

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Stempniewski, Lothar; Maltidis, Georgios

Erdbebenbeanspruchung für Verkehrswasserbauwerke

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101977>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Stempniewski, Lothar; Maltidis, Georgios (2012): Erdbebenbeanspruchung für Verkehrswasserbauwerke. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Eurocodes für den Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 65-71.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Erdbebenbeanspruchung für Verkehrswasserbauwerke

Prof. Dr.-Ing. L. Stempniewski (KIT)
Dipl.-Ing. G. Maltidis (BAW)

Die Analyse und Bemessung von Wasserbauwerken für seismische Belastungen sind aufgrund ihrer Komplexität (Boden-Flüssigkeit-Bauwerk Interaktion) weltweit ein großes Forschungsfeld. Die Einführung der Eurocodes und insbesondere des Eurocodes 8 ermöglicht die seismische Planung von vielen Bauwerkstypen. Derzeit existiert in der Europäischen Union jedoch keine Normung für die Bemessung von Wasserbauwerken. Eine seismische Planung kann über die Bestimmungen des Eurocodes 8 für ähnliche Konstruktionen durchgeführt werden.

Eurocode 8, der die Erdbebensicherheit von Bauwerken regelt, besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1 -Allgemeine Begriffe, Gebäude
- Teil 2 - Brücken
- Teil 3 - Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden
- Teil 4 - Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen
- Teil 5 - Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte
- Teil 6 - Türme, Maste und Schornsteine.

Wasserbauwerke sind in der Regel massive Strukturen von großer Bedeutung und hohem Gefährdungspotential. Aus diesem Grund wurden den seismischen Aktivitäten größere Wiederkehrperioden zugeteilt als im üblichen Hochbau. Basierend auf der Referenzwiederkehrperiode von DIN EN 1998 - Teil 1 ($T = 475a$) können die seismischen Einwirkungen mit hohen Wiederkehrperioden mit Hilfe des Bedeutungsbeiwertes γ bestimmt werden. Allerdings gibt eine Umrechnung der seismische Bodenbeschleunigung mit dem Bedeutungsbeiwert nur zufriedene Ergebnisse bis zu einer Größe der Wiederkehrperiode von etwa $T = 1400a$. Für größere Wiederkehrperioden, die oft Tal Sperre betreffen, sollten spezifische seismische Gefährdungskarten verwendet werden oder eigene Standortanalysen durchgeführt werden.

Die seismische Berechnung von Wasserbauwerken kann mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden; von stark vereinfachten Verfahren bis hin zu komplexen, die nur EDV-gestützt durchführbar sind und die, je nach den Fähigkeiten des verwendeten Programms, alle mit den Erdbebeneinwirkungen verbundenen Phänomene zufriedenstellend erfassen können. Die vereinfachten Methoden mit äquivalenten statischen Kräften sind eine praktische und einfache Möglichkeit, Wasserbauwerke zu analysieren. Diese eher ingenieurmäßigen Methoden, betrachten die Erdbebeneinwirkung aber nur sehr vereinfacht, erfassen keine Phänomene wie Torsion oder Boden Interaktion und können nur für eine vereinfachte zweidimensionale Analyse der Konstruktion angewandt werden. Die spektrale Methode mit einer Modalanalyse kann einige wichtige Informationen über

die Tragwerksplanung und Aufschluss über das dynamische Verhalten der Struktur geben. Sie erlauben es auch mit einigen Vereinfachungen einige der auftretenden Phänomene wie z.B. die Nachgiebigkeit des Bodens mit Federn oder zusätzliche hydrodynamische Drücke mit äquivalenten Massen zu modellieren. Die Zeitverlaufsanalysen geben die vermeintlich genaueste Aussagen über die Antwort der Struktur unter einer Erdbebenanregung. In Abhängigkeit von den Fähigkeiten des Programms, können viele Phänomene und Effekte mit ausreichender Genauigkeit modelliert werden. Der Nachteil ist, dass solche Analysen deutlich mehr theoretische und praktische Erfahrung sowie Rechenzeit benötigen und ihre Anwendung besonders qualifizierte Ingenieure erfordert, die auf dynamische Analysen unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) und FE-Programme spezialisiert sind. Für die meisten Planungsbüros sind auch solche FE-Programme meist unerschwinglich.

Schiffsschleusen: Schiffsschleusen sind entweder vollständig nur zu einer Seite vom Erdreich umgeben oder als freistehende Konstruktion gebaut. Wenn Schiffsschleusen von Boden umgeben sind, können sie als Stützmauern angesehen werden und die seismischen Einwirkungen treten nicht im großen Maß in der Form der freien Schwingung der Struktur ein sondern als Belastung des Bauwerkes in der Form des zusätzlichen Erddruckes. Eurocode 8 Teil 5 Anhang E enthält Richtlinien für die seismische Belastung von Stützwänden. Das Verfahren der äquivalente statische Kraft basiert auf der Methode von Mononobe & Okabe, wobei die bekannten Beziehungen von Coulomb geringfügig ergänzt wurden, um die Trägheitskraft des stützenden Bodens zu erfassen. Die Beziehungen umfassen die Fälle vom trockenen und ungesättigten, undurchlässigen und hochdurchlässigen Boden. Im Fall von hochdurchlässigen Böden, können die hydrodynamischen Drücke mit den Formeln von Westergaard berechnet werden. In Eurocode 8 Teil 5 Anhang E sind diese Beziehungen zur Berechnung des bodendynamischen Druckes für verschiebbliche und unverschiebbliche Wände zu finden. Dies deckt die beiden Extremfälle des Verschiebungsverhaltens einer vom Boden umgebenen Wand unter seismischer Belastung ab. In der Realität werden Schiffsschleusen einem dynamischen Verhalten zwischen den beiden Extremfällen folgen. Einerseits sind die Bauwerke sehr massiv und oft von Boden umgeben, sodass sich kaum relative Verschiebungen zwischen der Wand und dem Boden entwickeln, andererseits sind die Wände flexibel und rotationsfähig. Weil im Eurocode 8 keine Alternative aufgeführt wird, sollten die bodendynamischen Drucke nach den Ansätzen für starre Wände gerechnet werden. Eine solche Betrachtung ist nicht nur auf der sicheren Seite, sondern bildet die Realität auch viel näher ab (unterirdisch Bauwerk und Wände mit großer Steifigkeit und geringer Rotationsfähigkeit). Wenn noch genauere Analysen durchgeführt werden sollen, kann auf die Ansätze von Veletsos and Younan (1996) für flexible und rotationsfähige Wände zurückzugreifen werden.

Die hydrodynamischen Drücke für Schiffsschleusen sind aufgrund der hohen Steifigkeit der Wände im Vergleich zu anderen Strukturen, z.B. Tankbauwerke, vernachlässigbar. Sie lassen sich aber nach den Beziehungen des Anhangs A4 des EC8 – Teil 4, für starre rechteckige Tankbauwerke berechnen. Mit deren Verwendung kann die Berechnung der äquivalenten Massen und Federn, die dem Massenanteil und der Wellenbewegung der Flüssigkeit entsprechen, ermitteln. Die Schwin-

gungsdämpfung des Wassers weist nur einen geringen Effekt ($< 0,5\%$) auf. Die hydrodynamischen Drücke können für die Nachweise der Tore von Schiffsschleusen maßgebend werden, insbesondere dann, wenn es um den Fall geht, dass die Kammer geflutet ist, die Tore geschlossen sind und seismische Einwirkungen nahezu waagrecht auf die Tore wirken. Ein solcher Fall ist jedoch von sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit.

Die Interaktion zwischen Boden, Wasser und Bauwerk kann auch indirekt durch eine äquivalente Eigenperiode und Dämpfung der Struktur berechnet werden, um die neuen Trägheitskräfte vom Bemessungsspektrum zu erhalten. Die Boden-Bauwerk Interaktion ist vom Grad des Einbaus des Bauwerks im Boden, so wie die Abmessungen des Bauwerks abhängig. Diese Eigenschaften definieren die Torsions- und Translationssteifigkeit des Bauwerks.

Brücken: Eurocode 8 gibt im Teil 2 Regeln für die seismische Planung von Brücken. Obwohl Brücken nicht zu den Wasserbauwerken gehören, kreuzen sie die Wasserstraßen und ihre Pfeiler stehen oft innerhalb der Wasserstraßen. Der Bauingenieur muss hinsichtlich der Tragfähigkeit und Wirtschaftlichkeit das beste und geeignetste statische System finden, das sowohl die statischen als auch die seismischen Einwirkungen aufnehmen kann. Ein Tragwerk, bei dem der Brückenüberbau monolithisch mit den Pfeilern verbunden ist, hat die Vorteile, dass die Momente ausgeglichen verteilt werden durch die Rahmen, - und die Durchlaufwirkung (statisch unbestimmte Systeme) und dass durch die monolithische Verbindung der Pfeiler an den Überbau letzterer nicht während einer seismischen Anregung von seinen Auflagern rutschen kann. Auf der anderen Seite, ist eine solche Konstruktion empfindlich auf differentielle Setzungen der Pfeiler. Zudem können tektonische Bewegungen zu zerstörerischen Folgen für den Überbau führen. Die Tatsache, dass die Momente infolge einer seismischen Belastung wegen des monolithischen Anschlusses des Brückenüberbaus mit den Pfeilern auch im Überbau auftreten, führt zu größeren und damit unwirtschaftlicheren Querschnitten des Überbaus. Ein Brückenüberbau, der aus vorgefertigten und in der Regel vorgespannten Balken besteht, hat die folgenden Vorteile: Vorfertigung der Konstruktionselemente, schnelle Bauzeit und besseres Aufnehmen von Setzungen der Pfeiler. Der Überbau von Balkenbrücken wird in der Regel auf Elastomerlagern, die als seismische Isolierung für den Brückenüberbau funktionieren, gelagert. Die Nachteile dieses Systems sind die großen Biegemomente in Feldmitte, die Absturzgefahr des Überbaus während der seismischen Anregung, und die asynchrone dynamische Antwort und Interaktion zwischen den Teilen. Ein Brückenüberbau als Gerberträger, bietet zwar die beste Verteilung der Momente, dafür besteht aber die Gefahr, dass der Überbau während eines Erdbebens wegen der geringen Auflagerbreiten von den Lagern geschoben wird. Die Gründung sollte in Zusammenarbeit einem Spezialisten des Fachgebiets Bodenmechanik ausgewählt werden. Die Wahl wird weitgehend durch die Bodeneigenschaften bestimmt.

Die seismische Planung betrifft hauptsächlich die Kapazitätsbemessung der Stützen und die Berechnung einer ausreichenden Auflagerbreite des Überbaus, wenn er nicht monolithisch mit den Widerlagern oder mit den Pfeilern verbunden ist. Im Allgemeinen wird eine elastoplastische Be-

messung der Querschnitte durchgeführt. Spröde Versagensarten werden generell verboten. Fließgelenke dürfen nur an den Pfeilern und auch an Stellen mit geringer nominierter Druckkraft zur Sicherstellung eines duktilen Verhaltens entstehen. Der Brückenüberbau sollte möglichst im elastischen Bereich bleiben. Es ist nicht erforderlich, dass sich Fließgelenke an allen Stützen auszubilden, aber, dass das optimale Verhalten des Bauwerkes erreicht wird, wenn plastische Gelenke gleichzeitig an so vielen Stützen wie möglich entwickeln. Außerdem, sollten Fließgelenke nur an Stellen auftreten, die zugänglich für Inspektion und Reparatur sind. Wenn der Brückeüberbau auf den Pfeilern oder auf den Widerlagern mit Elastomerlagern gelagert ist, sollten die Pfeiler und die Widerlager im elastischen Bereich bleiben.

Die elastoplastische Bemessung erfordert die Verwendung des Verhaltensbeiwerts. Die Werte des Verhaltensbeiwerts sind in Tabelle 4.1 (EC8-2) zu finden, Die Wahl des Werts kann aber erst getroffen werden, wenn sichergestellt ist, dass die ausgewählten Stellen für die Fließgelenkentwicklung zugänglich für Inspektion und Reparatur sind. Der Verhaltensbeiwert ist mit Einschränkungen anzuwenden: für nominierter Druckkraft zwischen 0,3 und 0,6 sollte ein reduzierter Wert (EC8-2, Beziehung 4.2) für den Verhaltensbeiwert verwendet werden. Für fest und starr mit dem Boden verbundene Elemente, wie die Widerlager sind, ist der Verhaltensbeiwert gleich 1,0. Für die vertikale Richtung gilt ebenso ein Wert von $q=1,0$.

Für Brücken mit Elastomerlagern werden die Gesamtsteifigkeit und die globalen Verschiebungen des Systems durch Überlagerung mit denen der Stützen und des Elastomerlagers berechnet. Die Beziehungen für die Steifigkeiten von Querschnitten und Elastomerlagern werden in Anhang C und J der Eurocode angegeben. Die Berechnung der Steifigkeit eines Elastomerlagers berücksichtigt die reduzierte Auflagerbreite des Auflagers während der seismischen Anregung. Effekte zweiter Ordnung können durch die Verwendung von vereinfachten Beziehungen getroffen werden (EC8-2, §5.4).

Die Kapazitätsbemessung zielt darauf ab:

- ein duktilen Verhalten des Bauwerks;
- die hierarchische Bemessung der Stärke der Elemente, damit sich die Fließgelenke an den geplanten Stellen entwickeln können;
- die Vermeidung von spröden Versagen um damit schlagartigen Versagen sicherzustellen.

Die Bemessungsvorgehensweise besteht aus drei Schritten (EC8-2, Anhang G):

Schritt 1: Berechnung der Bemessungs-Biegefestigkeiten $M_{Rd,h}$ der Querschnitte der beabsichtigten plastischen Gelenke, entsprechend der betrachteten horizontalen Richtung der seismischen Einwirkung (A_E) mit dem entsprechenden Vorzeichen (+ oder -). Die Festigkeiten müssen auf den

tatsächlichen Abmessungen der Querschnitte und dem endgültigen Ausmaß der Längsbewehrung basieren. Die Berechnung muss die Interaktion mit der Normalkraft und möglicherweise dem Biegemoment in der Querrichtung berücksichtigen, die beide aus der Berechnung in der Erdbeben-Bemessungssituation resultieren.

Schritt 2: Berechnung der Änderung der Zustandsgrößen ΔA_c des plastischen Mechanismus, entsprechend der Erhöhung der Momente der plastischen Gelenke (ΔM_h), aus (a) den Werten aufgrund der ständigen Einwirkungen ($M_{G,h}$) und (b) den Überfestigkeitsmomenten der Querschnitte. Die Zustandsgrößen ΔA_c dürfen in der Regel aus den Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden, während angemessene Näherungen bezüglich der Kompatibilität der Verformungen akzeptabel sind.

Schritt 3: Die endgültigen Zustandsgrößen der Kapazitätsbemessung A_c müssen durch Überlagerung der Änderung ΔA_c mit der ständigen Einwirkung A_G bestimmt werden:

$$A_c = A_G + \Delta A_c$$

Wenn das Biegemoment infolge von ständigen Einwirkungen an dem plastischen Gelenk vernachlässigbar gegenüber der Biegemomentüberfestigkeit des Querschnitts ist ($M_{G,h} \ll \gamma_o \cdot M_{Rd,h}$), darf eine direkte Schätzung der Schnittkräfte ΔA_c aus der Erdbeben-Bemessungseinwirkung AE ermittelt werden. Dies ist üblicherweise in Querrichtung des Pfeilers der Fall, oder in beiden Richtungen wenn die Pfeiler gelenkig mit dem Überbau verbunden sind (G.2 - Vereinfachte Annahmen).

An Auflagern, wo unter seismischen Bedingungen relative Verschiebungen zwischen gestützten und stützenden Bauteilen beabsichtigt sind, muss eine Mindestüberlappungslänge vorgesehen werden. Die Überlappungslänge muss so gewählt werden, dass die Funktion des Lagers unter extremen seismischen Verschiebungen sichergestellt ist. An einem Endauflager (am Widerlager) kann die Mindestüberlappungslänge l_{ov} als die Summe der folgenden Größen angenommen werden: $l_{ov} = l_m + d_{eg} + d_{es}$ (6.12), wo:

- l_m die Mindestlänge des Lagers zur Sicherstellung der sicheren Übertragung der vertikalen Auflagerkraft, jedoch nicht kleiner als 400 mm;
- d_{eg} die effektive Verschiebung der beiden Teile infolge der räumlichen Veränderlichkeit der seismischen Bodenbewegungen (6.13);
- d_{es} die effektive seismische Verschiebung des Auflagers infolge der Bauwerksverformung (6.15a-b).

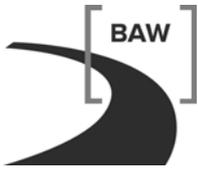
Die Bemessungsverschiebung d_g , die für die Berechnung der Größe d_{eg} erforderlich ist lässt sich nach EN 1998-1:2004, 3.2.2.4 berechnen. Der Abstandparameter L_g wird im Nationalen Anhang gegeben. Die gesamte effektive Masse in einer Horizontalen Richtung eines im Wasser stehenden Pfeilers sollte die Summe der folgenden Anteile sein:

- Die tatsächliche Masse des Pfeilers;
- Die möglicherweise im Pfeiler eingeschlossene Wassermasse;
- Die zusätzliche Masse m_a von dem mitbewegten Wasser je Längeneinheit des im Wasser stehenden Pfeilers (Anhang F).

Kanalbrücken: Kanalbrücken sind ein Sonderfall der Brückenbemessung. Sie sind mit Wasser gefüllte Trogbauwerke, in denen Schiffe überfahren können. Die Wassermasse verursacht zusätzliche hydrodynamische Drücke und beeinflusst somit das Schwingungsverhalten der Brücke. Die Bemessung für die Erdbebenbeanspruchung sollte die Regeln für Hochbehälter (EC8- 4, Anhang A.6) und Brücken gleichzeitig (EC8-2) berücksichtigen. Das Wasservolumen teilt sich hier ebenso in einen impulsiven und einen konvektiven Anteil, wie es für normale Tankbauwerke festgelegt wurde, die mit äquivalenten Massen modelliert werden können.

Talsperren: Die Eurocodes verfügen über keine Auslegungen für die Erdbebenbemessung von Talsperren. Weltweit erfolgt die seismische Analyse von Talsperren Richtlinien, die von den jeweils zuständigen Behörden erfasst wurden. In Deutschland wurde dafür die DIN 19700 Normen-Serie eingeführt, die auch die Erdbebenbeanspruchung der Talsperren umfasst. Die wichtigsten Punkte der DIN 19700-10/-11 werden hier zusammengefasst.

Die Talsperren werden in zwei Klassen nach ihrer Höhe und Stauraum kategorisiert; die Klasse 1 betrifft die Talsperren die höher als 15m sind oder einen Stauraum mehr als 10^6m^3 verfügen; die restlichen Talsperren gehören zu der Klasse 2. Das Bemessungserdbeben ergibt sich aus einer Wiederkehrperiode $T=2500a$ für die Klasse 1 und aus einer Wiederkehrperiode $T=1000a$ für Klasse 2. Das Betriebserdbeben ergibt sich für $T=500a$ für die Klasse 1 und für $T=100a$ für die Klasse 2. Die entsprechenden Referenzwerte der Bodenspitzenbeschleunigung können entweder den Erdbebengefährdungskarten von Geoforschung Zentrum Potsdam (Grünthal) entnommen oder durch seismische Gutachten bestimmt werden. Nach DIN 19700-10 kann auf den Erdbebennachweis verzichtet werden, wenn der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung kleiner als 4% der Erdbeschleunigung ist (d.h. $<0,39\text{ m/s}^2$). DIN 19700-11 erlaubt es, ein vereinfachtes Verfahren für die Erdbebeneinwirkung mit quasi-statischen Ersatzlasten zu führen, die mit dem 1,0-fachen Wert der Bodenbeschleunigung ermittelt werden dürfen. Dies gilt auch für Absperrbauwerke von Talsperren der Klasse 1 bis 40m Höhe, wobei bei Staumauern mit dem 2,5-fachen Wert der Bodenbeschleunigung zu rechnen ist. Bei höheren Absperrbauwerken ist eine Untersuchung des Tragwerkes mittels dynamischer Berechnungsmodelle erforderlich.



Literatur

- EN 1998-1:2004 + AC:2009, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009.
- DIN EN 1998-2:2005 + A1:2009 + AC:2010, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 2: Brücken; Deutsche Fassung EN 1998-2:2005 + A1:2009 + AC:2010.
- DIN EN 1998-4:2007, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Deutsche Fassung EN 1998-4:2006.
- DIN EN 1998-5:2004; Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; Deutsche Fassung EN 1998-5:2004.
- DIN 19700-10:2004, Stauanlagen. Teil 10: Gemeinsame Festlegungen.
- DIN 19700-11:2004, Stauanlagen. Teil 11: Talsperren.