltisch des IBK getestet. Die Genauigkeit der eigenen Vorhersagen kann dann direkt mit den experimentellen Resultaten des Demonstrationsversuchs überprüft werden. Zusätzlich kann die Auswirkung von unterschiedlichen Modellierungsannahmen bezüglich wichtiger Parameter wie der Dämpfung, des hysteretischen Materialverhaltens und der numerischen Diskretisierung beurteilt werden.

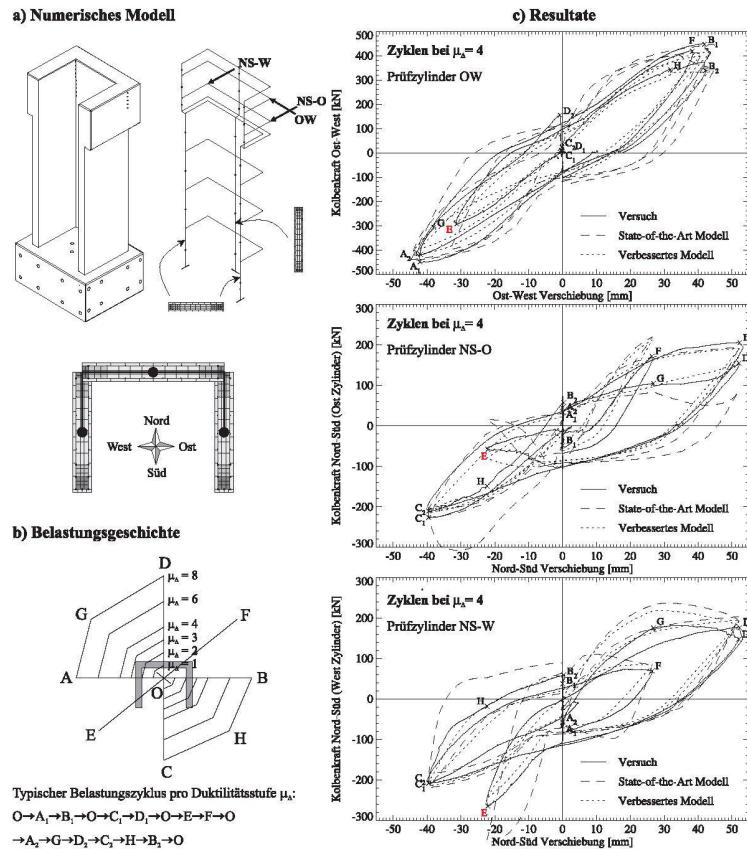
Das Bild zeigt oben das Gedankenmodell, das dem Demonstrationsversuch zugrunde liegt, am Beispiel des Versagens von Stützen beim Erdbeben in Kobe vom 17.1.1995. Darunter ist die entsprechende Versuchseinrichtung zur Erzeugung der Fußpunktanregung, der Rütteltisch am IBK an der ETH Zürich, abgebildet. Ganz unten wird die beste Vorhersage für das transiente Verhalten der Stütze (mittels des Programms Seismostruct<sup>6</sup>) der verschiedenen Gruppen von Studierenden mit dem Versuchsresultat verglichen.

Alle Informationen zum Demonstrationsversuch inklusiv experimentelle Ergebnisse sind auf der Website der Vorlesung<sup>7</sup> zu finden. Die Vorlesung kann auch von Hörern und Hörerinnen aus der Praxis belegt werden und wird im nächsten Herbstsemester erneut angeboten.<sup>8</sup> (Bild: IBK)

Alessandro Dazio



03 Nichtlineare Kraft-Verformungs-Beziehung von U-förmigen Stahlbetontragwänden: Vergleich zwischen Versuchen und numerischen Simulationen anhand eines äquivalenten Rahmenmodells gemäss Anm. 6:  
 a) Versuchskörper und numerisches Modell  
 b) Im Experiment verwendete Belastungsgeschichte  
 c) Experimentelles hysteretisches Verhalten des ersten Versuchskörpers für die Zyklen mit Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta}=4$



03

#### Anmerkungen

- 1 Bozorgnia, Y., Bertero, V.: *Earthquake Engineering – From Engineering Seismology to Performance Based Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2004
- 2 Fédération Internationale du Béton: *Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings. State-of-the-art Report*. FIB Bulletin 25. 2003
- 3 Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J.: *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press, 2007
- 4 Beyer, K., Dazio, A., and Priestley, M. J. N.: *Seismic design of torsionally eccentric building with U-shaped RC walls*. Research Report ROSE – 2008/03. IUSS Press, 2008
- 5 Beyer, K., Dazio, A., and Priestley, M. J. N.: *Quasi-static cyclic tests of two U-shaped reinforced concrete walls*. *Journal of Earthquake Engineering*, in press
- 6 Beyer, K., Dazio, A. and Priestley, M. J. N.: *Inelastic wide-column models for U-shaped reinforced concrete walls*. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, S1, pp. 1–33. 2008
- 7 Dazio, A., Wenk, T.: Website der Vorlesung «Erdbebensicherung von Bauwerken II» an der ETH Zürich ([www.ibk.ethz.ch/da/education/EB2](http://www.ibk.ethz.ch/da/education/EB2))
- 8 Vorlesungsverzeichnis der ETH Zürich ([www.vvz.ethz.ch/Vorlesungsverzeichnis/lernseinheitDetailPre.do?lernseinheitId=53449&semkez=2008W](http://www.vvz.ethz.ch/Vorlesungsverzeichnis/lernseinheitDetailPre.do?lernseinheitId=53449&semkez=2008W))
- 9 SeismoSoft: *SeismoStruct – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures* ([www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com)), 2007

Die Versuchskörper waren duktil ausgelegt und konnten inelastische Verformungen überstehen, die wesentlich grösser als der seismische Verformungsbedarf waren, der typisch für Gebiete mässiger Seismizität ist. Dabei spielten die vier gut umschnürten End- und Eckbereiche eine wesentliche Rolle, indem sie einerseits ein ausreichendes Stauchungsvermögen der jeweiligen Druckzonen gewährleisteten und andererseits die Integrität des plastischen Bereichs sicherstellten. Im Bild 3, c), ist das experimentelle hysteretische Verhalten des ersten Versuchskörpers für die Zyklen mit Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta}=4$  dargestellt. Die drei Diagramme stellen die Kraft-Verformungs-Beziehungen dar, die bei der Wirkungslinie der drei horizontalen Prüfzylinder OW, NS-W und NS-O (siehe Bilder 2 und 3, a) gemessen wurden.

#### EINFACHE MODELLE – RESULTATE FÜR DIE PRAXIS

Bei der Modellierung des zyklischen Verformungsverhaltens der Kerne wurden relativ einfache, praxistaugliche Ansätze bevorzugt, wie etwa das äquivalente Rahmenmodell aus Bild 3, a). Die vertikalen Stäbe entsprechen dabei nichtlinearen Faserelementen, während die horizontalen Verbindungen elastische Eigenschaften aufweisen. Vollständig elastische äquivalente Rahmenmodelle wurden bereits in den 1960er-Jahren ausführlich untersucht. In der Literatur sind aber kaum Hinweise zu finden, wie die Eigenschaften von inelastischen äquivalenten Rahmenmodellen am besten festzulegen sind. Eine erste Wahl der Eigenschaften erlaubte eine Simulation der Versuche («State of the Art»-Modell, Bild 3, c), die vor allem für Auslenkungen in diagonaler Richtung (Punkt E, Bild 3, c) klar unbefriedigend war. Erst nach einer vertieften Analyse des Verformungsverhaltens der beiden Versuchskörper konnten neue Empfehlungen bezüglich der Wahl der Eigenschaften des Rahmenmodells vorgeschlagen werden, die eine wesentlich akkurate Simulation der Versuche ermöglichte («verbessertes» Modell im Bild 3, c).<sup>6</sup> Diese Empfehlungen stehen nun Ingenieuren und Ingenieurinnen zur Verfügung, um inelastische äquivalente Rahmenmodelle als einfache Werkzeuge zur Erfassung des Verformungsverhaltens von Stahlbetonkernen im Rahmen von verformungsbasierten Verfahren zu verwenden. Weitere Details zu den Versuchen und zu den numerischen Simulationen sind in den entsprechenden Veröffentlichungen zu finden.<sup>4–6</sup>