

Erdbebenverankerungen für mehrgeschossige Massivholzbauten – Kanadische Designphilosophie, Trends und experimentelle Untersuchungen

Hold-downs for multi-storey solid wood construction – Canadian design philosophy, recent research and experimental investigations

Stabilisation sismique pour des constructions bois massif multi-étages – design et tendances au Canada

Thomas Tannert
University of Northern British Columbia
Prince George, Canada



Johannes Schneider
University of British Columbia
Vancouver, Canada



Xiaoyue Zhang
University of British Columbia
Vancouver, Canada



Erdbebenverankerungen für mehrgeschossige Massivholzbauten – Kanadische Designphilosophie, Trends und experimentelle Untersuchungen

1. Entwicklungen im Ingenieurholzbau in Kanada

1.1. Überblick

Während im frühen 20. Jahrhundert der nordamerikanische Massivholzbau bis zu 10-geschossige Gebäude ermöglichte, ist heutzutage, als Folge der konservativen Normentwicklung, die Nutzung von Holz im Bauwesen weitgehend auf die Anwendung im niedriggeschossigen Holzrahmen-Wohnungsbau beschränkt. Das steigende Interesse an nachhaltigen Baupraktiken und Baustoffen sowie die Einführung neuer flächiger Holzwerkstoffe, insbesondere Brett-Sperrholz-Platten (BSP) haben zu einem erhöhten Interesse an Holz als konstruktiven Baustoff, über den Wohnungsbau hinaus, geführt.

Externe Faktoren, die der Holzindustrie zugutekommen, sind der Ansatz des kanadischen "National Building Code of Canada" (NBCC 2015), "Alternativen" zu ermöglichen, sofern sie die gleichen Anforderungen erfüllen, wie die in der Norm verankerten Standard-Lösungen. Architekten und Ingenieure können des weiteren Anleitung aus zwei weiteren aktuellen Veröffentlichungen beziehen: "Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada" (Karacabeyli & Lum 2014) und "Use of Timber in Tall Multi-storey Buildings" (Smith & Frangi 2014).

1.2. Bemessungsgrundlagen in der kanadischen Holzbaunorm

Während die allgemeine Baunorm (NBCC 2015) keine Richtlinien zum Holz-Hochhausbau beinhaltet, bietet die Holzbaunorm "Canadian Standard for Engineering Design in Wood" (CSA-O86-2014) Berechnungsgrundlagen für BSP und deren Anschlüsse. Abschnitt 11.9 berücksichtigt die Bemessung von Erdbebenverankerungen für BSP Plattformbauten mit einer Höhe von bis zu 30m (20m in Gebieten mit hohen Erdbebenlasten).

Die Tragfähigkeit der BSP Wände soll dabei von den Verbindungsmitteln begrenzt werden, während die BSP Platten als starrer Körper behandelt werden. Die Verbindungen müssen sich ausreichende verformen können, um die Bewegungen der einzelnen Wandplatten zu ermöglichen. Alle nicht-elastischen Verformungen sollen in den Verbindungen erfolgen: i) in den vertikalen Fugen zwischen den Wandplatten; ii) in den Fugen zwischen Wand- und Fussbodenplatten; und iii) in den Erdbebenverankerungen. Alle anderen Verbindungen müssen so bemessen sein, dass sie unter Maximallasten elastisch bleiben.

1.3. Erdbebenverankerungen

Wegen der zu berücksichtigenden höheren Wind- und Erdbebenlasten sind Hochhäuser mit erhöhten Festigkeitsanforderungen konfrontiert. Obwohl das geringere Eigengewicht der Holzstruktur die Fundamentkosten verringert, führt dies auch zu einem verminderten Widerstand gegenüber Abhebekräften. Die Standfestigkeit muss entweder durch eine Verringerung dieser Kräfte oder durch eine Verbesserung der Erdbebenverankerungen erreicht werden.

Für niedriggeschossige Gebäude in Holzrahmenkonstruktion gibt es einfache Anker (Abbildung 1, links), die im Fundament verankert und an Wände genagelt oder geschraubt werden und gewöhnlich eine Tragfähigkeit von bis zu 50 kN erreichen. Verschiedene Untersuchungen (z.B. Schneider 2015) zeigten eine erhebliche Beschädigung der Verbinder und der BSP unter zyklischen (periodischen) Lasten, siehe Abbildung 1 (Mitte).

Für mehrstöckige Holzrahmenkonstruktionen stehen Systeme zur Verfügung, die aus Gewindestangen, Kopplungsmuttern, und Ausgleichsvorrichtungen bestehen (Abbildung 1 rechts), die einen kontinuierlichen Lastpfad bis zum Fundament schaffen. Kapazitäten von 100kN können so erreicht werden.

Keines der derzeit verfügbaren Ankersysteme nutzt die kreuzweise orientierten BSP Lagen voll aus, da sie auf der Außenseite der Platte angebracht sind. Infolgedessen besteht ein erhöhter Bedarf an Erdbebenverankerungen, um die Anforderungen von Wind- und Erdbebenlasten bei Holz-Hochhäuser zu erfüllen.

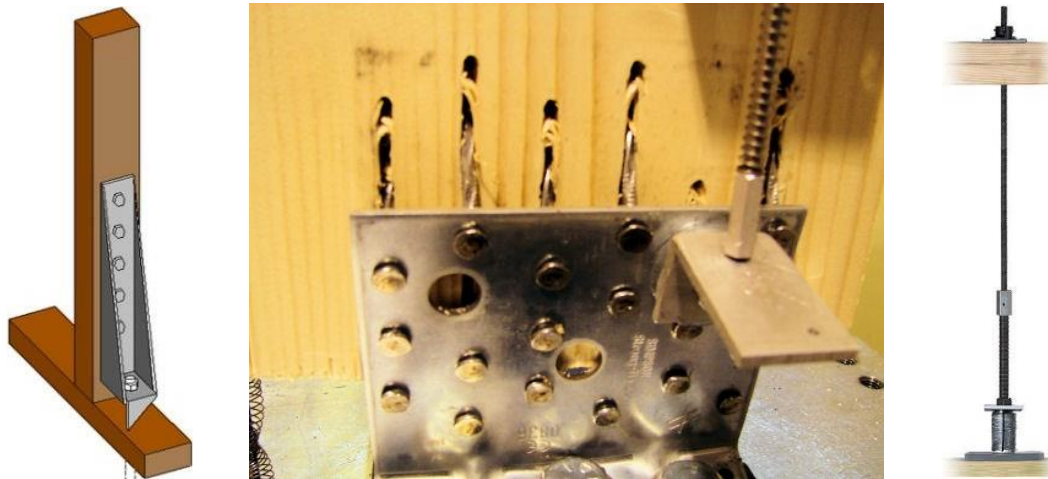


Abbildung 1: Hold-downs for timber structures: a) Traditional option; b) Strong-Rod™; Pull-out of nails in bracket-type connection under longitudinal loading

2. Untersuchungen an Rohrverbindern

2.1. Überblick

Im Rahmen einer Doktorarbeit (Schneider 2015; Schneider et al. 2014) wurde ein neuer Ansatz gewählt, der die Eigenschaften von Stahlrohren ausnutzt. Die Verbindung besteht aus einem Stahlrohr, einem Kopplungsstück für Bolzen, einer Gewindestange und Muttern, die so kombiniert sind, dass eine plastische Verformung ohne Beeinträchtigung der BSP erfolgen kann. Es wurden drei Rohrdurchmesser untersucht: Größe 1: 51mm (2 Zoll); Größe 2: 76mm (3 Zoll); und Größe 3: 102mm (4 Zoll). Die Rohre wurden aus kaltgewalztem Material mit einer Streckgrenze von 413MPa geschnitten. Die drei-schichtigen BSP (32-35-32mm) wurden aus Nadelholz (SPF Klasse 1 und 2) hergestellt.

Die Prüfkörper, schematisch in Abbildung 2 dargestellt, wurden am oberen Ende in der Ebene gehalten, die Verschiebung wurde an der Unterseite der Gewindestange in vertikaler Richtung aufgebracht. Die Kraft und die relative Verschiebung zwischen BSP und Gewindestange wurde mit einer Laservorrichtung gemessen. Für jeden Rohrdurchmesser wurden drei Prüfkörper unter quasi-statisch monotoner Belastung und fünf Prüfkörper unter zyklischer Belastung getestet. Die monotone Last wurde mit einer konstanten Verschiebung nach EN-26891 aufgebracht, die zyklischen Tests folgten dem CUREE-Protokoll gemäß ASTM E2126.

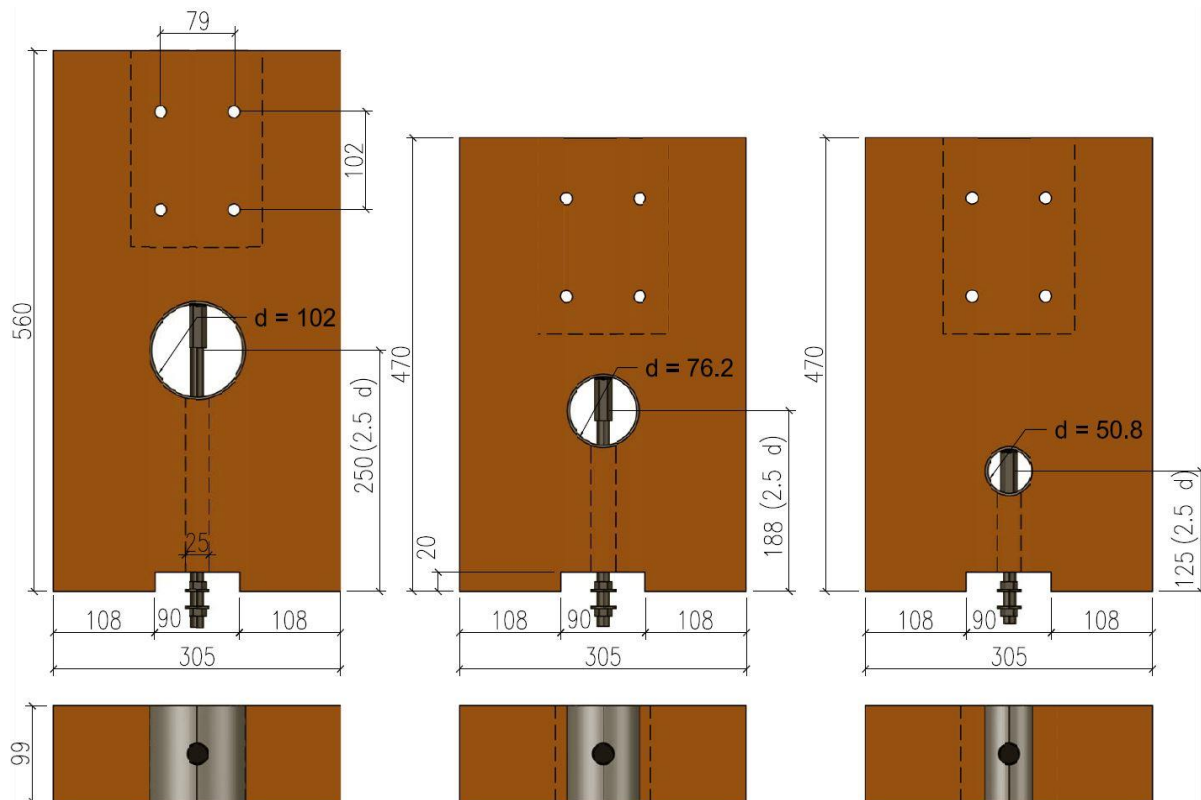


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Rohrverbinder

2.2. Ergebnisse

Die Last-Verformungskurven unter monotoner und zyklischer Belastung sind in Abbildung 3 beispielhaft für den Rohrdurchmesser 51mm dargestellt. Die Unterschiede zwischen den drei einzelnen Prüfkörpern war gering. Zusammen mit der Tatsache, dass keinerlei plastische Verformungen oder Risse in der BSP Platte entstanden, deuten darauf hin, dass das Last-Verformungsverhalten maßgeblich vom Stahl bestimmt wird.

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zusammen. Angegeben sind die Mittelwerte der Tragfähigkeit (F_{\max}), der elastischen Verbindungssteifigkeit (K_e), der Nachgiebigkeit (D), und der Verschiebung bei maximaler Last ($\Delta_{F_{\max}}$). Das Ergebnis zeigt einen direkten Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Tragfähigkeit sowie Steifigkeit, wobei der kleinste Rohrdurchmesser die größte Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweist. Alle Verbindungen zeigten ein duktilen Verhalten mit einem ausgeprägtem Fließplateau, bei dem die Last konstant war, bevor sie auf einen Maximalwert anstieg, gefolgt von einer Lastabnahme und Versagen. In allen Fällen verformte sich das Rohr, bis die Schweißnaht zwischen Rohr und Gewindestange riss. Dieser Versagensmodus trat in gleicher Weise für alle Rohrdurchmesser auf und war in den Lastverformungskurven als plötzlicher Abfall der Lastkapazität dargestellt. Unabhängig von Durchmesser wurde immer an der Kante des geschweißten Kopplungsstücks und Rohres ein Versagen festgestellt. Die Rißbildung und -ausbreitung waren offensichtlich und sind auch in den Diagrammen zu erkennen. Die Kurven aus den zyklischen Tests folgten den Kurven aus den monotonen Tests. Jedoch wurden die Tragfähigkeiten der monotonen Lastversuche nicht erreicht.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse an Rohrverbindern (Werte in Klammern aus zyklischen Versuchen)

Verbinder	D [-]	K_e [kN/mm]	F_{\max} [kN]	$\Delta_{F_{\max}}$ [mm]
2 Zoll	6.4 (6.3)	14.1 (13.3)	59.6 (57.5)	19.5 (15.3)
3 Zoll	10.1 (13.5)	14.1 (17.4)	49.3 (35.6)	24.9 (15.6)
4 Zoll	3.1 (2.9)	5.3 (4.7)	41.8 (35.5)	18.3 (18.2)

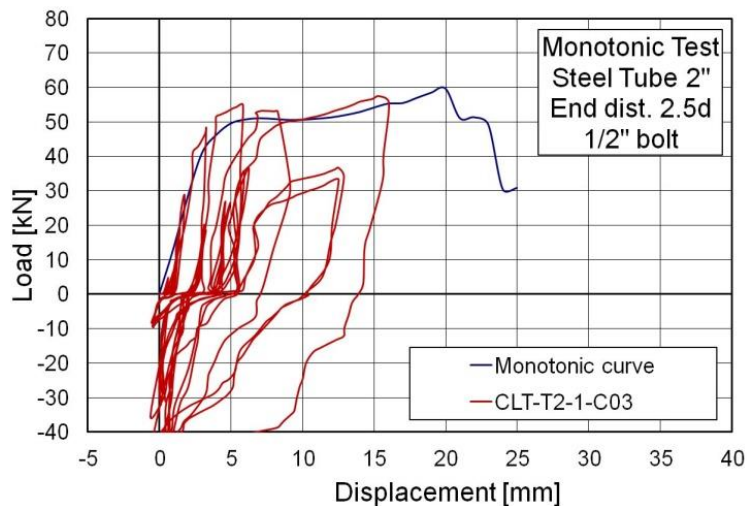


Abbildung 3: Versuche an Rohrverbindern: Last-Verformungskurven der (links) und typisches Versagensbild (rechts)

3. Untersuchungen an eingeklebten Stahlblechen

3.1. Überblick

Eine weitere Möglichkeit moderner Erdbebenanker besteht im Einsatz des Holz-Stahl-Verbund-Systems, welches aus perforierten Stahlplatten besteht, die im Holz verklebt werden. Die Tragfähigkeit eines HSK-Anschlusses ist durch das Minimum der Tragfähigkeiten der Stahlplatte, die Klebeverbindung und des Holzes bestimmt. Die Stahlbleche dienen als nachgiebiges schwaches Glied der Verbindung. Frühere Untersuchungen zeigten die große Steifigkeit, ein duktils Verhalten und gleichzeitig eine vorhersagbare Ermüdungstragfähigkeit unter Dauerlasten (Bathon et al. 2014). Obwohl das System bereits in mehreren Hochbauprojekten wie zum Beispiel dem Wood Innovation Design Center in Prince George angewendet wurde, liegen bisher keine Ergebnisse zum HSK-System unter zyklischen Belastung für den Einsatz in Erdbebengebieten vor.

Im Rahmen eines Projektes an der University of British Columbia (UBC) in Vancouver, wurde das HSK- System modifiziert, indem zwei im Holz liegende Reihen Löcher der perforierten Stahlbleche mit Klebeband abgedeckt wurden um einen sekundären Fliess-Mechanismus innerhalb der Holzes zu ermöglichen, welches ein Knicken des Stahlbleches verhindert (Zhang et al. 2016).

Die siebenschichtigen BSP (7 x 35mm) wurden aus Nadelholz (SPF Klasse Nr. 1 und Nr. 2 mit einer Dichte von ca. 450kg/m³) hergestellt. Die perforierten Bleche bestanden aus Stahl der Klasse S275 mit Lochdurchmessers d=10mm und einer Dicke von 2,55mm. Der verwendete Klebstoff war Purbond CR-421 (Lehringer 2013). Zwei 4mm breite Schlitzte wurden in die BSP geschnitten, dann wurden zwei perforierte Stahlplatten in die beiden Schlitzte der BSP eingeklebt, wobei zwei Reihen Löcher mit Klebeband abgedeckt wurden, um ein Füllen mit Klebstoff zu verhindern. Nachdem der Kleber ausgehärtet war, wurde der außenliegende Teil des Stahlblechs mit einem HSS Stahlprofil verbunden.

Vier Prüfkörper wurden hergestellt, zwei wurden unter quasi-statisch monotoner Belastung und zwei weitere unter zyklischer Belastung getestet. Die monotone Last wurde mit einer konstanten Verschiebung nach EN-26891 aufgebracht, die zyklischen Tests folgten dem CUREE-Protokoll gemäß ASTM E2126. Die Rotation der Prüfkörper wurde aus der Verschiebung in der Ebene berechnet. Abbildung 4 zeigt eine Seitenansicht und den Querschnitt eines Prüfkörpers.

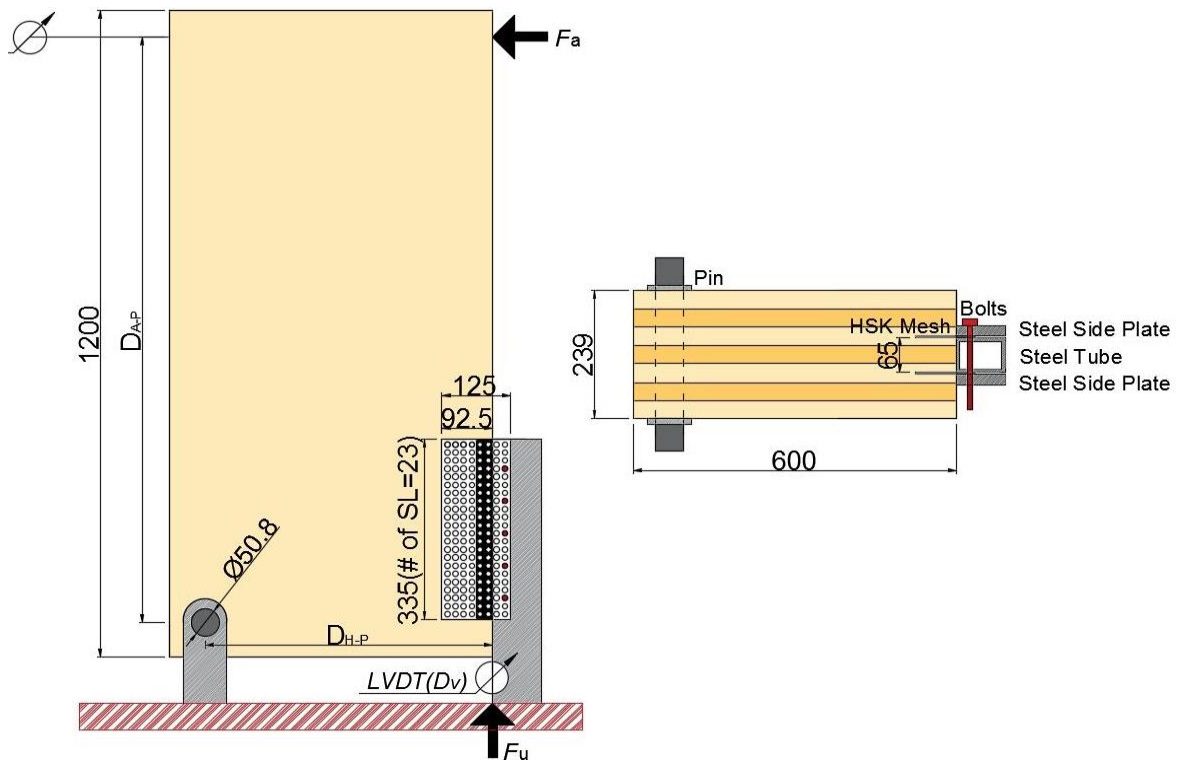


Abbildung 4: Modifiziertes HSK System als Erdbebenanker

3.2. Ergebnisse

Die Last-Verformungskurven unter monotoner und zyklischer Belastung sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den beiden Prüfkörper waren gering.

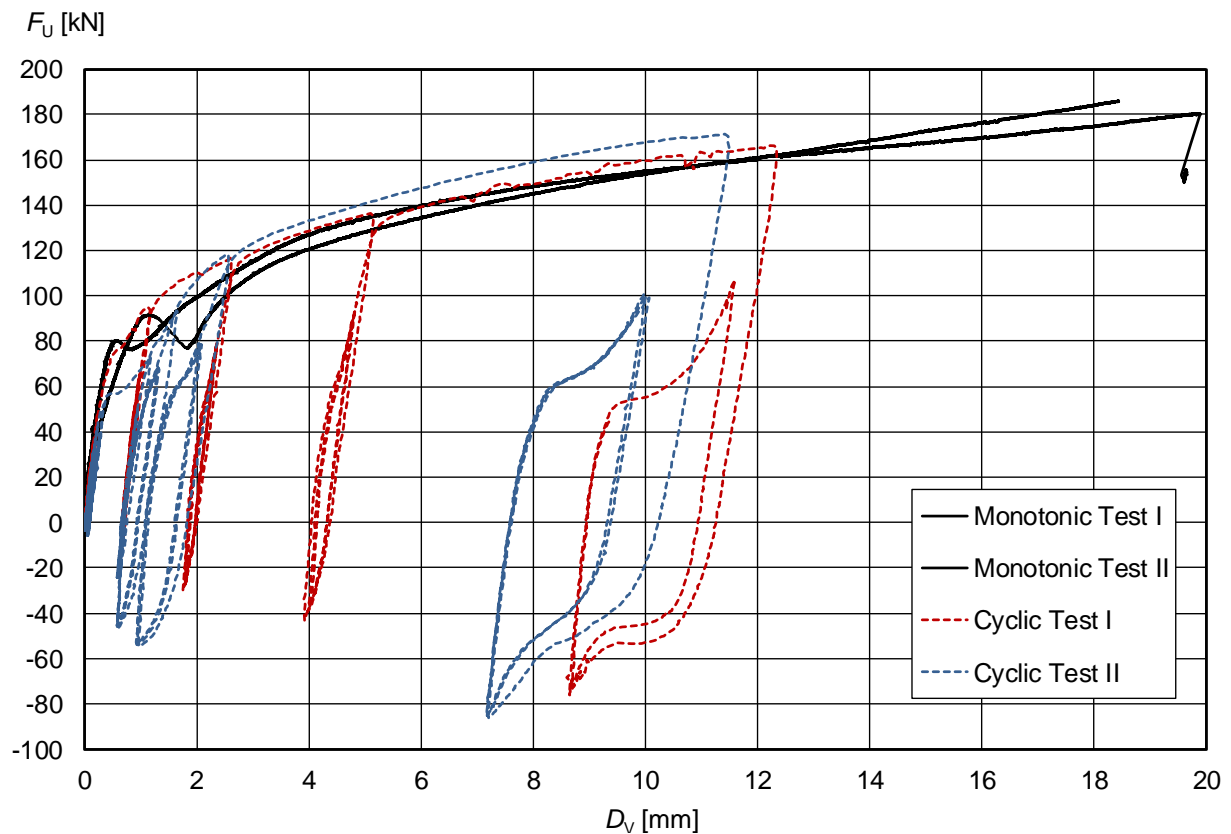


Abbildung 5: Last-Verformungskurven der Versuche mit eingeklebten Stahlblechen

Die modifizierten HSK-Anker weisen eine sehr hohe Steifigkeit im linearen Bereich auf. Die Tragfähigkeit kann zuverlässig anhand des Stahlquerschnitts abgeschätzt werden. Die Nachgiebigkeit der Verbindung ist groß. Die Ergebnisse der zyklischen Tests bestätigen die Ergebnisse der monotonen Tests. Die Streckgrenze (F_y) und Tragfähigkeit (F_{max}) erreichte 93% der Werte aus den monotonen Lastversuchen. Der Unterschied kann durch die Ermüdung des Stahls unter zyklischer Last erklärt werden. Aus dem gleichen Grund sind die maximalen Verschiebungen unter zyklischer Belastung und die Werte der Duktilität geringer. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse an Verbindern mit Stahlblechen

Test	F_y [kN]	F_{max} [kN]	K_e [kN/mm]	D [-]
Monotonic 1	98	180	151	13.1
Monotonic 2	102	186	109	10.9
Cyclic 1	98	167	159	9.7
Cyclic 2	91	172	134	8.1

Das Last-Verformungsverhalten, ähnlich den Versuchen mit Stahlrohren, ist maßgeblich vom Stahl bestimmt. Es traten keinerlei plastische Verformungen oder Risse in der BSP auf. Das Versagen des perforierten Stahlblechs, in Abbildung 6 dargestellt, zeigt deutlich die Verschiebung zwischen den beiden Reihen von Löchern, die vom Klebeband abgedeckt waren. Die Versuche bestätigten, dass die Plastifizierung innerhalb der BSP konzentriert werden kann und das Stahlblech wirksam am Knicken gehindert werden kann.



Abbildung 6: Typisches Versagensbild eines eingeklebten Stahlbleches

4. Zusammenfassung und Danksagung

Herkömmliche Erdbebenanker im Holzbau können die entstehenden Kräfte an Hochbauten nicht ohne eine erhebliche Schädigung des Holzes abtragen. Zwei Forschungsprojekte an der UBC untersuchten innovative Ankerlösungen unter quasi-statisch monotonen und zyklischen Belastungen. Sowohl der neuartige Rohrverbinder als auch die eingeklebten Stahlbleche kombinieren eine hohe Anfangssteifigkeit mit hoher Nachgiebigkeit. Die Prüfserien zeigten, dass beide Lösungen als Erdbebenanker in Frage kommen. Eine Beschädigung des Holzes wurde vermieden und die Tragfähigkeit kann präzise anhand der Zahlenwerte bestimmt werden. Der Rohrverbinder hat zusätzlich den Vorteil, dass das verformte Element relativ einfach ausgetauscht werden kann.

Das Projekt der Rohrverbinder wurde finanziert durch das NSERC Strategische Netzwerk für innovative Holzprodukte und Gebäudetechnik (NEWBuildS) und der Stahlbau-Stiftung (SSEF). Das Projekt der Stahlbleche wurde von MITCAS Kanada durch ein Accelerate Projekt finanziert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung von FPInnovations Vancouver bei beiden Projekten.

5. Literaturverzeichnis

ANSI/APA PRG 320-2012 (2012) Standard for performance-rated cross-laminated timber. American National Standards Institute, New York.

ASTM E2126-11 (2013) Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings. ASTM International, West Conshohocken.

Bathon L, Bletz-Mühldorfer O, Schmidt J, Diehl F. (2014). Fatigue Design of Adhesive Connections Using Perforated Steel Plates. Proceedings WCTE. Quebec, Canada.

CSA O86-14 (2014) Engineering Design in Wood. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada.

EN-26891 (1991) Timber Structures, Joints made with Mechanical Fasteners, General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics. CEN European Committee for Standardization, Brussels.

Karacabeyli E, Lum C (eds) (2014) Technical guide for the design and construction of tall wood buildings in Canada. Special Publication (SP-55E), FPInnovations, Canada.

Lehringer C (2012) Purbond 2C-Adhesives. Cost action FP 1004 Report. Wroclaw, Poland.

NBCC (2015) National Building Code of Canada. National Research Council of Canada. Ottawa.

Schneider J, Zhang X, Tannert T, Popovski M, Karacabeyli E, Stierner SF, Tesfamariam S (2014). Novel Steel Tube Connection for Hybrid System. Proceedings WCTE. Quebec, Canada.

Schneider J (2015). Novel Steel Tube Connection for Hybrid System. PhD thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Smith I, Frangi A (2014) Use of timber in tall multi-storey buildings. ISBN 978-3-85748-133-8, SED 13; IABSE, Zurich.

Zhang X, Popovski M, Tannert T (2016): High-Capacity Hold-Down for Tall Timber Buildings. Proceedings WCTE. Vienna, Austria.