

„Parameterstudien für Bauwerke  
unter dynamischen Beanspruchungen  
unter Berücksichtigung unterschiedlicher Duktilitätsklassen  
nach Eurocode 8, Teil 5 und 6  
am Beispiel eines Dreimassenschwingers“

## Master-Thesis

von

Benny Nibbrig, B.Eng.

Matr.-Nr. 3025598

Universität Duisburg-Essen

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Abteilung Bauwissenschaften

Fachgebiet Baustatik und Baukonstruktion

Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Menkenhagen

Zweitprüfer: M.Sc. Klaus Rabenseifner

Betreuer: Dipl.-Ing. Arndt Meurs (MTM-Ingenieure)

Düsseldorf, 07. November 2017

## Kurzfassung

Erdbebennachweise für Hochbauten werden nach Eurocode 8 größtenteils mittels kraftbasierter Verfahren geführt. Die traditionelle linear elastische Methode ist das Antwortspektrenverfahren. Nichtlineare Tragreserven werden hier pauschal über die Abminderung des elastischen Antwortspektrums mit dem Verhaltensbeiwert berücksichtigt. Neben den Standardverfahren gibt es noch zwei nichtlineare Berechnungsmethoden – die verformungsbasierte Kapazitätsspektrum-Methode (Pushover) und die nichtlineare dynamische Zeitverlaufsberechnung. Ziel dieser Masterthesis ist die Erläuterung von Möglichkeiten zur effektiveren Ausnutzung von Tragwerken unter Erdbebeneinwirkungen. Dazu werden nichtlineare Berechnungsmethoden vorgestellt und eine Einordnung in die Duktilitätsklassen vorgenommen. Außerdem werden die erforderlichen Nachweise und konstruktiven Maßnahmen bei der Einordnung von biegesteifen Stahl- und Stahlbetonrahmen in die unterschiedlichen Duktilitätsklassen nach Eurocode 8 beschrieben.

## Abstract

Earthquake resistant design for structures is usually carried out according to Eurocode 8 based on force-based methods. The most common method is the response spectrum analysis. The nonlinear behavior of the structural members is taken into account by the use of a global behavior factor. In addition to these common methods two different approaches of the internal forces can be used: the performance-based capacity method (pushover analysis) and the time-history-analysis. The aim of this master thesis is the explanation of possibilities to gain a maximum utilization of structures under earthquake loading. Therefore non-linear methods are introduced and the calculated ductility factor will be classified. The required verifications and constructive procedures regarding the classification of rigid steel and concrete frames in the different ductility classes according to Eurocode 8 will be described.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Begriffe .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Seismologische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Arten von Erdbeben .....	3
2.2 Charakterisierung von Erdbeben.....	5
2.2.1 Magnituden .....	6
2.2.2 Standortbezogene Parameter .....	8
2.3 Erdbebenwellen .....	11
2.4 Registrierung von Erdbeben.....	13
<b>3. Grundlagen der Baudynamik und Erdbebenbeanspruchung .....</b>	<b>14</b>
3.1 Einmassenschwinger .....	14
3.2 Mehrmassenschwinger .....	17
3.2.1 Herleitung der Elementsteifigkeitsmatrix $k$ .....	18
3.2.2 Aufstellen der Steifigkeitsmatrix $k$ und der Massenmatrix $m$ .....	22
3.2.3 Berechnung der Eigenfrequenzen und Periodendauern.....	24
3.2.4 Ermittlung der Eigenvektoren bzw. Eigenformen.....	26
3.2.5 Modalanalyse.....	29
3.3 Kontrolle der Handrechnung mit Sofistik.....	31
3.4 Antwortspektren .....	36
<b>4. Verfahren zur Ermittlung der Tragwerksbeanspruchung.....</b>	<b>41</b>
4.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren.....	42
4.2 Modales Antwortspektrenverfahren.....	45
4.2.1 Handrechnung.....	46
4.2.2 Berechnung mit Sofistik.....	51
4.3 Direkte Zeitintegration auf Basis künstlicher Beschleunigungs-Zeitverläufe .....	53

---

---

4.4	Vergleich der Ergebnisse.....	58
<b>5.</b>	<b>Einordnung biegesteifer Rahmen in die Duktilitätsklassen.....</b>	<b>59</b>
5.1	Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauteile .....	61
5.1.1	Auslegungskonzepte .....	61
5.1.2	Auslegung für DCL nach Eurocode 2.....	67
5.1.3	Auslegung für DCM nach Eurocode 8.....	69
5.1.4	Auslegung für DCH nach Eurocode 8 .....	77
5.2	Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten.....	83
5.2.1	Auslegungskonzepte und Verhaltensbeiwerte .....	83
5.2.2	Werkstoffe .....	84
5.2.3	Tragwerkstypen .....	85
5.2.4	Konzept a): Niedrig-dissipatives Tragwerksverhalten (DCL) .....	86
5.2.5	Konzept b): Dissipatives Tragwerksverhalten (DCM und DCH).....	87
<b>6.</b>	<b>Nichtlineare Berechnungsverfahren .....</b>	<b>93</b>
6.1	Kapazitätsspektrum-Methode .....	94
6.1.1	Modell- und Materialabbildung.....	98
6.1.2	Plastische Gelenke.....	101
6.1.3	Bauwerkskapazität (Pushover-Kurve).....	110
6.1.4	Elastisches Antwortspektrum.....	117
6.1.5	Kurventransformation .....	119
6.1.6	Nachweiskonzept .....	121
6.1.7	Ergebnisse der Pushover-Berechnung .....	126
6.1.8	Vergleich lineare/ nichtlineare Pushover-Berechnung.....	131
6.1.9	Fazit der Kapazitätsspektrum-Methode.....	133
6.2	Zeitverlaufsverfahren .....	136
6.2.1	Modell- und Materialabbildung.....	136
6.2.2	Generierung der Zeitverlaufsrechnung.....	140
6.2.3	Ergebnisse der Zeitverlaufsrechnung.....	143
6.3	Multimodales Antwortspektrenverfahren .....	148
6.4	Vergleich und Bewertung der Berechnungsergebnisse.....	151
<b>7.</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>153</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>156</b>

---

Inhaltsverzeichnis	V
<hr/>	
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>

---

## 7. Fazit

Erdbebennachweise werden in Deutschland nach Eurocode 8 hauptsächlich mittels kraftbasierter Verfahren, wie beispielsweise dem multimodalen Antwortspektrenverfahren, geführt. Dabei findet die Berücksichtigung der nichtlinearen Tragwerksreserven pauschal durch Abminderung des elastischen Antwortspektrums mit dem Verhaltensbeiwert  $q$  statt. Diese Annahme liegt allerdings in den meisten Fällen auf der konservativen Seite, sodass die tatsächlich vorhandenen Reserven des Bauwerks nicht vollumfänglich ausgenutzt oder realitätsnah abgebildet werden.

Hauptteil dieser Masterthesis ist die Erläuterung von Möglichkeiten hinsichtlich einer effektiveren Tragwerksausnutzung unter Erdbebenbeanspruchungen nach Eurocode 8. Dazu wurden zwei alternative nichtlineare Berechnungsmethoden vorgestellt – die Kapazitätsspektrum-Methode und die direkte Zeitintegration unter Verwendung eines Beschleunigungs-Zeit-Diagramms. Außerdem wurden die Nachweise und konstruktiven Maßnahmen bei der Einordnung von biegesteifen Rahmen aus Stahl und Stahlbeton in die unterschiedlichen Duktilitätsklassen DCL, DCM und DCH beschrieben.

Zunächst geht es im ersten Teil der Arbeit um die seismologischen und baulastdynamischen Grundlagen. Daraufhin wurden gängige Berechnungsmethoden nach Eurocode 8 – darunter das vereinfachte und multimodale Antwortspektrenverfahren sowie die direkte Zeitintegration unter Verwendung von künstlichen Beschleunigungs-Zeit-Verläufen – erläutert.

Anschließend erfolgt im mittleren Teil der Thesis die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Einordnung eines biegesteifen Rahmens aus Stahl und Stahlbeton in die unterschiedlichen Duktilitätsklassen DCL, DCM und DCH. Die Einstufung in die niedrigste Duktilitätsklasse (DCL) findet in den meisten Fällen statt und stellt keine weiteren Anforderungen im Vergleich zum EC 2 bzw. EC 3 dar. Sobald das Tragwerk auf höhere Duktilitätsklassen ausgelegt werden soll, kommen auf den Tragwerksplaner eine Vielzahl an Nachweisen und konstruktiven Bedingungen zu, die der Eurocode 8 zum Teil nicht eindeutig beschreibt.

Der letzte Abschnitt beinhaltet die Erläuterung der nichtlinearen Berechnungsmethoden am Beispiel eines dreistöckigen biegesteifen Rahmens aus Stahl. Zunächst wird die Kapazitätsspektrum-Methode erläutert. Das Verfahren stellt die Bauwerkskapazität, abgebil-

---

det durch eine nichtlineare Pushover-Kurve, den zu erwartenden seismischen Anforderungen, abgebildet durch ein inelastisches Antwortspektrum, graphisch gegenüber. Dazu werden beide Kurven in einem Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Diagramm dargestellt. Der Performance-Point (Schnittpunkt der beiden Kurven) gibt Auskunft über die im System zu erwartende maximale Beschleunigung und Verschiebung und liefert gleichzeitig den Nachweis der seismischen Standsicherheit. Abschließend wird die nichtlineare dynamische Zeitverlaufsberechnung mittels direkter Zeitintegration auf Basis eines Beschleunigungs-Zeit-Verlaufes durchgeführt.

Die Zeitverlaufsberechnung bringt aufgrund der Ermittlung der Bauwerksantwort für jeden Zeitschritt die genauesten Ergebnisse. Jedoch verursacht dies eine enorme Rechenzeit und extrem hohe Datenmengen. Selbst die Berechnung des einfachen Stockwerkrahmens belief sich auf mehrere Stunden. Dadurch ist das Verfahren bei komplexeren Systemen kaum praxistauglich und kann maximal als Referenzverfahren, welches das tatsächliche Verhalten am präzisesten erfasst, verwendet werden.

Bei der Kapazitätsspektrum-Methode kommt es zu einer deutlich geringeren Rechenzeit. Die Ergebnisse in den ausgewerteten Bereichen sind trotzdem ähnlich wie bei der Zeitverlaufsberechnung. Außerdem kann mit der Pushover-Berechnung die Duktilität des Tragwerks und damit die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Querschnittswahl des Gebäudes beurteilt werden. Zwar sind die Ergebnisse der Berechnung mit dem multimodalen Antwortspektrenverfahren unter Abminderung des elastischen Antwortspektrums mit einem Verhaltensbeiwert von  $q = 1,5$  ebenfalls größentechnisch im Bereich der beiden nichtlinearen Methoden, jedoch beläuft sich hier die Erfassung der inelastischen Tragreserven lediglich auf einen Beiwert und nicht auf eine genauere Analyse des Systems.

Die Kapazitätsspektrum-Methode benötigt zugegebenermaßen ein höheres Fachwissen des Tragwerksplaners, kann jedoch in Zukunft durch einige relevante Vorteile, vor allem hinsichtlich einer effektiveren Ausnutzung des Gebäudes, als eine ernsthafte Alternative zu den traditionellen Methoden angesehen werden. Zwar ist das Verfahren in Deutschland kaum verbreitet. Es wird allerdings aus Ländern mit hoher seismischer Aktivität (z.B. USA) immer mehr übernommen.

In den Bearbeitungswochen der Masterthesis habe ich den Eurocode 8 „Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben“ umfangreich kennengelernt und allgemeine Grundlagen über Erdbeben und Erdbebenbemessungen erlangt. Außerdem konnte ich die Grund-

kenntnisse in Sofistik aus meinem Studium durch Generierung der Systeme und Eingabe der Pushover-Berechnung und der direkten Zeitintegration weiter vertiefen.

Ein großer Dank gilt dem Ingenieurbüro MTM-Ingenieure, die mich während der kompletten Zeit unterstützt und Arbeitsmaterialien zur Verfügung gestellt haben.

---