

Gutachten zur Eignung des Erdbeben-Randeffassungs-Bügel systems FISEISMA für duktil es Tragwerksverhalten

1. Ausgangslage

Die Fischer Rista AG in Reinach, Aargau, entwickelte das vofabrizierte Bügel system FISEISMA zur Umschnürung der Längsbewehrung in Randelementen von Stahlbetontragwänden und in Stahlbetonstützen, die für duktil es Tragwerksverhalten bezüglich Erdbeben bemessen werden.

Im vorliegenden Gutachten wird aufgezeigt, dass das Bügel system FISEISMA die Anforderungen gemäss Ziffern 4.3.9, 5.5.4 und 5.7 der Norm SIA 262:2013 „Betonbauten“ für duktil es Tragwerksverhalten erfüllt, falls es entsprechend der Anwendungsdokumentation der Fischer Rista AG eingesetzt wird.

2. Duktil es Tragwerksverhalten

Die Bemessungsmethode des duktil en Tragwerksverhaltens gemäss Norm SIA 262:2013 ist für Erdbebenbeanspruchung von Stahlbetontragwerken besonders gut geeignet. Diese Methode folgt den Regeln der Kapazitätsbemessung und stellt im wesentlichen sicher, dass die plastischen Bereiche – entsprechend dem gewählten geeigneten plastischen Mechanismus – dank duktil itätsfördernder konstruktiven Gestaltung ein grosses Verformungsvermögen unter zyklisch-plastischer Beanspruchung erreichen. Alle übrigen Bereiche des Tragwerks, d.h. alle Bereiche ausserhalb der plastischen Bereiche, werden vor einem vorzeitigen spröden Versagen geschützt, indem sie für diejenigen Schnittkräfte bemessen werden, die sich im Tragwerk unter Erdbebeneinwirkung einstellen, wenn die plastischen Bereiche die Grenzverformungen bei Überfestigkeit erreichen.

Im Gegensatz zum duktil en Tragwerksverhalten wird die konventionelle Bemessungsmethode – wie für die Bemessung bezüglich Schwerelasten oder Wind üblich – in der Norm SIA 262:2013 im Zusammenhang mit der Erdbebenbemessung von Stahlbetontragwerken nicht-duktil es Tragwerksverhalten genannt. Dabei ist zu beachten, dass auch ein gemäss nicht-duktil em Tragwerksverhalten bemessenes Tragwerk eine geringfügige Duktil ität aufweist, die jedoch wesentlich kleiner ist als bei einer Bemessung gemäss duktil em Tragwerksverhalten. Mit Duktil ität wird das auf den elastischen Anteil des Verformungsvermögen bezogene gesamte Verformungsvermögen bezeichnet. Je grösser die Duktil ität, desto grösser ist der plastische Anteil am gesamten Verformungsvermögen.¹

Das plastische Verformungsvermögen und die Überfestigkeit eines Bauteils wird in der Erdbebenbemessung mittels des Verhaltensbeiwerts q berücksichtigt. Je grösser der Verhaltensbeiwert, desto kleiner werden die Auswirkungen infolge eines gegebenen Bemessungsbebens. Für duktil es Tragwerksverhalten liegt q im Bereich von 3,0 bis 4,0 in Abhängigkeit der Duktil itätsklasse des Betonstahls, während für nicht-duktil es Tragwerksverhalten nur ein kleinerer Verhaltensbeiwert q im Bereich von 1,5 bis 2,0 angesetzt werden darf.

Ein typischer Versagensmechanismen eines konventionell bemessenen Stahlbetonbauteils unter zyklisch-plastischer Beanspruchung ist das Ausknicken der Längsbewehrung in der Biegedruckzone gefolgt vom Reißen der ausgeknickten Längsbewehrung im anschliessenden Beanspruchungszyklus unter Biegezug (Bild 1, links).

¹ Wenk T. 2011: Erdbebensicherung von Bauwerken I - Folienkopien, E-Collection, ETH Zürich

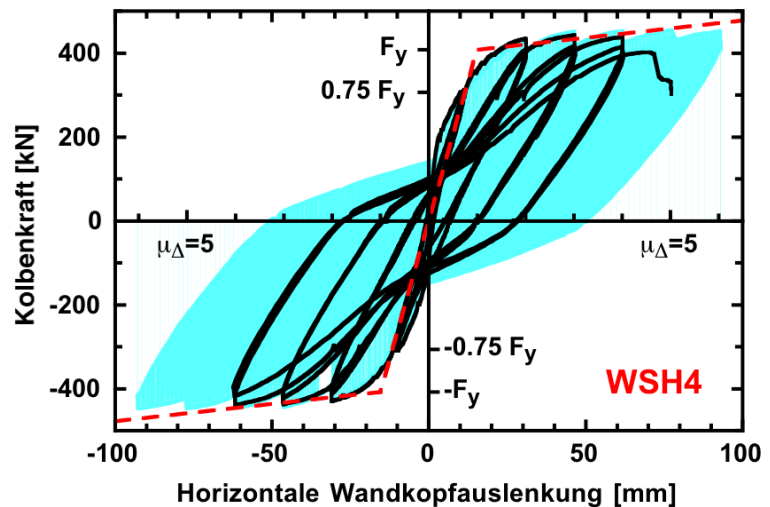


Bild 1: Ausknicken der Längsbewehrung zwischen Randbügeln im Abstand von $12 \varnothing_{sl}$ der Stahlbetontragwand WSH4 (links) und Vergleich der Horizontalkraft-Horizontalverschiebungs-Hysterese-kurven der Stahlbetontragwand WSH4 mit der Stahlbetontragwand WSH3 mit Randbügeln im halben Abstand von $6 \varnothing_{sl}$ (grün hinterlegt, rechts)²

Wird der Bügelabstand von $12 \varnothing_{sl}$ auf $6 \varnothing_{sl}$ halbiert, so erhält man ein wesentlich duktileres Verhalten mit fast dem doppelten gesamten horizontalen Verschiebungsvermögen, wie ein Vergleich der Horizontalkraft-Horizontalverschiebungs-Hysterese-kurven der Stahlbetontragwand WSH4 (schwarze Linie in Bild 1, rechts) mit der Stahlbetontragwand WSH3 (grün hinterlegt in Bild 1, rechts). Dabei bezeichnet \varnothing_{sl} den Durchmesser der Längsbewehrung. Zusätzlich garantiert der engere Bügelabstand in der Stahlbetontragwand WSH3 eine grössere Betondruckstauchung dank der wirksameren Umschnürung der Betondruckzone in den Randelementen.

Die üblichen Norm-Anforderungen bezüglich minimalem Bügelabstand für Druckglieder genügen offensichtlich nicht, um ein duktileres Verhalten sicherzustellen. Deshalb schreibt die Norm SIA 262:2013 für duktileres Tragwerksverhalten einen sehr engen Bügelabstand von maximal $6 \varnothing_{sl}$ in den Randelementen von Stahlbetontragwänden und in Stahlbetonstützen vor.

3. Eigenschaften des Erdbeben-Randeffassungs-Bügel-systems FISEISMA

Das neu entwickelte, vorfabrizierte Bügel-system FISEISMA³ der Fischer Rista AG erlaubt eine rationelle und präzise Umsetzung der erforderlichen engen Verbügelung in den Randelementen von Stahlbetontragwänden. Das Bügel-system FISEISMA umfasst eine Serie von rechteckigen Bügel-körben mit unterschiedlichen geometrischen Massen (Bild 2). Die einzelnen Bügel in den Bügel-körben sind aus Betonstahl B geformt und mit zwei erdbebengerechten 135° -Endhaken versehen. Der Bügelabstand beträgt 100 mm oder 150 mm. Die Bügel sind auf zwei relativ dünnen Montage-stäben aus einem speziell wärmebehandelten Stahl mit niedriger Fließgrenze fixiert. Die Länge der Bügelkörbe deckt normale Stockwerkhöhen ab.

² Dazio A., Wenk T., Bachmann H. 1999: Versuche an Stahlbetontragwänden unter zyklisch-statischer Einwirkung. IBK-Bericht Nr. 239, Birkhäuser Verlag, Basel.



Bild 2: BÜGELSYSTEM FISEISMA ZUR UMSCHNÜRUNG DER RANDELEMENTE VON STAHLBETONTRAGWÄNDEN³

Um den Anforderungen für duktilen Tragwerksverhalten zu genügen, weisen die FISEISMA-Bügelkörbe folgende Eigenschaften auf:

- Der Bügelabstand beträgt $s = 100 \text{ mm}$ oder $s = 150 \text{ mm}$. Damit können Längsstäbe ab einem Durchmesser von 18 mm bzw. 26 mm umschnürt werden, so dass die Bedingung $s \leq 6 \cdot \varnothing_{sl}$ eingehalten wird.
- Der Durchmesser der Bügel beträgt $\varnothing_{Bügel} = 8 \text{ mm}$, 10 mm oder 12 mm , so dass die Bedingung $\varnothing_{Bügel} \geq 0,35 \cdot \varnothing_{sl,max}$ für Längsstäbe ab 18 mm , 26 mm bzw. 34 mm eingehalten wird.
- Die Länge der Bügel ist so gewählt, dass neben den 4 Längsstäben in den Bügelecken je ein Längsstab in die Mitte des längeren Bügelschenkel gestellt werden kann, ohne dass ein zusätzlicher Querhaken gemäss Ziffer 5.7.1.4 der Norm SIA 262:2013 erforderlich wird. Bei Längsstäben mit $\varnothing_{sl} \geq 18 \text{ mm}$ überschreitet dann der Abstand zwischen den seitlich gehaltenen Längsstäben in den Bügelecken den maximalen Abstand von 200 mm nicht.
- Die Ober- und Untergrenzen für den Längsbewehrungsgehalt der Randelemente sind für die in der FISEISMA-Dokumentation³ erwähnten Anwendungsbeispiele eingehalten.
- Als Stahlqualität der Bügel wird Betonstahl B verwendet. Dies genügt auch für einen Verhaltensbeiwert $q = 4,0$, falls für die Längsbewehrung in den plastischen Bereichen ausschliesslich Betonstahl C verwendet wird. Zwar unterscheidet Ziffer 4.3.9.3.5 bei den Anforderungen an die Betonstähle nicht zwischen Längsbewehrung und Bügel. Da das erforderliche hohe plastische Verformungsvermögen und die hohe Verfestigung der Betonstähle bei einem Verhaltensbeiwert $q = 4,0$ für die Längsbewehrung begründet sind, genügt für die Bügel der Betonstahl B.
- Die beiden relativ dünnen Montagestäbe sind so ausgelegt, dass ihre Fließkraft maximal 3% der Fließkraft aller umfassten Längsstäbe erreicht. In Anbetracht der Toleranzen bei den Längsstäben bleibt somit der Einfluss der Montagestäbe auf den plastischen Bereich vernachlässigbar. Insbesondere können die Enden der beiden Montagestäbe am Wandfuss das Ansteigen der Plastifizierungen vom ersten Riss am Wandfuss in die Stahlbetontragwand hinein weder verzögern noch verhindern, so dass die Entstehung eines ungünstigen, wenig duktilen Ein-Riss-Gelenks am Wandfuss ausgeschlossen werden kann.⁴ Die kleine Fließkraft der Montagestäbe wurde durch eine Optimierung von deren Durchmesser und Stahlqualität erreicht.

³ Fischer Rista AG 2015: Dokumentation FISEISMA Erdbeben-Bügelssystem

⁴ Bachmann H., Wenk T.: Ungenügende Duktilität beim Bewehrungsstahl, Schweizer Ingenieur und Architekt No. 29/1998

- Da alle Bügel eines Bügelkorbes gemeinsam in der Biegemaschine abgebogen werden (Bild 2), sind die effektiven Toleranzen der Bügel wesentlich kleiner als die für duktilen Tragwerksverhalten eher zu grossen Werte im Anhang A der Norm SIA 262:2013. Als besonders ungünstig hat sich nämlich der Fall erwiesen, wenn – jeweils innerhalb der normgemässen Toleranzen – ein grosser Bügel zwischen zwei kleinen Bügeln zu liegen kommt. Dann ergibt sich bezüglich Stabilisierung der Längsbewehrung effektiv eine Verdoppelung der Bügelabstands, da der grosse Bügel unwirksam ist, bzw. erst bei fortgeschrittenem Ausknicken der Längsbewehrung zu tragen beginnt (Bild 1, links).

Dank der erwähnten Eigenschaften ergibt die Anwendung des FISEISMA-Bügel systems gesamt haft gesehen ein eher duktileres, d.h. günstigeres, Verhalten im Vergleich zu einer aus Einzelbü geln bewehrten Stahlbetontragwand.

4. Anwendung des Erdbeben-Randeffassungs-Bügel systems FISEISMA

4.1. Stahlbetontragwerke gemäss duktilem Tragwerksverhalten

Das Erdbeben-Randeffassungs-Bügel system FISEISMA eignet sich besonders als Bügel system für die Randlelemente in den plastischen Bereichen von Stahlbetontragwänden und für die plasti schen Bereiche von Stahlbetonstützen und -riegeln, die gemäss duktilem Tragwerksverhalten bemessen werden (Norm SIA 262:2013 Ziffern 5.7.1 und 5.7.2). Bei der Anwendung ist die FISEISMA-Dokumentation³ zu beachten, die wertvolle Hinweise für die Ausbildung der Längs- und Quer bewehrung im Stegbereich und in den Randlelementen gibt.

Ein weiterer Einsatzbereich für das Bügel system FISEISMA sind Überlappungsstösse der Längs bewehrung, die ausserhalb der plastischen Bereiche zu platzieren sind und die mit Bügeln eng zu umschnüren sind.

Ferner ist das Bügel system FISEISMA als Bügelbewehrung ausserhalb der plastischen Bereiche von duktil bemessenen Stahlbetontragwerken geeignet, wo geringere Anforderungen analog zu nicht-duktilen Tragwerksverhalten gelten. Die Anforderungen bezüglich Bügelbewehrung von Druckgliedern in Ziffer 5.5.4 der Norm SIA 262:2013 werden erfüllt. Die FISEISMA-Dokumentation³ zeigt entsprechende Anwendungsbeispiele für die Praxis auf.

4.2. Stahlbetontragwerke gemäss nicht-duktilen Tragwerksverhalten

Das Bügel system FISEISMA eignet sich auch für nicht-duktil bemessene Stahlbetontragwerke. Der Bügeldurchmesser und der Bügelabstand ist über die ganze Korblänge nach den Anforderungen der Ziffer 5.5.4.7 der Norm SIA 262:2013 gewählt worden. Im Bereich von Stossverbindungen und in Kraffteinleitungszonen kann das Bügel system FISEISMA ebenfalls eingesetzt werden, da die Anforderung einer Halbierung der Bügelabstände gemäss Ziffer 5.5.4.9 der Norm SIA 262:2013 vollumfänglich erfüllt wird.

Dank der erwähnten Eigenschaften lässt sich das Bügel systems FISEISMA bei Tragwänden generell über die ganze Höhe einsetzen. Insbesondere im Bereich von Überlappungsstössen der Längsbewehrung ist dessen Anwendung angezeigt.



Thomas Wenk