


# Nichtlineare dynamische Berechnung von Stahlbetonrahmen unter Erdbebeneinwirkung

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Wenk, Thomas 

**Publication date:**

2000

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004064477>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH Nr. 13740

# **Nichtlineare dynamische Berechnung von Stahlbetonrahmen unter Erdbebeneinwirkung**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
Thomas Gustav Wenk  
ing. civ. dipl. EPF, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
M. Sc., Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, USA  
geboren am 10. August 1951  
von Basel und Lampenberg BL

Angenommen auf Antrag von:  
Professor Dr. Hugo Bachmann, Referent  
Professor Dr. Edoardo Anderheggen, Korreferent

2000

## Kurzfassung

Bei der Erdbebenbemessung werden aus wirtschaftlichen Überlegungen für das relativ seltene Bemessungsbeben gewisse Schäden am Bauwerk in Kauf genommen. Die Bemessungsregeln der Normen berücksichtigen dies indirekt, indem sie eine pauschale Reduktion der Einwirkungen, für die sich bei elastischem Verhalten keine Schäden einstellen würden, zulassen. Die Bemessung erfolgt am linear-elastischen Tragwerk, dabei wird das entscheidende plastische Verformungsvermögen gewissermassen stillschweigend miteinbezogen. Sobald aber Grösse und Verteilung des erforderlichen Duktilitätsbedarfes genauer bestimmt werden sollen, sind nichtlineare dynamische Berechnungen erforderlich, da lineare Berechnungen nicht mehr zum Ziel führen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik aufgezeigt, wie das nichtlineare dynamische Verhalten von kapazitätsbemessenen Stahlbetonrahmen unter Erdbebeneinwirkung berechnet werden kann. Dazu wurden Stabelemente, die die wesentlichen Phänomene des sehr komplexen, nichtlinear-zyklischen Stahlbetonverhaltens erfassen, für die Modellierung der plastischen Bereiche in Riegeln und Stützen in der Form von sogenannten Userelementen entwickelt. Zusammen mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus bilden diese Userelemente das Programm Abaqus/Quake für nichtlineare dynamische Erdbebenberechnungen. Mit diesem Vorgehen konnte der eigene Entwicklungsaufwand auf die Programmierung von nichtlinearen Stabelementen begrenzt werden.

Die Formulierung der Userelemente wurde möglichst einfach gewählt, so dass die Beschreibung der Eingabedaten mit den üblichen Bemessungsgrössen eines Stahlbetonquerschnittes ohne Kalibrierung von zusätzlichen Parametern erfolgen kann. Das nichtlineare Verhalten wird auf das Biegeverhalten beschränkt, jedoch unter Berücksichtigung der zyklischen Steifigkeitsabminderung und der Verfestigung. Bei den Userelementen für die plastischen Bereiche in Stützen wird die Interaktion zwischen Normalkraft und mehrachsiger Biegung berücksichtigt, wobei eine lineare Normalkraftverformung angenommen wird. Der Einsatzbereich beschränkt sich auf kapazitätsbemessene Stahlbetontragwerke in Gebieten mit niedriger bis mittlerer Seismizität.

Zur Beurteilung der sehr umfangreichen Resultate von nichtlinearen Zeitverlaufsberechnungen wurden verschiedene Schädigungsmodelle und ihre zugehörigen Schädigungsindikatoren bewertet. Dabei stellte sich für die nichtlineare dynamische Berechnung von kapazitätsbemessenen Tragwerken der Duktilitätsbedarf in den plastischen Bereichen von Riegeln und Stützen als geeignetste Grösse heraus, da er auf einfache aber umfassende Art die Datenmenge auf eine Grösse reduziert, die leicht mit Versuchsergebnissen verglichen werden kann. Die Verwendung komplexerer Schädigungsindikatoren ist bei kapazitätsbemessenen Stahlbetonbauteilen nicht gerechtfertigt.

Die Anwendbarkeit der neu entwickelten numerischen Modelle wurde mit Nachrechnungen von mehreren Stahlbeton-Bauteilversuchen unter zyklisch-statischer Beanspruchung aufgezeigt. Ebenfalls nachgerechnet wurde ein dynamischer Versuch einer Stahlbetontragwand auf dem ETH-Erdbebensimulator. Es konnte jeweils eine sehr gute Überein-

stimmung zwischen Berechnung und Versuch erreicht werden.

Als Anwendungsbeispiele bei Gebäuden werden Berechnungen eines dreigeschossigen Stahlbetonrahmengebäudes vorgestellt. Das Tragwerk des Gebäudes wurde als ebener und als räumlicher Rahmen unter mehrachsiger Erdbebenanregung nach dem nichtlinearen Zeitverlaufsverfahren berechnet. Dabei wurden die neu entwickelten Userlemente für die numerische Modellierung der plastischen Bereiche im Stahlbetonrahmen verwendet. Der Vergleich der Resultate der ebenen mit der räumlichen Berechnung zeigte eine Überbeanspruchung in den Eckstützen des räumlichen Rahmens infolge ungünstiger Kombination von zweiachsiger Biegebeanspruchung mit Normalkraft; ein Phänomen, das üblicherweise bei der Erdbebenbemessung für niedrige bis mittlere Seismizität vernachlässigt wird.

Der mögliche Einsatzbereich des Programms umfasst die Berechnung von ganzen Tragwerken, sei es für die Kalibrierung von neuen Erdbebenbemessungsregeln oder für die Bemessung von besonders bedeutenden oder unregelmässigen Bauwerken, bei denen die einfachen Berechnungsmethoden für die Erdbebenbemessung nicht ausreichen.

## Abstract

For economic reasons, earthquake resistant design tolerates in general a certain level of structural damage for the rare seismic design event. The design rules include a global force reduction factor for the earthquake force the structure would experience by responding linear elastically to account for nonlinear material behavior. The design is performed for the reduced forces assuming linear elastic behavior but including tacitly an important plastic deformation capacity of the structure. To determine magnitude and distribution of the resulting ductility demand more precisely, linear calculations are inadequate and nonlinear dynamic analyzes are required.

In the present report, a methodology is developed to calculate the nonlinear dynamic behavior of capacity designed reinforced concrete frames under seismic action. Special beam elements were programmed which capture the dominating phenomenons of the complex nonlinear behavior of reinforced concrete under cyclic loads. These elements were implemented as so-called uselements in the finite element program Abaqus forming the program Abaqus/Quake for nonlinear dynamic earthquake analyzes. The uselements are used to model the plastic regions in beam and columns. For the elastically remaining parts of the structure, standard elements of the finite element program are used. This approach allowed to efficiently limit the new programming development effort to the nonlinear beam elements.

The formulation of the uselements was selected as simple as possible such that the input specification requires only the usual design parameter of reinforced concrete cross sections. There is no need to calibrate additional input parameters. The nonlinear behavior of the uselements is limited to bending including the effects of cyclic stiffness degradation and strain hardening. The uselements for the plastic regions in columns account for the interaction between normal force and multi-axial bending. The deformation behavior under normal force is assumed to remain elastic. The domain of applications of the newly developed uselements is restricted to capacity designed reinforced concrete structures in regions of low to medium seismicity.

Different damage models and damage indicators were evaluated with respect to their applicability for nonlinear dynamic analyses. For capacity designed structures, the ductility demand of the plastic regions in beams and columns turned out to be the most appropriate quantity to describe the damage. The ductility demand allows to reduce the enormous amount of data produced by an nonlinear dynamic analyses to one simple number which can easily be compared to the ductility capacity determined by experimental investigations. The use of more complex damage indicators is usually not justified for capacity designed structures. The influence of the cyclic damage remains relatively low due to special ductility enhancing structural detailing of capacity design. This is particularly true for areas of low to medium seismicity, where only a relatively small number of seismic loading cycles has to be expected.

Several experimental investigations of reinforced concrete specimens under cyclic static

loads were recalculated to show the applicability of the newly developed numerical models. In addition, a dynamic test of a structural wall on the ETH earthquake simulator was numerically reanalyzed. In all these examples, an excellent agreement between numerical and experimental results was obtained.

As an numerical example for a real building, a three-story reinforced concrete frame building was selected. The structure of the building was modelled as planar and as space frame using the newly developed uselements for the plastic regions in beams and columns. Two different designs of the frame structure were analyzed by the nonlinear time integration method under multi-axial seismic excitation. Comparing the results of the two-dimensional and the three-dimensional analyses an extremely high ductility demand was found at the foot of the corner columns in the three-dimensional analyses due to an unfavorable combination of multi-axial bending with normal force. Earthquake resistant design regulations for low to medium seismicity usually do not require to superimpose the stress resultants from multi-axial excitations.

The domain of application of the uselements comprises the nonlinear dynamic analysis of test assemblages or of complete frame structures. It can be used for calibrating new earthquake resistant design rules or for designing particularly important or non-regular buildings where the conventional design methods are not adequate.