

D-A-CH-Tagung: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2017
21.-22. September 2017
Weimar, Deutschland

LEHRVERANSTALTUNGEN IN BAUDYNAMIK UND ERDBEBENINGENIEURWESEN AN DER EPFL

Katrin Beyer¹, Pierino Lestuzzi², Ian Smith³ und Dimitrios Lignos⁴

¹ École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Earthquake Engineering and Structural Dynamics Laboratory (EESD), katrin.beyer@epfl.ch

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Applied Computing and Mechanics Laboratory (IMAC), pierino.lestuzzi@epfl.ch

³ École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Applied Computing and Mechanics Laboratory (IMAC), ian.smith@epfl.ch

⁴ École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Resilient Steel Structures Laboratory (RESSLAB), dimitrios.lignos@epfl.ch

KURZFASSUNG

Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen sind im Lehrplan des Bauingenieurwesens an der EPFL gut verankert. Baudynamik ist eine von nur fünf Pflichtveranstaltungen im Masterstudiengang und der Vorlesung muss daher von allen Studenten besucht und bestanden werden. Die Grundlagen der Erdbebenbemessung und –beurteilung von Gebäuden werden im Wahlfach „Seismic engineering“ vermittelt, welches im ersten Jahr des Masterstudiengangs angeboten wird. Seit dem vergangenen Jahr wird das Angebot in diesem Themenbereich von zwei weiteren Lehrveranstaltungen ergänzt: Die Vorlesung „Advanced steel design“ behandelt die Erdbebenbemessung von Stahlgebäuden und die Vorlesung „Nonlinear analysis of structures“ gibt eine grundlegende Einführung in die nichtlineare Berechnung von Gebäuden unter Erdbebeneinwirkung.

Dieser Beitrag fasst die Zielsetzungen und Methoden der verschiedenen Vorlesungen kurz zusammen und zeigt einige der Modelle, die verwendet werden, um gewisse Grundprinzipien zu erläutern. Weiter wird auf Semester- und Masterarbeiten eingegangen, die im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen angeboten werden und ein integraler Teil der Ausbildung sind. Der Artikel schliesst mit einem kurzen Überblick über das Weiterbildungsangebot in der Schweiz in diesem Bereich.

Schlagwörter: Lehre, Baudynamik, Erdbebeningenieurwesen

1. EINFÜHRUNG

Schlanke Strukturen unter wind- oder verkehrsinduzierten Schwingungen und die Gefährdung durch natürliche oder induzierte Erdbeben erfordern bei der Bemessung von Gebäuden und Infrastrukturbauten gute Kenntnisse im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen. An der EPFL werden Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen im Masterstudium des Bauingenieurwesens unterrichtet. Insgesamt werden zu diesem Themenbereich vier Vorlesungen angeboten. Dies sind die Vorlesungen in Baudynamik, Erdbebeningenieurwesen, Erdbebenbemessung von Stahlgebäuden und nichtlinearen Berechnungen von Strukturen. Als Beitrag zu der an dieser DACH-Tagung geplanten

Diskussion zu den Anforderungen an die Lehre im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen in der Ausbildung von Bauingenieuren fassen wir, die die entsprechenden Vorlesungen an der EPFL verantworten, die Ausbildungsinhalte kurz zusammen. Der Artikel schliesst mit einem kurzen Überblick über einige Semester- und Masterarbeiten und Weiterbildungskurse im Bereich des Erdbebeningenieurwesens und der Baudynamik, welche in der Schweiz angeboten werden.

2. VORLESUNGEN ZU BAUDYNAMIK UND ERDBEBENINGENIEURWESEN AN DER EPFL

An der EPFL werden zur Zeit vier Vorlesungen im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen angeboten. Diese sind die Vorlesungen „Dynamique des structures“ (Pierino Lestuzzi, Ian Smith), „Seismic engineering“ (Katrin Beyer), „Advanced steel design“ (Dimitrios Lignos) und „Nonlinear analysis of structures“ (João Almeida, Katrin Beyer). Die folgenden Abschnitte fassen die Vorlesungen kurz zusammen.

2.1. Vorlesung “Dynamique des structures”

Zum Curriculum des Bauingenieurwesens an der EPFL gehört bereits seit Langem eine Vorlesung in Baudynamik. Diese Vorlesung wird gemäss des momentan gültigen Lehrplans im 7. Semester, d.h. im ersten Semester des Masterstudiums, angeboten. Es handelt sich um eine obligatorische Vorlesung für alle Studierenden des Bauingenieurwesens. Studierende von anderen Abteilungen der EPFL, insbesondere diejenigen des Maschinenbaus, können diese Vorlesung als Wahlfach besuchen. Ziel dieser Vorlesung ist die Vermittlung der Grundlagen der Baudynamik. Sie ist ausserdem Voraussetzung für weiterführende Vorlesungen, wie z. B. Seismic engineering.

Die Vorlesung wird als übliche ex-cathedra Vorlesung unterrichtet. Sie erstreckt sich auf ein ganzes Semester und enthält drei Stunden (zwei Stunden Theorie plus eine Stunde Übung) pro Woche während 14 Wochen und wird in der Prüfungssession schriftlich geprüft. Der Inhalt dieser Vorlesung entspricht dem klassischen Inhalt einer einführenden Vorlesung in Baudynamik (Tabelle 1). Ungedämpfte, gedämpfte und erzwungene Schwingungen werden zuerst für Einmassenschwinger und dann für Mehrmassenschwinger behandelt.

Tabelle 1. Vorlesung „Dynamique des structures“: Ziele und Inhalt. Unterrichtssprache: Französisch. Link zur Vorlesung: <http://edu.epfl.ch/coursebook/en/dynamic-analysis-of-structures-CIVIL-420>

Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Bestimmung der Eigenfrequenzen eines Mehrmassenschwingers• Bestimmung der internen Kräfte und der Verschiebungen eines Mehrmassenschwingers• Kenntnis des dynamisches Verhalten von Ein- und Mehrmassenschwinger unter verschiedenen Anregungen; inkl. dynamische Amplifikation und Transferfunktionen• Verwendung von Antwortspektren• Wahl und Anwendung einer geeigneten Methode zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Strukturen• Definition eines einfachen Modells, um das dynamischen Verhalten eines Gebäudes abzubilden
Inhalt	<ul style="list-style-type: none">• Einmassenschwinger: Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen, harmonische Anregung, Fundationsanregung, beliebige Anregung. Duhamel Integral, Konvolution. Stoss, Explosion. Numerische Integration. Starre und flexible Systeme mit verteilter Masse.• Mehrmassenschwinger: Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen, harmonische Anregung, Rayleigh-Quotient. Bestimmung der Eigenfrequenzen und Eigenvektoren. n. Harmonische Anregung. Fundationsanregung. Antwortspektren. Modalanalyse.• Fallbeispiele aus der Baudynamik: Tilger für Fussgängerbrücken und Sprungtürme

Die verschiedenen Eigenschaften des dynamischen Strukturverhaltens werden anhand physikalische Modelle mit 2D-Rahmen im Auditorium dargestellt (Abbildung 1). Dabei wird z.B. ein kleiner elektrischer Motor mit einer exzentrischen Masse eingesetzt, um erzwungenen Schwingungen am

Modell zu erzeugen. Es wird speziell auf das Thema Tilger eingegangen, welches eine besonders interessante Anwendung der Baudynamik ist. Zur Veranschaulichung des Effekts eines Tilgers wurde eine kleine Stahlbrücke gebaut, die vor der Bauhalle aufgebaut ist und die durch Gehen oder Hüpfen angeregt werden kann. Ein einfacher Tilger, der im Rahmen eines Semesterarbeit dimensioniert und gebaut wurde (Abbildung 2), erlaubt es, die Funktionsweise des Tilgers zu demonstrieren. Numerische Berechnungen mit Matlab [1] ergänzen die klassischen analytischen Lösungsmethoden. Als Vorlage für diese Vorlesung dient das entsprechende französisch-sprachige Lehrbuch [2].

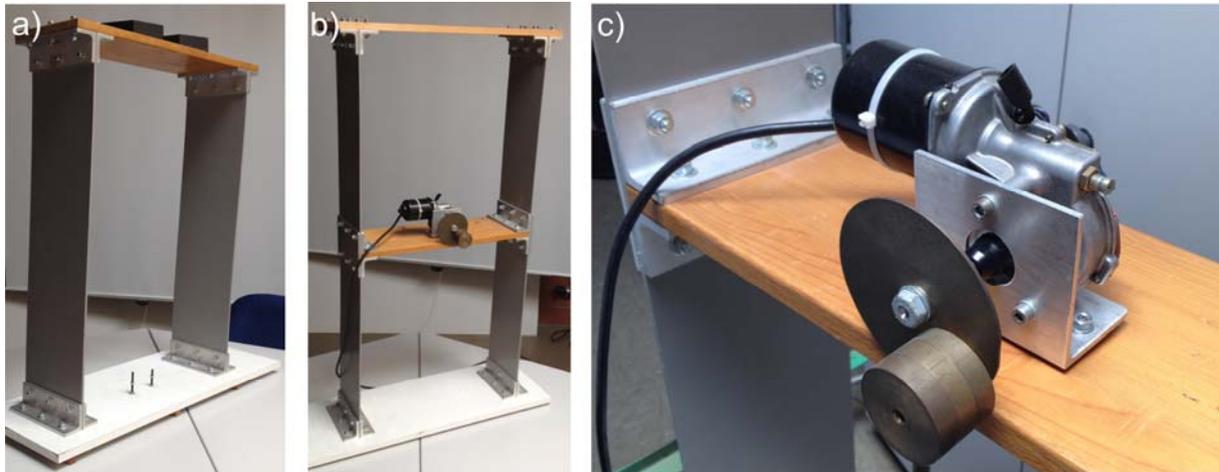


Abbildung 1. Modelle aus der Baudynamik-Vorlesung: Einmassenschwinger (a), Mehrmassenschwinger (b), Motor mit Unwucht zur harmonischen Anregung des Mehrmassenschwingers (IMAC)

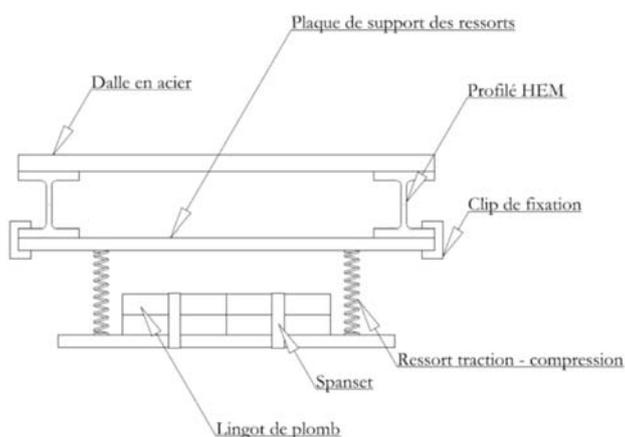


Abbildung 2. Modelle aus der Baudynamik-Vorlesung: Tilger für eine kleine Stahlbrücke für Demonstrationszwecke, der im Rahmen eines Semesterarbeit dimensioniert und gebaut wurde (IMAC)

2.2. Vorlesung „Seismic Engineering“

Grundlagen im Erdbebeningenieurwesen werden an der EPFL in der Vorlesung „Seismic engineering“ vermittelt, welche im zweiten Semester des Masterstudiums stattfindet. Die ex-cathedra Vorlesung wird mit drei Wochenstunden unterrichtet. Von diesen drei Stunden werden zwei für die Vorlesung verwendet und die dritte Stunde variabel entweder für Vorlesung, Einführung oder Besprechung von obligatorischen Übungen oder Quizzes verwendet. Letztere dienen der Festigung des Stoffes; den Studierenden wird ungefähr 20 Minuten Zeit für die Lösung gegeben, wobei Gruppenarbeit unterstützt wird und Betreuer mit den Studierenden bereits offene Fragen diskutieren. Anschliessend wird der Quizz im Plenum besprochen und gelöst. Die Quizzes werden insbesondere genutzt, um wichtige Konzepte ohne langwierige Rechnungen zu festigen.

Das erste Ziel der Vorlesung „Seismic engineering“ ist es, ein Verständnis für das Verhalten von Strukturen unter Erdbebeneinwirkung zu vermitteln (Tabelle 2). Dazu gehört die Diskussion von typischen Versagensmechanismen anhand von Fotos von Erkundungsmissionen und Videos von

grossmassstäblichen Rütteltischversuchen. Weiteres Anschauungsmaterial sind kleine Modelle, die im Rahmen von Semesterarbeiten entwickelt und auf einem Quanser-Rütteltisch getestet werden. Beispiele dieser Modelle werden in Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 gezeigt. Auf dieser Grundlage werden konzeptionelle Entwurfsprinzipien für Gebäude und Brücken, die zu einem guten Verhalten unter Erdbebeneinwirkung führen, vermittelt.

Ein weiteres Ziel der Vorlesung ist die Vermittlung der Methoden zur Erdbebenbemessung von neuen Gebäuden. Dazu gehören die klassischen Bemessungsmethoden des Erdbebeningenieurwesens (Ersatzkraftverfahren, Antwortspektrenmethode) und insbesondere die Methode der Kapazitätsbemessung. Letztere wird im Detail für Gebäude mit Stahlbetonwänden diskutiert und in Beispielen und Übungen angewendet. Dabei wird auf die gute Durchbildung der Stahlbetonelemente und die Auswirkung von Fehlern in der Konstruktionsdetails eingegangen.

Das dritte Ziel dieser Vorlesung ist die Vermittlung der Idee, dass der Lastfall Erdbeben eher als Verformungsbedarf denn als Kraftbedarf zu verstehen ist. Um diese Anschauung zu vermitteln wird von Anfang an auf Verformungsbedarf (z. B. in der Form von Verschiebespektren) und Verformungskapazität (z. B. durch plastic hinge models) eingegangen. Weiter wird auch die N2-methode gelehrt und in Quizzes und Übungen gefestigt.

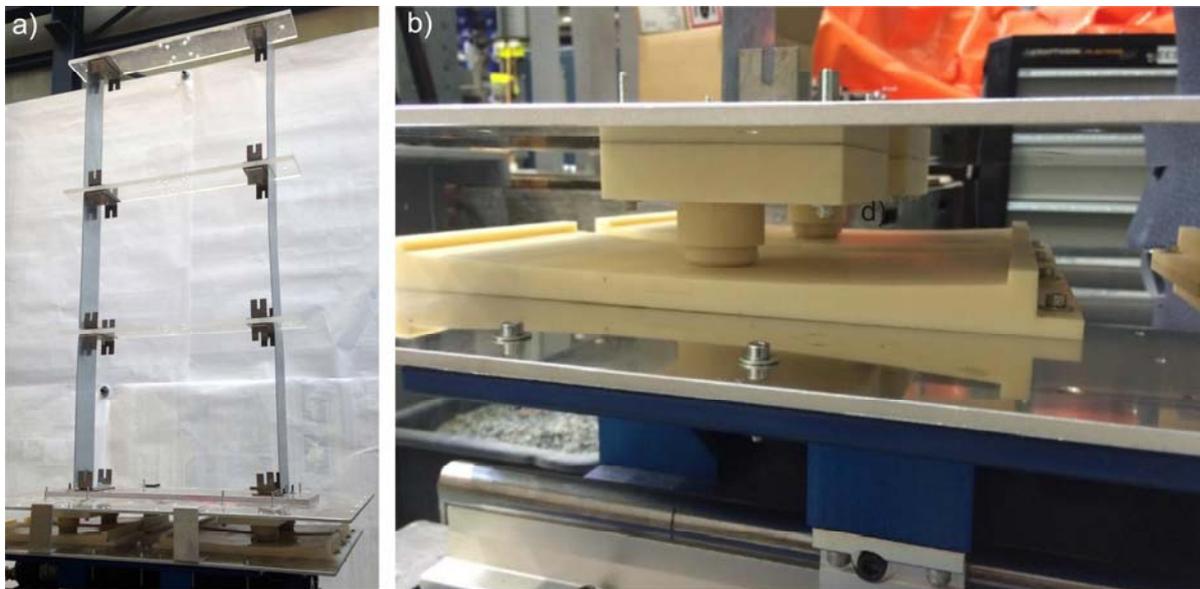


Abbildung 3. Modelle aus der Erdbeben-Vorlesung: Basis-isolierte Struktur mit Isolatoren aus dem 3D-Drucker (EESD)

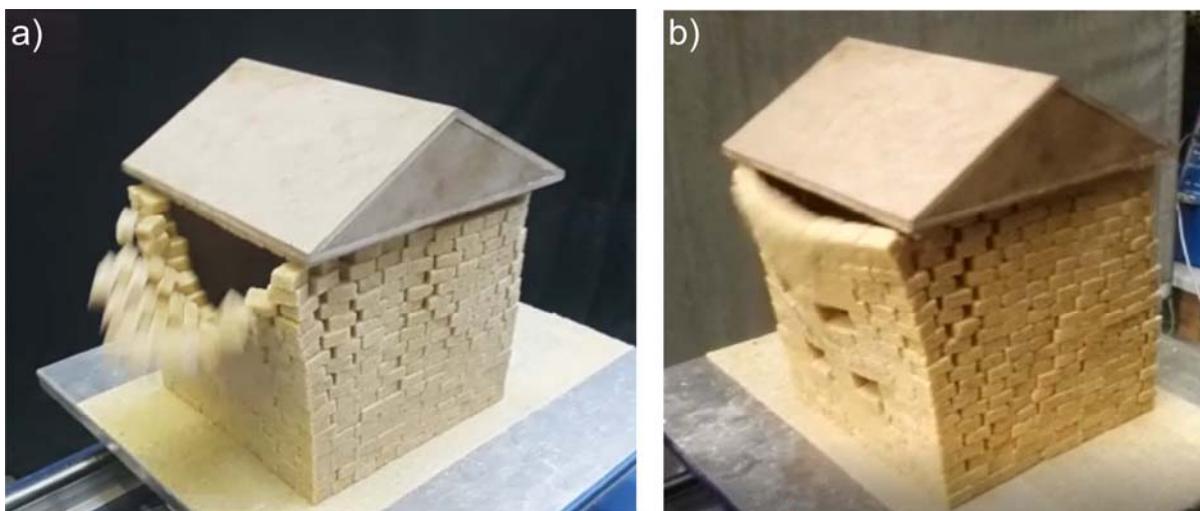


Abbildung 4. Modelle aus der Erdbeben-Vorlesung: Versagen aus der Ebene eines Mauerwerksgebäude aus Würfelzucker (EESD)

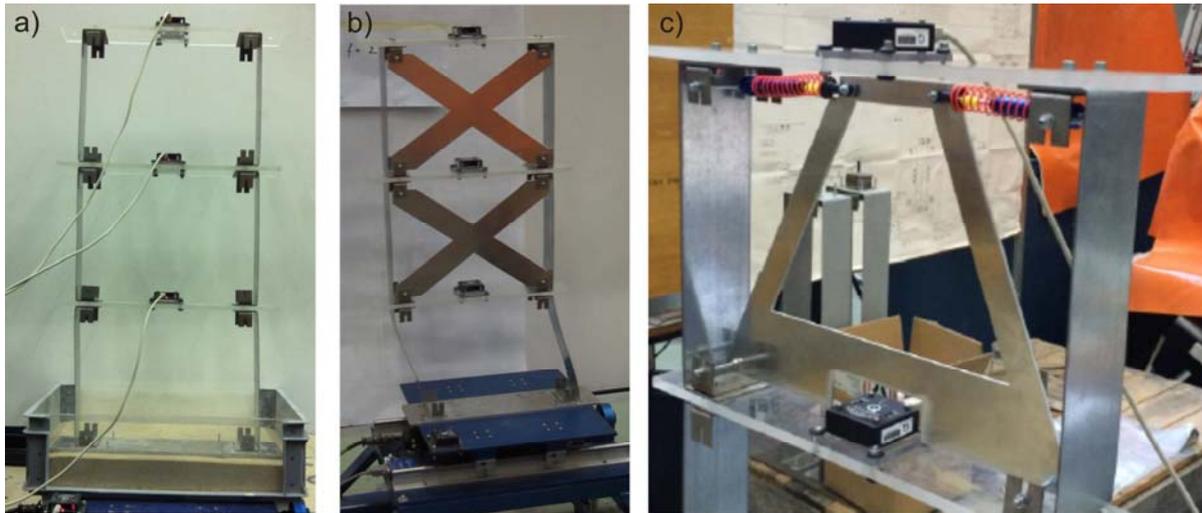


Abbildung 5. Modelle aus der Erdbebenvorlesung: Flexible Foundation aus Sand (a), Soft-storey Mechanismus (b), Dämpfer in einer Rahmenstruktur (EESD)

Tabelle 2. Vorlesung „Seismic engineering“: Ziele und Inhalt. Unterrichtssprache: Englisch. Link zur Vorlesung: <http://edu.epfl.ch/coursebook/en/seismic-engineering-CIVIL-522>

Ziele

- Explain the effects of an earthquake on various types of structures
- Design wall-type structures (RC and URM) for earthquakes

Inhalt

- Seismicity, magnitude and intensity
- Typical failure modes of buildings and bridges
- Conceptual seismic design
- Analysis methods (response spectra for elastic and inelastic systems, equivalent lateral force method, response spectrum analysis)
- Design and evaluation methods (force-based methods, displacement-based methods)
- Design philosophies (conventional design, capacity design), capacity design of reinforced concrete structures, seismic detailing of reinforced concrete structures
- Inelastic behaviour of reinforced concrete structures when subjected to cyclic loading
- Plastic hinge model for RC walls
- Displacement-based assessment methods (capacity spectrum method, N2-method)
- Seismic response of unreinforced masonry structures, force-based and displacement-based assessment of in-plane and out-of-plane failures modes

2.3. Vorlesung “Advanced Steel Design”

Die Vorlesung “Advanced steel design” hat zum Ziel, Studierende mit dem Erdbebenverhalten von verschiedenen Stahlbauten vertraut zu machen, auf das nichtlineare dynamische Verhalten der verschiedenen Komponenten einzugehen und Methoden für die Wind- und Erdbebenbemessung von Stahlbauten zu diskutieren.

Das Erdbebenverhalten von Stahlbauten wird insbesondere durch lokale und globale Instabilitäten beeinflusst. Aus diesem Grund wird diesem Aspekt in der Vorlesung ein besonderes Augenmerk gewidmet und verschiedene Modelle dazu als Anschauungsmaterial entwickelt (Abbildung 6). Die ex-cathedra Vorlesung wird mit drei Wochenstunden Vorlesung im zweiten Mastersemester unterrichtet. Sie ergänzt die Vorlesung „Seismic engineering“, in welcher neben den Grundlagen des Erdbebeningenieurwesens die Erdbebenbemessung von Stahlbeton- und Mauerwerkstrukturen behandelt wird.

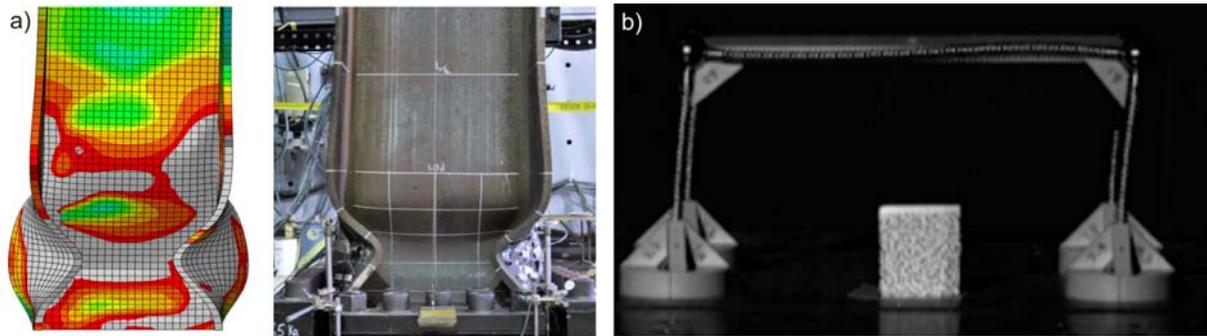


Abbildung 6. Modelle aus der Vorlesung „Advanced Steel Design“: Lokale Instabilität einer Stahlstütze unter Erdbebenanregung (numerische Simulation im Vergleich mit experimenteller Untersuchung) (a), dynamische Instabilität illustriert mittels eines MOLA-Modells auf dem Rütteltisch (RESSLAB)

Tabelle 3. Vorlesung „Advanced Steel Design“: Ziele und Inhalt Unterrichtssprache: Englisch. Link zur Vorlesung: <http://edu.epfl.ch/coursebook/en/advanced-steel-design-CIVIL-435>

Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Describe the behaviour of various steel lateral load resisting systems and their structural components • Design steel structures for seismic and wind loading • Assess/ Evaluate the basic behaviour of steel components under cyclic loading
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Seismic loads, structural analysis for lateral loading • Steel frame ductility and stability under lateral loading • Seismic design of steel moment-resisting frames • Seismic design of steel Concentrically Braced Frames • Seismic design of steel Eccentrically Braced Frames • Seismic design of innovative lateral load-resisting systems • Special topics related to the seismic behaviour of steel structures

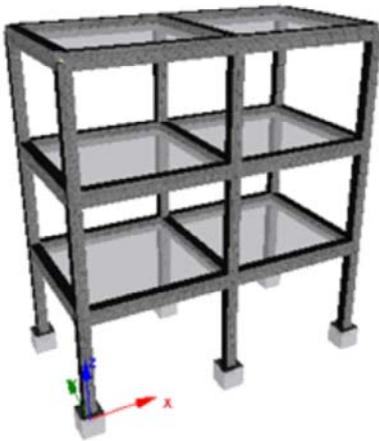
2.4. Vorlesung “Nonlinear Analysis of Structures”

Bei der Erdbebenbeurteilung von bestehenden Gebäuden wird bereits heute das nichtlineare Verhalten in der Regel durch eine Pushover-Analyse explizit berücksichtigt. Dies erfordert eine nichtlineare Modellierung von Strukturen. Bei neuen Gebäuden wird die Nichtlinearität noch approximativ durch den Verhaltensbeiwert q berücksichtigt und damit die Bemessung auf ein lineares Problem reduziert. Für die Zukunft wird erwartet, dass die nichtlineare Modellierung an Bedeutung gewinnt und langfristig nichtlineare statische Berechnungen immer mehr durch nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen ersetzt werden. Eine gute Kenntnis der Modellierung von geometrischen und Baustoff-spezifischen Nichtlinearitäten ist daher ein wichtiger Teil der Ausbildung im Erdbebeningenieurwesen.

Das Ziel der Vorlesung „Nonlinear analysis of structures“ ist es, die Grundlagen der nichtlinearen Modellierung von Strukturen zu vermitteln. Dies umfasst insbesondere Lösungsalgorithmen für nichtlineare Gleichungssysteme, konstitutive Modelle und finite Elementformulierungen. Bei den Elementformulierungen wird insbesondere auf nichtlineare Balkenelemente eingegangen (displacement-based und force-based nonlinear beam elements), die sich auf Grund ihres relativ geringen Computerberechnungsaufwands für die effiziente numerische Modellierung von Gebäuden und Brücken sehr gut eignen.

Die ex-cathedra Vorlesung wird mit drei Wochenstunden Vorlesung im dritten Mastersemester unterrichtet. Die Vorlesung wird von Übungen in Matlab [1] begleitet, in welchen die Studenten Lösungsalgorithmen, konstitutive Modelle und einfachste Elemente selbst implementieren. Für die nichtlinearen statischen und dynamischen Berechnungen von Gebäuden wird das Programm Seismostruct [3] verwendet, welches sich auf Grund der einfachen Eingabeoberfläche und der Möglichkeit, viele Parameter explizit zu kontrollieren, sehr gut für die Lehre eignet.

a)



b)

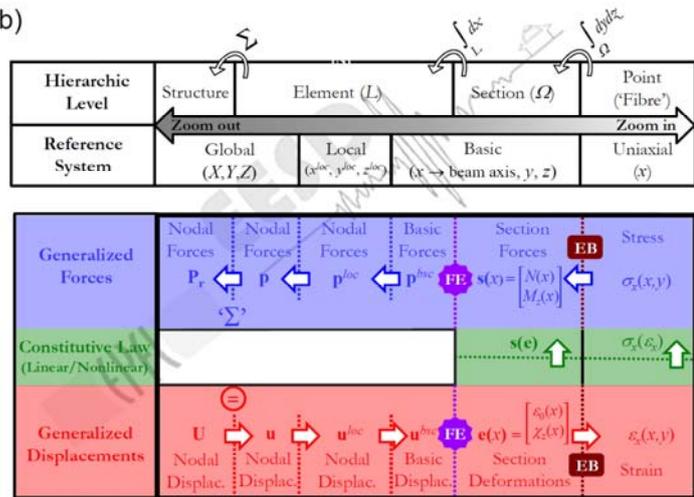


Abbildung 7. Vorlesung „Nonlinear analysis of Structures“: Balkenmodell eines Stahlbetonrahmens und Flowchart für die Lösung nichtlinearer Balkenelemente (EESD)

Tabelle 4. Vorlesung „Nonlinear Analysis of Structures“: Ziele und Inhalt Unterrichtssprache: Englisch. Link zur Vorlesung: <http://edu.epfl.ch/coursebook/en/non-linear-analysis-of-structures-CIVIL-449>

Ziele

- Hypothesize different structural members with adequate modelling approaches
- Choose appropriate constitutive laws, element formulations and solution methods for structures undergoing inelastic deformations
- Conduct nonlinear static and dynamic analyses of complete structures
- Apply a nonlinear finite element software for seismic modelling and analysis
- Interpret output and estimate achievable simulation accuracy

Inhalt

- Expressing the nonlinear static and dynamic problem for single-degree-of-freedom and multiple-degree-of-freedom systems.
- Solution Methods in Nonlinear Static Analysis: Newton-Raphson methods, incremental-iterative procedures with variable loading parameter.
- Modelling of different components in buildings and bridges: columns, beams, walls, foundations, slabs, and bearings.
- Uniaxial and multi-axial material models for concrete, steel and masonry for modelling plasticity and damage under cyclic loading.
- Total and incremental compatibility and equilibrium relations in beams, accounting for large displacements (corotational formulation).
- Differential equations for Euler-Bernoulli and Timoshenko beams. Sectional analysis of RC sections.
- Beam formulations „with concentrated and distributed plasticity approaches (force-based and displacement-based).
- Localization issues and regularization techniques.
- Overview on other modelling approaches for structures (membranes, shell and macro-elements)
- Energy dissipation and damping models.
- Nonlinear Static Analysis (pushover curves, Capacity Spectrum Method and N2 Method).
- Nonlinear Dynamic Analysis, focusing on methods for numerical time-domain integration.
- Review of past blind prediction tests and comparison between numerical and experimental results.

3. SEMESTER- UND MASTERARBEITEN IM BEREICH BAUDYNAMIK UND ERDBEBENINGENIEURWESEN

Projektarbeiten sind ein integraler Teil des Bauingenieurstudiengangs an der EPFL. Den Studierenden steht dabei auch wieder ein Angebot an Projektarbeiten aus dem Bereich der Baudynamik und des Erdbebeningenieurwesens offen. Beispiele für Semesterarbeiten sind die Modelle, die in Abbildungen 2-6 gezeigt wurden und die allesamt als Teil einer Semesterarbeit entwickelt wurden. Neben der Entwicklung dieser Modelle für Demonstrationszwecke erlauben diese Semesterarbeiten auch den Studierenden Grundkenntnisse in den folgenden Themenbereichen zu erlangen:

- Signal Processing der Messresultate;
- Vergleich von analytischen Berechnungen oder finite Elementberechnungen mit experimentellen Untersuchungen, Diskussion der Unsicherheiten;
- Festigung der Programmierkenntnisse;
- Erste Erfahrungen mit experimentellen Arbeiten;
- Verständnis für Modellgesetze.

Für Masterprojekten bieten wir den Studierenden die Möglichkeit Praxis-nahe Projekte zu bearbeiten wie die Erdbebenbemessung eines neuen oder die Erdbebenbeurteilung eines bestehenden Gebäudes oder motivieren sie, an laufenden Forschungsprojekten mitzuarbeiten. Dazu gliedern wir Teilprojekte aus, die sich in der beschränkten Zeit bearbeiten lassen.

4. WEITERBILDUNG IM BEREICH BAUDYNAMIK UND ERDBEBENINGENIEURWESEN

Es ist unser Ziel den Studierenden zu vermitteln, dass insbesondere das Erdbebeningenieurwesen ein recht junges Teilgebiet des Bauingenieurwesens ist, welches sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch stark weiterentwickeln wird. Wenn das Erdbebeningenieurwesen ein Haupttätigkeitsfeld wird, ist es daher unabdingbar, sich mit Fortbildungskursen auch nach dem Masterabschluss in diesem Themenbereich weiterzubilden. Dies kann zum Beispiel im Rahmen eines Doktorates geschehen, während dessen auch die Vorlesung „Advanced earthquake engineering“ besucht werden kann (<http://edu.epfl.ch/coursebook/en/advanced-earthquake-engineering-CIVIL-706> , Pierino Lestuzzi).

Für in der Praxis tätige Ingenieure bieten die Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (www.sgeb.ch) und andere Anbieter regelmässig entsprechende Kurse an. Momentan läuft eine Kursreihe zur Erdbebenbeurteilung von Natursteinmauerwerksgebäuden („Basler Erdbebenkurse“ http://eesd.epfl.ch/continuing_education); für das nächste Jahr sind Kurse zur Einführung der neuen Norm SIA 269/8 „Erhaltung von Tragwerken - Erdbeben“ geplant. Darüber hinaus kann an verschiedenen Fachhochschulen ein Certificate of Advanced Studies in Erdbebeningenieurwesen erworben werden.

5. SCHLUSSBEMERKUNG

Dieser Artikel fasst die Zielsetzung und die Inhalte der Lehrveranstaltungen, die im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen an der EPFL angeboten werden, zusammen. Er soll damit einen Beitrag zur Diskussion um die Anforderungen an die Lehre in diesem Bereich dienen und einen Austausch über Lehrmethoden und Anregungen zu Modellen für die Illustrierung von Phänomenen in Lehrveranstaltungen erlauben. Der Lehrplan an der EPFL ist nicht statisch sondern wird regelmässig angepasst. Die hier vorgestellten Vorlesungen fassen daher den Status-quo zusammen.

VERDANKUNGEN

Allen Studierenden, die die verschiedenen Demonstrationsmodelle entwickelt haben, wird herzlich gedankt.

LITERATUR

- [1] MathWorks, "Matlab." 2015.
- [2] Lestuzzi P., Smith I.F.C: Dynamique des structures. Bases et applications pour le génie civil. PPUR, Lausanne, 2017.
- [3] SeismoSoft, "SeismoStruct - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures," [online] Available from URL: <http://www.seissoft.com>, 2003.