

Pres-Lam. Robustheit und Resilienz durch clevere Verbindungen

Pres-Lam – Robustness and resilience through
clever connections

Pres-Lam. Robustesse et résilience grâce à des
assemblages futés

Dr. Daniel Moroder
PTL | Structural Timber Consultants
Christchurch, Neuseeland



Pres-Lam. Robustheit und Resilienz durch clevere Verbindungen

1. Einleitung

Neuseeland ist bekannt für seine einzigartige Naturlandschaft, die jährlich Millionen Besucher anzieht, für die riesige Menge an Schafen (zurzeit sind es 6 Schafe pro Einwohner), aber auch für die Erdbeben, die das Land fast täglich erschüttern. Wohl auch deshalb sind neuseeländische Ingenieure und Forscher beim Thema Erdbebensicherheit führend; so haben zum Beispiel Bill Robinson und Ivan Skinner vor 40 Jahren die Erdbebenisolatoren erfunden, die viele wichtige Gebäude weltweit im Katastrophenfall schützen.

Neuseeland hat auch einen regen Forstwirtschaftssektor, wobei ein Großteil des Holzes jedoch für die Papierindustrie exportiert wird. Nur ein kleiner Anteil des Holzes wird durch die lokale Industrie in Furnierschichtholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz verarbeitet und für nationale und internationale Bauprojekte verwendet.

Seit mehreren Jahrzehnten wird das Verhalten von Holzkonstruktionen unter Erdbeeinwirkung an der University of Canterbury in Christchurch, Neuseeland erforscht. 2005 wurden erstmals vorgespannte Holzelemente, seither bekannt als Pres-Lam (vom Englischen «Prestressed Timber», eben «vorgespanntes Holz»), erfolgreich getestet. 2008 wurde ein Forschungsprogramm ins Leben gerufen, das den Gebrauch von Holz in der lokalen Bauwirtschaft vorantreiben sollte. Bereits wenige Jahre später, im Jahr 2011, wurden gleich vier Gebäude mit der Pres-Lam Technologie errichtet. Die Vorteile dieser Bauweise überzeugten die Bauherren auf Anhieb, handelt es sich doch um eine Struktur aus einem nachhaltigen Material, das ein großartiges Wohnklima verleiht und in Sachen Kosten mit Beton und Stahl vergleichbar ist. Der aber wohl bemerkenswerteste Vorteil besteht darin, dass Pres-Lam Gebäude nicht nur erdbebensicher sind (d.h. im Falle eines Erdbebens stürzen sie nicht ein und fordern keine Menschenleben), sondern dass sie auch gleichzeitig, im Gegensatz zu traditionellen Bauten, kaum Schäden aufweisen und somit in kürzester Zeit wieder benutzt werden können.

In diesem Aufsatz wird Pres-Lam kurz erklärt und die größeren Meilensteine des Forschungs- und Entwicklungsprogramms zu diesem System erörtert. Weiteres werden einige der bereits errichteten Gebäude mit vorgespannter Tragstruktur beschrieben.

Seit 2006 sind PTL | *Structural Timber Consultants* Inhaber des patentierten Pres-Lam Systems, und haben bei den meisten Bauprojekten als externe Ingenieure mitgewirkt. Seit 2014 bietet die Firma PTL ihre Dienste als Ingenieurbüro für Holzbauprojekte weltweit an.

2. Pres-Lam

Das Pres-Lam System besteht aus der Kombination von hochfesten Stahlseilen oder Stahlstäben und Holzelementen wie Träger, Stützen, Rahmen und Wände. Werden Stützen und Träger durch Spannstähle miteinander verbunden, erhält man Rahmenbauwerke wie in Abbildung 1a gezeigt. Skeletttragwerke werden im Holzbau nur selten verwendet, da Momentenverbindungen normalerweise teuer sind und oft nicht die verlangte Steifigkeit und Festigkeit aufweisen. Pres-Lam Rahmenbauwerke lassen diese Einschränkungen hinter sich und sind ideal für den mehrgeschossigen Holzhochbau, da sie bei der Raumeinteilung und der Fassadenplanung großen Freiraum bieten.

Werden Holzträger mittels exzentrisch angeordneten oder durch umgelenkten Spannstahl vorgespannt, können die Spannweiten von Holzträgern beachtlich erhöht werden. Vorgespannte Rahmen mit Umlenkpunkten wie in Abbildung 1b (unterer Träger) können somit horizontale wie auch vertikale Lasten über hohe Spannweiten abtragen.

Pres-Lam wird auch sehr erfolgreich bei Massivholzwänden wie in Abbildung 1c angewandt. Durch ihre dadurch erreichte hohe Festigkeit kann die Anzahl von Massivholzwänden in einem Gebäude stark reduziert werden. Pres-Lam Wände eignen sich somit für hohe Holzgebäude, die trotz eines sehr offenen Planlayouts dadurch hervorragend horizontale Kräfte abtragen können.

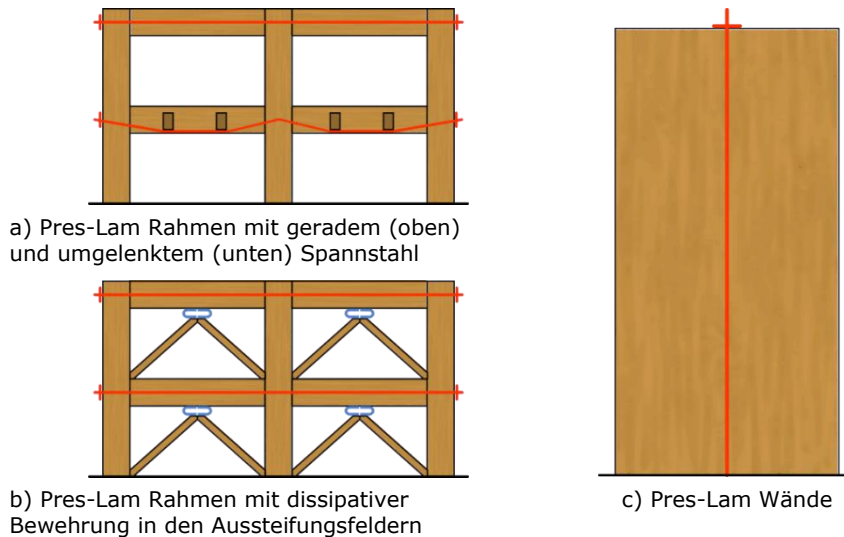


Abbildung 1: Das Pres-Lam System mit vorgespannten Rahmen oder Wänden.

2.1. Systembeschreibung

Das Prinzip, das hinter dem Pres-Lam System steht, wurde ursprünglich für vorgespannte Betonfertigbauteile unter dem Namen PRESSS (PREcast Seismic Structural System) in San Diego, Kalifornien entwickelt [1] und wenig später auch auf Stahlrahmenkonstruktionen erweitert [2].

Diese vorgespannten Strukturen mit freiem Spannstaahl, d. h. der Spannstaahl liegt in Hüllrohren und ist nicht direkt mit den Bauteilen verbunden, können großen nicht-linearen Verformungen standhalten und dabei sowohl den Schaden an den Bauteilen minimieren als auch die Selbstzentrierung der Struktur garantieren. Der dabei erzielte Mechanismus wird im Englischen als «rocking» bezeichnet, ein Kippmechanismus, mit dem die einzelnen Bauteile, wie an den Wänden in Abbildung 2 gezeigt, unter horizontalen Lasten nach vorn und hinten kippen. Durch das Kippen öffnet sich ein Spalt zwischen der Wand und dem Fundament, der den Spannstaahl dabei zwingt, sich elastisch zu dehnen. Da dabei die Kraft im Spannstaahl erhöht wird, wird das Bauteil wieder in seine ursprüngliche Lage zurückgebracht. Zusätzliche Bewehrung (wie zum Beispiel intern oder extern angebrachter Baustahl) muss dieser Bewegung folgen, verformt sich dabei plastisch und dissipiert Energie, was im Erdbebenfall die horizontalen Kräfte in der Struktur reduziert.

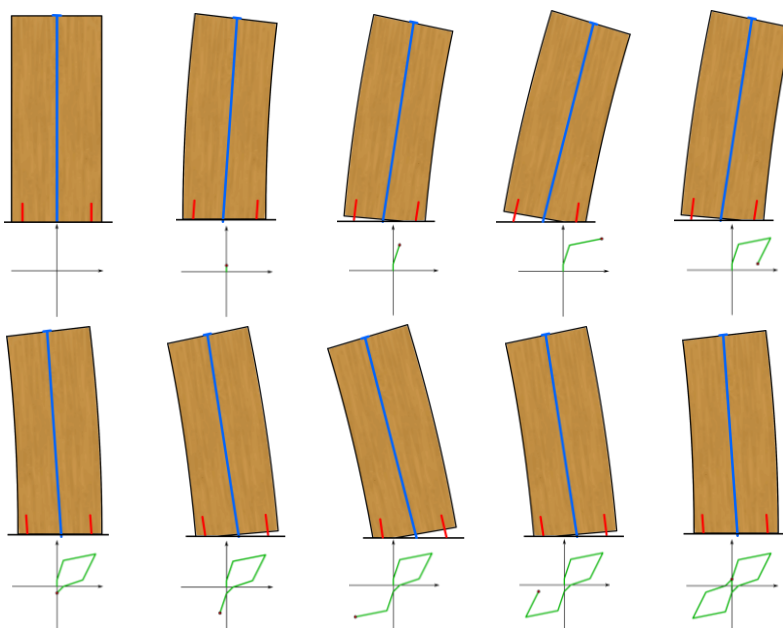


Abbildung 2: Vorgespannte Wand, Kippmechanismus und Momenten-Rotation-Hysterese.

Im Gegenteil zu traditionellen Bauten, die im Falle eines Erdbebens plastische Gelenke ausbilden, dabei das Bauteil stark beschädigen und somit meistens abgerissen werden müssen, zeigen Bauten mit vorgespannten Elementen kaum Schäden auf. Zusätzlich angebrachte Bewehrung kann, wenn notwendig, nach einem größeren Erdbeben einfach ausgetauscht werden.

Das Prinzip des kontrollierten Kippmechanismus ist materialunabhängig und wurde seit 2004 an der University of Canterbury auch auf Holzstrukturen unter dem Namen Pres-Lam implementiert [3, 4]. Für die ersten Versuchsaufbauten wurde Furnierschichtholz aus Kiefernholz (*Pinus radiata*) verwendet [3, 5], später wurde die Vorspannung auch an Aufbauten mit Brettschichtholz [6] und Brettsperrholz [7] getestet.

Eine weitere Besonderheit des Pres-Lam Systems ist die flaggenähnliche Hysterese wie in Abbildung 3a gezeigt. Ein rein vorgespanntes Element hat ein multilinear elastisches Verhalten und kehrt beim Entzug der Last in die Ausgangsposition zurück (blaue Linie). Solange die Vorspannungskraft das Moment im Bauteil überdrückt, verdreht sich das Bauteil an der Verbindung nicht. Sobald das sogenannte Dekompressionsmoment erreicht wird, fängt das Element an sich zu verdrehen und es öffnet sich die Kontaktfläche zwischen den Elementen. Dadurch wird der Spann Stahl elastisch gedehnt und versucht diese Fuge wieder zu schließen.

Werden nur Bewehrungselemente zwischen den Bauteilen verwendet (rote Strichpunktlinie), fängt das Bauteil sofort an zu kippen, da sich die Bewehrung elastisch verformt. Wird der Fließpunkt erreicht, verformt sich die Bewehrung plastisch und dissipiert dabei Energie. Das System kehrt nach Entzug der externen Einwirkung nicht in die Ausgangslage zurück und besitzt deshalb eine Restverformung.

Durch die Kombination beider Systeme (Vorspannung und Bewehrung) hat man beides: die Selbstzentrierung und die Energiedissipation. Die resultierende Hysterese (grüne Volllinie) hat eine flaggenähnliche Form, die typisch für diese Systeme ist. Ein wichtiger Bemessungsparameter für Pres-Lam Strukturen ist der Selbstzentrierungsindex β , der als das Verhältnis zwischen der Momentenfestigkeit durch Vorspannung und der Momentenfestigkeit des Gesamtsystems definiert ist. Die Wahl dieses Parameters hat Auswirkungen auf die Energiedissipation und Momentenfestigkeit des Systems und fließt somit in die Festlegung der Einwirkung und der Festigkeit ein (siehe Abbildung 3b).

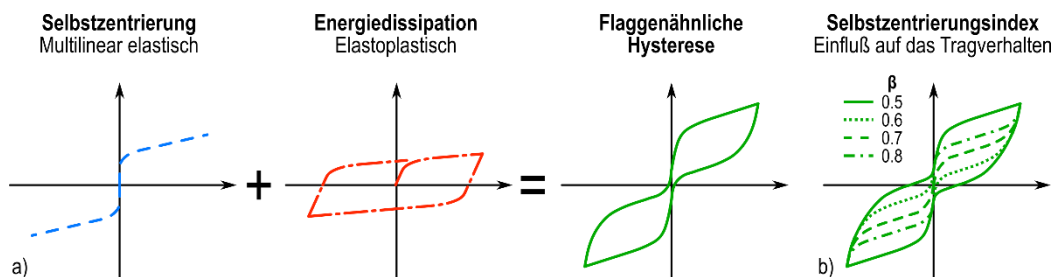


Abbildung 3: a) Die flaggenähnliche Momenten-Rotation-Hysterese des Pres-Lam Systems und b) der Einfluss des Selbstzentrierungsindex β

Die Verwendung von zusätzlicher Bewehrung bringt nicht nur Vorteile im Fall von Erdbebenlasten mit sich, sondern verleiht dem System auch höhere Festigkeiten unter anderen horizontalen Lasten. Da die Vorspannung und die Bewehrung parallel wirken, wird dem System auch zusätzlich Robustheit beziehungsweise ein alternativer Kräfteverlauf verliehen. Bei Verwendung von Bewehrung kann zudem die Vorspannkraft reduziert werden, was die Knotenausbildung vereinfacht und auch den Verlust der Vorspannkraft durch Langzeiteffekte reduziert. Sollte dennoch ein nennenswerter Verlust auftreten, kann zusätzliche angebrachte Bewehrung etwaige Verminderungen in der Festigkeit und Steifigkeit kompensieren [8].

3. Forschung und Entwicklung

Über 45 Forscher an der University of Canterbury haben in den letzten 12 Jahren intensiv am Pres-Lam System gearbeitet und dabei über 200 Publikationen veröffentlicht. Eine enge Zusammenarbeit mit der Holzbauindustrie, Ingenieuren und Architekten hat bereits zur Realisierung von 12 Bauwerken geführt, was das Interesse der Baubranche bestätigt.

Die Vorteile des Systems wurden auch in der Schweiz [9] und in Nordamerika [10, 11] erkannt und haben dort zu Forschungsprojekten zur weiteren Verbesserung des Systems geführt.

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Forschungsergebnisse und die Weiterentwicklung der Pres-Lam Technologie kurz zusammengefasst. Für genauere Informationen wird der interessierte Leser an die angegebene Literatur verwiesen.

Im Jahre 2005 wurden der erste vorgespannte Träger-Stütze-Knotenpunkt und die erste eingespannte Wand aus Furnierschichtholz im Maßstab 1:2/3 mit reiner Vorspannung und mit zusätzlicher Bewehrung unter quasi-statischen Lasten getestet [3, 5].

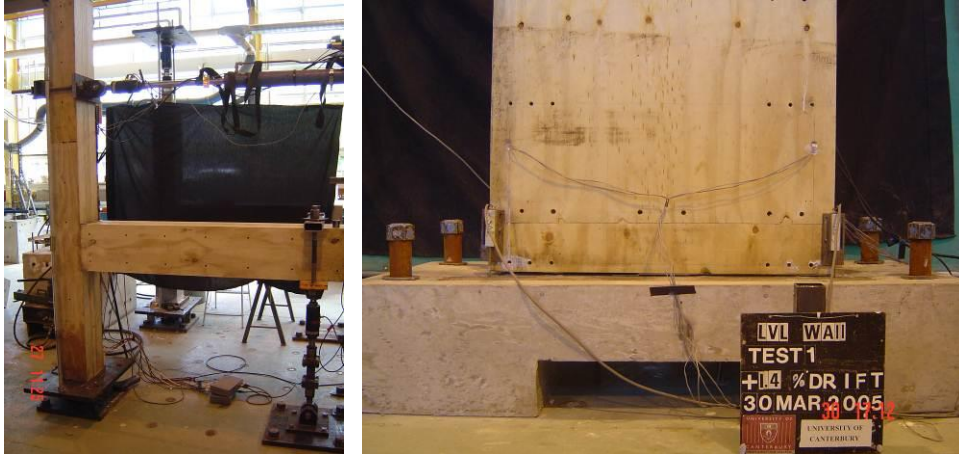


Abbildung 4: Versuchsaufbau eines vorgespannten Träger-Stütze-Knotenpunktes und einer eingespannten Wand aus Furnierschichtholz.

Für alle Versuchsaufbauten wurde eine Duktilität von mehr als 5 gemessen. Dabei blieben die Holzelemente unbeschädigt und kehrten jeweils in deren Ausgangslage zurück. Bei zusätzlicher Bewehrung wurde ein äquivalentes Dämpfungsverhältnis von 11–21% gemessen. Der Versuchsaufbau zeigte zudem auf, dass die elastische Verformung der Holzelemente nicht vernachlässigbar ist und in die Planung miteinbezogen werden muss. Weitere Versuche im Jahr 2006 [12, 13] an einem Träger-Stütze-Knotenpunkt mit Vorspannung und extern angebrachter Bewehrung zeigten sehr stabile Hysteresen mit hoher Dämpfung. Die Bewehrung bestand aus rundem Baustahl, dessen Durchmesser im mittleren Teil kleiner gefräst worden war (siehe Abbildung 5). Unter Dehnung erfuhr der Stahl eine plastische Verformung. Unter Stauchung wurde das seitliche Ausknicken durch ein mit Epoxidharz gefülltes Stahlrohr verhindert. Diese externe Bewehrung kann im Bedarfsfall nach größeren Erdbeben ausgetauscht werden und bekam deshalb die Bezeichnung «Plug and Play»-Bewehrung. Um möglichst viel Dämpfung und Steifigkeit zu erreichen, müssen diese Stahlelemente jedoch so starr wie möglich mit den Bauteilen verbunden werden.

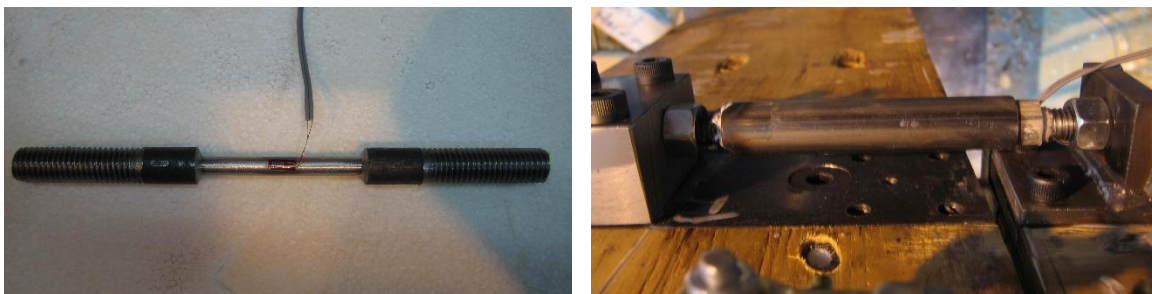


Abbildung 5: «Plug and Play»-Bewehrung aus rundem Baustahl mit Dehnungsmessstreifen (links) und eingebaute Bewehrung im Stahlrohr (rechts).

Versuchsaufbauten an vorgespannten Wänden haben gezeigt, dass die Spannungsverteilung in den Wänden unter Horizontallasten einen linearen Verlauf hat und sich somit nicht plastifiziert [14, 15]. Auch wurden gekoppelte Wände wie in Abbildung 6 mit aufgenagelten Sperrholzplatten und UFP-Bewehrung («U-shaped Flexural Plates», gebogenen Stahlplatten) getestet, die hervorragende Resultate mit hoher Dämpfung erzielten. UFPs haben

den Vorteil, dass sie sich unter kleinen Verformungen bereits plastifizieren und Ermüdungserscheinungen nur bedingt unterliegen, da sich der Dehnungspunkt kontinuierlich entlang des Bogens bewegt.

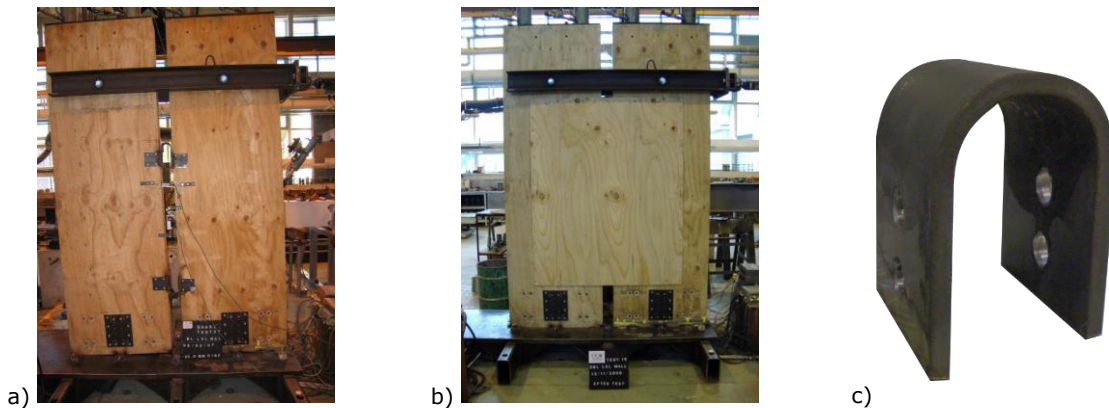


Abbildung 6: Gekoppelte Wände mit a) UFP-Bewehrung und mit b) aufgenagelter Sperrholzplatte; c) Beispiel einer typischen UFP-Bewehrung.

Im Jahr 2007 wurde die erste Pres-Lam Wand im Maßstab 1:1/4 mit Bewehrung in Form von Stahlelementen und viskosen Dämpfern unter dynamischer Einwirkung getestet [16]. Die Versuchsergebnisse mit sehr stabilen flaggenähnlichen Hysteresen zeigten unter anderem auf, dass Pres-Lam keine nennenswerte Dehnratenabhängigkeit aufweist.

Im Jahr 2009 wurde das erste Pres-Lam Gebäude im Maßstab 1:2/3 unter quasi-ständigen bidirektionalen Lasten getestet [17]. Die Struktur in Abbildung 7 bestand aus vorgespannten Rahmen und vorgespannten Wänden in den zwei Hauptrichtungen. Die Decken bestanden aus Holzelementen, die in einem späteren Zeitpunkt in eine Holz-Beton-Verbunddecke umgewandelt wurde. Wegen der hohen Flexibilität der Rahmen und der Stahl-Holz-Verbindungen hat sich die externe Bewehrung nur kaum verformt und dabei nicht der Energiedissipation beigetragen. In Wandrichtung, wo der Kippmechanismus einen weit größeren Spalt zwischen Wand und Fundament zur Folge hatte, hat sich die Bewehrung wie gewünscht plastisch verformt.

Neben der Erkenntnis, dass Pres-Lam Strukturen ohne bleibende Schäden Erdbeben standhalten können, konnte auch die vorgeschlagene Berechnungsprozedur bestätigt werden. Es wurde aber auch festgestellt, dass mehr Augenmerk auf die Flexibilität und Verformung der einzelnen Elemente gelegt werden muss.



Abbildung 7: Versuchsaufbau eines Pres-Lam Gebäudes (links) mit Träger-Stütze-Knotenpunkt (rechts oben) und gekoppelten Wänden (rechts unten).

Im Jahr 2010 wurden 3- und 5-stöckige Pres-Lam Rahmen auf einem Prüfstand unter dynamischen Lasten getestet [18]. Es wurde festgestellt, dass unabhängig von der Vorspannkraft, der Anzahl an Stockwerken und der beschleunigten Masse ein elastisches Dämpfungsverhältnis von 5% angenommen werden kann.

Eine Zusammenarbeit der Universitäten von Canterbury und Basilicata in Italien haben im Jahr 2011 zum ersten Versuchsaufbau eines Rahmenecks mit europäischem Leimholz geführt [19, 20]. Die im Gegensatz zum neuseeländischen Furnierschichtholz geringere Festigkeit und Steifigkeit unter Druck rechtwinklig zur Faser konnten durch die Verstärkung mit Vollgewindeschrauben erfolgreich verbessert werden. Auch wurden zur Verstärkung Bewehrungselemente in Form von Stahlwinkeln erfolgreich getestet.

Die Versuchsaufbauten an Ein- und Zweifeldrahmen im Jahr 2012 (siehe Abbildung 8) mit umgelenktem Spannstahl bestätigten die Vorteile des Pres-Lam Systems auch unter vertikalen Lasten [21]. Durch die Einspannmomente an den Knotenpunkten sowie die nach oben wirkenden Kräfte an den Umlenkpunkten konnten weite Spannweiten mit relativ kleinen Trägerquerschnitten erzielt werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass Rahmen mit umgelenktem Spannstahl auch horizontalen Kräften sehr gut standhalten können. Im Unterschied zu Rahmen mit geradem Spannstahl muss lediglich die Vorkrümmung der Träger in die Berechnung miteinbezogen werden.



Abbildung 8: Vorgespannte Rahmen mit umgelenktem Spannstahl unter vertikalen Lasten.

Eine letzte Versuchsserie an Wänden im Jahr 2013 mit reiner Vorspannung und mit interner und externer Bewehrung führten zu einer Verfeinerung der Berechnung von Pres-Lam Wänden [22]. Des Weiteren wurden Wände mit externen Stützen getestet. Diese Stützen waren gelenkig mit dem Fundament verbunden und übertrugen horizontale Lasten über Kontakt in die Wand. Der Vorteil dieses Systems liegt daran, dass die Deckenscheibe direkt an die Stützen angeschlossen werden kann und somit nicht der vertikalen Komponente der Kippbewegung folgen muss, welche Verformungsinkompatibilitäten wie in Abbildung 9b gezeigt mit sich bringen könnte.

Nachdem es zu großen Schäden an Geschossdecken in Betonstrukturen durch die Canterbury Erdbeben in den Jahren 2010 und 2011 kam, war es angebracht, das Verhalten der Decken auch an Pres-Lam Strukturen genauer zu überprüfen. Diese wechselseitige Beeinflussung zwischen Pres-Lam Wänden und Pres-Lam Rahmen und den angeschlossenen Decken wurde im Jahr 2012 an mehreren Versuchsaufbauten untersucht [23, 24]. Die Versuchsreihe sollte Aufschluss darüber geben, ob die Verformungsinkompatibilitäten (das Öffnen der Kontaktfläche an Rahmenecken beziehungsweise Rotation/Vertikalbewegung von Wänden), wie in Abbildung 9 gezeigt, zu Schäden führen können. Die Versuche mit mehreren Verbindungsdetails haben gezeigt, dass die Flexibilität der Holzelemente und der metallischen Verbindungsmittel jegliche Verformungsinkompatibilitäten ohne Schäden und nennenswerter Beeinflussung erlauben.

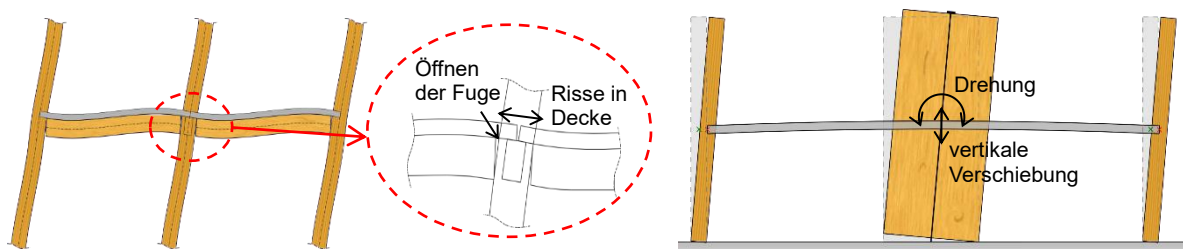


Abbildung 9: Verformungsinkompatibilitäten zwischen Decken und Pres-Lam Rahmen (links) und Pres-Lam Wänden (rechts).

Im Jahr 2013 wurde die Pres-Lam Technologie auf einen mehrstöckigen Treppenaufgang im Maßstab 1:1/2 aus Brettspertholz ausgeweitet [7]. Die Struktur wurde zuerst mit einem traditionellen Aufbau (einzelne Wandsegmente wurden mit Holzschrauben mit Teilgewinde verbunden) und später mit einem weiteren Aufbau mit verringertem Schadensaufkommen

durch Erdbeben (Eckstützen und UFP-Bewehrung) unter bidirektionalen Lasten getestet. Die Versuchsreihe konnte bestätigen, dass ein aussteifender Treppen- und Aufzugskern aus Pres-Lam eine hervorragende Alternative zu traditionellen Betonkernen sein kann.



Abbildung 10: Treppenaufgang aus vorgespanntem Brettsperrholz.

Im Jahr 2013 wurde eine dreistöckige Rahmenstruktur aus Brettsperrholz unter realen Erdbebeneinwirkungen auf einem dynamischen Prüfstand getestet. Auch unter einer Geschossverformung von 3,5% konnten weder Beeinträchtigungen in der Tragstruktur noch wesentliche Schäden nachgewiesen werden. Die externe Bewehrung konnte erfolgreich Erdbebenlasten reduzieren, aktivierte sich aber relativ spät und nur unter großen Verformungen. Dies war auf die großen elastischen Verformungen im Rahmen und der somit nur kaum erreichten elastische Dehnungsgrenze der Bewehrung zurückzuführen. Wegen der hohen Flexibilität von Rahmenkonstruktionen aus Holz sind horizontale Verschiebungen unter dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Bemessung oft ausschlaggebend. Zur Erhöhung der Steifigkeit wurden deshalb auch Rahmenkonstruktionen mit dissipativen Aussteifungsfeldern wie in Abbildung 1b vorgeschlagen.

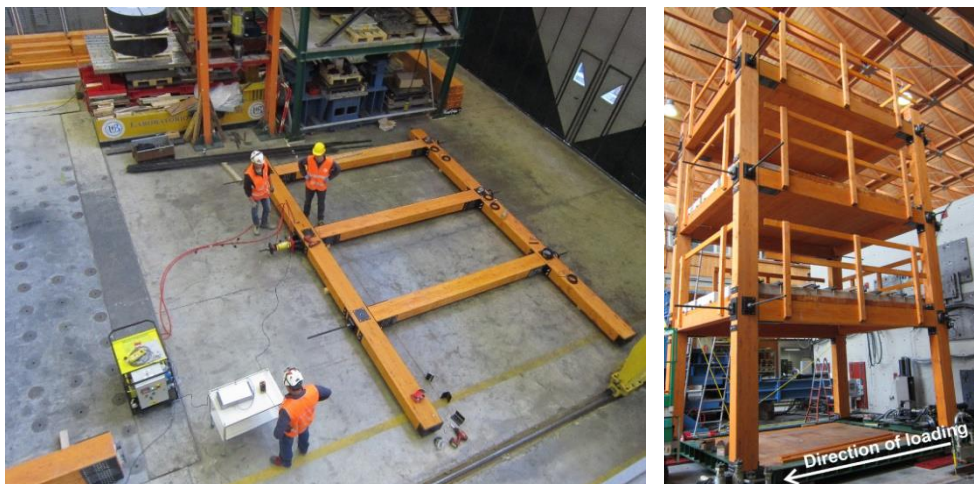


Abbildung 11: Aufbau eines dreistöckigen Rahmens auf einem Rütteltisch.

Über weitere Versuchsergebnisse zum Brandverhalten von Pres-Lam Strukturen kann in [25, 26] nachgelesen werden. Zurzeit wird auch das Langzeitverhalten von vorgespannten Holzstrukturen untersucht [8, 27]; dabei werden unter anderem Versuchsdaten aus Neuseeland [28] und der Schweiz [29] ausgewertet.

4. Gebaute Objekte

Schon nach weniger als 5 Jahren seit der Erfindung von Pres-Lam wurden die ersten Gebäude mit vorgespannten Rahmen und Wänden geplant und errichtet. Die meisten dieser Gebäude stehen in Neuseeland. Ausschlaggebend dafür war sicher auch das starke Erdbeben in Christchurch im Februar 2012; nach dem Erdbeben setzten viele Bauherren auf eine erdbebensichere, schadensfreie und nachhaltige Bauart. Seit 2015 gibt es auch

weitere Projekte in der Schweiz und in Japan sowie einige Projekte in der Planungsphase in den USA.

In Tabelle 1 sind alle gebauten und geplanten Pres-Lam Projekte aufgelistet. Einige davon werden später im Text kurz beschrieben.

Tabelle 1: Liste der gebauten Pres-Lam Strukturen in Neuseeland und weltweit.

	Name	Standort	Nutzung	Eröffnung	Stockwerke	System ¹⁾
1	NMIT	Nelson, NZ	Bildungseinrichtung	2011	3	W
2	Carterton	Carterton, NZ	Mehrzweckgebäude	2011	1	W
3	BRANZ	Judgeford, NZ	Büro	2011	1	R
4	EXPAN	Christchurch, NZ	Musterhaus/Büro	2011	2	W + R
5	Massey CoCA	Wellington, NZ	Bildungseinrichtung	2012	3	R
6	Young Hunter House	Christchurch, NZ	Büro/Einzelhandel	2014	3	R
7	Trimble Navigation	Christchurch, NZ	Büro	2014	2	W + R
8	St Elmo Courts	Christchurch, NZ	Büro	2015	5	R
9	ETH HONR	Zürich, CH	Musterhaus/ Büro	2015	2	R
10	Rush House	Christchurch, NZ	Büro/Arztpraxis	2016	3	W
11	Sumitomo Fire Lab	Tsukuba, Japan	Labor/Industrie	2016	1	W
12	Kaikoura KDC	Kaikoura, NZ	Büro/Bibliothek	2016	3	W
13	OSU Peavy	Corvallis, USA	Bildungseinrichtung	2017	3	W
14	Von Haast	Christchurch, NZ	Bildungseinrichtung	2018	3	R

¹⁾ W = Vorgespannte Wände, R = Vorgespannte Rahmen

4.1. Nelson Marlborough Institute of Technology (NMIT)

Als das weltweit erste Gebäude mit der Pres-Lam Technologie wurde das NMIT Gebäude in Nelson gebaut [30]. Das Gebäude wurde von *Irving Smith Jack Architects*, *Aurecon* und *PTL* geplant. Die aussteifende Struktur besteht aus gekoppelten Wänden mit UFP-Bewehrung in beiden Hauptrichtungen. Anfängliche Schwierigkeiten beim Entwurf des Anschlusses zur Deckenscheibe und der Ausbildung der Spannverankerung unter Langzeiteffekten wurden während der Konstruktion gelöst und waren später auch Objekt von verschiedenen Versuchsaufbauten [22, 23].

Um das Verhalten der Struktur unter Langzeiteffekten und unter Erdbebeneinwirkung kontrollieren zu können, wurden modernste Sensoren installiert, die Beschleunigung, Spannkraft und Bewegung der Wände kontinuierlich messen [31].



a) Die Struktur in der Bauphase



b) Mit UFP-Bewehrung gekoppelte Wände; rechts ist die Verankerung des Spannstahls sichtbar

Abbildung 12: Dreistöckiges NMIT Gebäude mit Pres-Lam Wänden, Nelson, Neuseeland.

4.2. Carterton Events Centre

Das Multifunktionsgebäude in Carterton, 100 km nördlich der neuseeländischen Hauptstadt Wellington, war das zweite Gebäude, das mit der Pres-Lam Technologie errichtet wurde [32]. *Opus International Consultants* und *PTL* waren an der Planung der elf vorgespannten Wände aus Furnierschichtholz mit interner Bewehrung beteiligt.

Die Struktur dient nicht nur als Multifunktionsgebäude für die Stadt, sondern auch als Notunterkunft und Kommandozentrale im Katastrophenfall. Dies zeigt auch, dass diese Konstruktion zu einem erhöhten Anspruch an die Norm berechnet werden kann.



a) Die Holzfachwerke der Konstruktion werden von den Holzwänden und Stahlstützen getragen



b) Fertiges Gebäude links im Hintergrund

Abbildung 13: Carterton Events Centre, Carterton, Neuseeland.

4.3. Nikau Gebäude

Als erstes Gebäude mit vorgespannten Rahmen wurde das Nikau Gebäude auf dem Campus der Versuchsanstalt BRANZ nahe Wellington gebaut. Das Gebäude wurde vom Architekturbüro *Warren and Mahoney* und den Ingenieuren von *Aurecon* und *PTL* geplant. Das einstöckige Gebäude besteht aus vorgespannten Rahmen, wobei der Spannstahl in Form von hochfesten MacAlloy Stäben die Träger durch die Stützen mit den Fundamenten verbindet. Um die geringere Festigkeit und Steifigkeit des Furnierschichtholzes rechtwinklig zur Faser zu umgehen, wurden beim Aufbau des blockverleimten Trägers Holzelemente um 90° verdreht als Verstärkung miteingebaut.



a) Rahmenkonstruktionen mit Dachpfetten

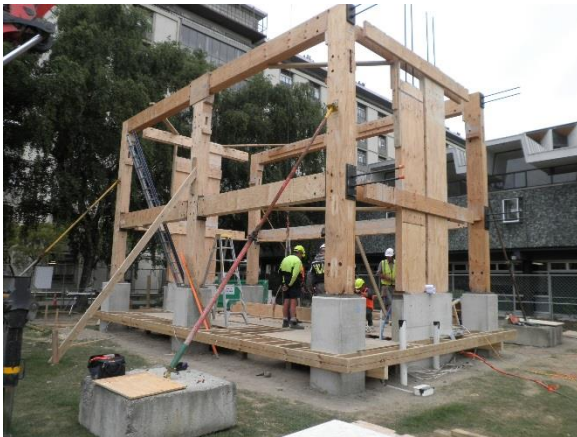


b) Fertiges Gebäude von innen

Abbildung 14: Nikau Gebäude auf dem BRANZ Campus, Judgeford, Neuseeland.

4.4. EXPAN Gebäude

Beim EXPAN Gebäude handelt es sich um dieselbe Struktur, die bereits als Versuchsaufbau im Labor getestet wurde [33]. Nach mehreren erfolgreichen Versuchen baute man das Gebäude ab und auf dem Campus der University of Canterbury als Bürogebäude und Musterhaus wieder auf. Das Gebäude im neuen Format wurde von *Thom Craig, Holmes Consulting Group* und *PTL* geplant. Das Gebäude wurde zusätzlich mit Beschleunigungsmessern und Kraftmessdosen ausgestattet, die das Verhalten des Gebäudes unter den vielen Nachbeben nach dem zerstörerischen Erdbeben in Februar 2011 dokumentiert haben. Das Gebäude wurde 2014 wieder abgebaut und wird in naher Zukunft wieder als Bürogebäude in der Innenstadt benutzt werden.



a) Struktur mit vorgespannten Rahmen und Wänden b) Fertiges Gebäude

Abbildung 15: EXPAN Gebäude auf dem Campus der University of Canterbury, Christchurch, Neuseeland.

4.5. Massey University College of Creative Arts

Das College of Creative Arts Gebäude an der Massey University in Wellington wurde von *Athfield Architects*, *Dunning Thornton Consultants* und *PTL* geplant und 2012 eingeweiht. Für dieses Gebäude wurden zum ersten Mal vorgespannte Rahmen mit umgeleitetem Spann Stahl verwendet, die nicht nur horizontalen Lasten standhalten, sondern auch der Durchbiegung unter vertikalen Lasten entgegenwirken. Der Spann Stahl wird sichtbar zwischen den Zwillingsträgern geführt und ist im Brandfall entbehrlich. Die Rahmen besitzen keine zusätzliche Bewehrung, da die Energiedissipation für diese Struktur in der untenliegenden Stahlbetonkonstruktion mit UPF-Bewehrung garantiert wird. Als Deckenelemente wurden vorgefertigte Holz-Beton-Verbundelemente eingesetzt.



a) Dreigeschossiger Rahmenaufbau im Bauzustand

b) Vorgespannter Holzträger mit externem Spann Stahl mit Umlenkblock

Abbildung 16: Massey University, College of Creative Arts, Wellington, Neuseeland.

4.6. Young Hunter Gebäude

Das Young Hunter Gebäude ist die erste Pres-Lam Struktur nach dem Erdbeben in Christchurch im Februar 2011. Geplant wurde das Gebäude von *Sheppard and Rout*, *Kirk Roberts* und *PTL*. Zudem wurde ein Rahmenknoten an der University of Canterbury getestet [34]. Die dreigeschossigen Pres-Lam Rahmen tragen vertikale, und in Trägerrichtung auch horizontale, Lasten ab. Rechtwinklig zu den Rahmen werden Horizontallasten durch eine Betonmauer (Wandscheibe) in die Fundamente eingeleitet. Die Rahmen wurden auf dem Boden liegend vorgespannt und als vorgefertigtes Element in Position gebracht. Die Vertikallasten werden über eine versteckte Stahlkonsole in die Stützen eingeleitet. Die Bewehrung an den Rahmenknoten und Stützenfüßen wurde sichtbar gelassen, da sowohl der Kunde wie auch der Architekt auf die neu eingesetzte Technologie aufmerksam machen wollten.



a) Dreigeschossiger Rahmenaufbau



b) Die Bewehrung an den Rahmenknoten und Stützenfüßen wurde in Sicht gelassen

Abbildung 17: Young Hunter Gebäude, Christchurch, Neuseeland.

4.7. Trimble Navigation

Das zweistöckige Gebäude von Trimble Navigation besteht aus einer Kombination aus Pres-Lam Rahmen und Wänden [35]. Die Planung wurde von *Opus International Consultants* in Zusammenarbeit mit *PTL* ausgeführt. Alle Wände sind mit je drei hochfesten MacAlloy Stäben vorgespannt. Die Rahmen sind durch die Träger im ersten Geschoss vorgespannt, die Träger in der Dachebene haben keine Vorspannung. An allen Knotenpunkten ist Stahlbewehrung angebracht. Auch hier wurden alle wesentlichen Elemente des Pres-Lam Systems sichtbar gelassen. Trimble hat als Hersteller von Sensoren das gesamte Gebäude mit hochmodernen Messgeräten ausgestattet. Mit diesen kann nicht nur das Verhalten der Struktur für Forschungszwecke analysiert werden, sondern es teilt den Benutzern durch einen komplexen Algorithmus mit, ob das Gebäude nach einem Erdbeben Schäden erlitten hat und gegebenenfalls evakuiert werden muss.



a) Skelett aus vorgespannten Wänden und Rahmen



b) Gekoppelte Wände mit sichtbarer Bewehrung und Verbindungsmuffen der Spannstäbe

Abbildung 18: Trimble Navigation, Christchurch, Neuseeland

4.8. Kaikoura District Council

Das dreistöckige Gebäude der Bezirksverwaltung von Kaikoura, Neuseeland beherbergt ein Museum, eine Bücherei und die Büros der lokalen Verwaltung. Geplant wurde das Gebäude von *Design Base*, *Nelson Timber Solutions* und *PTL*. Die Struktur besteht aus vorgespannten Wänden zur Abtragung von vertikalen und horizontalen Lasten. Die Wände wurden aus einer speziellen Variante von Brettspertholz hergestellt, in welcher Furnierschichtholz in Regionen mit Spannungskonzentrationen zur Verstärkung mit eingeleimt wurde. Weitere Träger und Stützen aus Furnierschichtholz tragen die Geschossdecken aus Holz. Alle Wände sind mit austauschbarer Bewehrung versehen.



a) Installation der Brettsperrholzwände

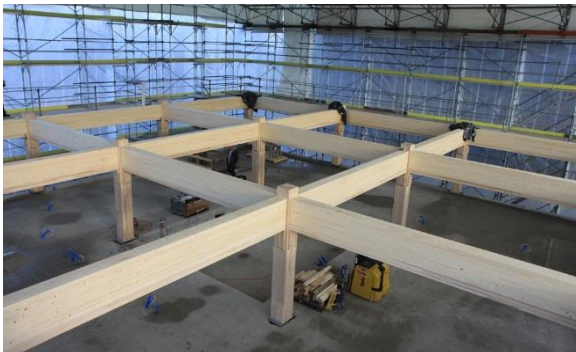


b) Fertiges Gebäude mit Fassadenstruktur aus Holz, die einen Langustenkäfig nachbilden soll (Quelle: www.stuff.co.nz)

Abbildung 19: Kaikoura District Council, Kaikoura, Neuseeland.

4.9. ETH House of Natural Resources

Das House of Natural Resources an der ETH Zürich wurde als erstes Gebäude mit Pres-Lam außerhalb Neuseeland im Jahr 2015 eröffnet [36]. Der zweistöckige Holzaufbau, der auf zwei Stockwerken aus Beton steht, wurde von mehreren Instituten der ETH geplant und wird als Versuchsaufbau und Büro benutzt. Neben den vorgespannten Holzrahmen aus Brettchichtholz mit lokaler Verstärkung aus Laubholz wurden im Gebäude weitere innovative Bausysteme wie eine Verbunddecke mit Buchenurnierschichtholz, eine Hohlkasten- decke und eine Laubholzdecke mit bi-axialer Lastabtragung eingebaut. Das Verhalten des Gebäudes wird kontinuierlich mit mehreren Sensoren erfasst und soll dazu dienen, die Verformung der Rahmen langfristig zu überwachen [37].



a) Vorgespannte Rahmen aus Brettchichtholz mit lokaler Verstärkung aus Laubholz



b) Fertiges Gebäude

Abbildung 20: House of Natural Resources, Zürich, Schweiz (Quelle: www.honr.ethz.ch).

4.10. Weitere Pres-Lam Gebäude

Weitere nennenswerte Gebäude aus Pres-Lam sind das St. Elmos Courts in Christchurch, das aus vorgespannten Rahmen aus Holzträgern mit Betonstützen besteht und auf Erdbebenisolatoren steht, sowie das Feuerlabor von Sumitomo Forestry in Tsukuba, Japan, das komplett aus Holz gebaut wurde. Zwei weitere Gebäude mit Pres-Lam Technologie sind in der Planungsphase und werden in Kürze in Christchurch, beziehungsweise in Corvallis, Oregon errichtet.

5. Ausblick

Mit 12 Jahren an Forschungs- und Entwicklungsarbeit und 12 gebauten Projekten ist die Pres-Lam Technologie mit vorgespannten Trägern, Stützen, Rahmen und Wänden aus Brett- und Furnierschichtholz sowie aus Brettsperrholz zu einem ausgereiften und weltweit anerkannten Bausystem geworden. Mit der stetig steigenden Nachfrage nach mehrgeschossigen Holzbauten, die mit möglichst filigranen Bauteilen hohen Wind- und Erdbebenlasten standhalten sollen, zeigt Pres-Lam ein sehr hohes Potential im modernen Ingenieurholzbau. Der vor kurzem vollzogene Erwerb des patentierten Pres-Lam Systems

durch *FPInnovations* in Kanada und den USA, sowie ein Forschungsprojekt der *National Science Foundation* [11] werden der Technologie weiteren Aufschwung in Nordamerika verleihen und neben dem erwähnten Projekt sicherlich die Errichtung weiterer Bauten mit sich bringen.

Der Autor und seine Kollegen bei *PTL | Structural Timber Consultants* werden sich weiterhin bemühen, Pres-Lam weiterzuentwickeln und Bauherren robuste und resiliente Bauwerke zu liefern.

6. Danksagung

An dieser Stelle sei allen Studenten, Forschern, Professoren, Technikern und Mitarbeitern gedankt, die über die letzten Jahre an der Entwicklung des Pres-Lam Systems beteiligt waren. Speziell hervorgehoben werden Andy Buchanan, Stefano Pampanin und Alessandro Palermo, welche das System erfunden haben und an deren Entwicklung maßgeblich beteiligt waren. Auch erwähnt werden soll die gute Zusammenarbeit mit den Bauherren, Architekten und Ingenieuren, die den Bau der vielen Pres-Lam Gebäude vorangebracht und hilfreiches Feedback mit Verbesserungsvorschläge geliefert haben. Abschließend seien auch der University of Canterbury und der *Structural Timber Innovation Company STIC* für die finanzielle Unterstützung gedankt.

7. Literatur

- [1] N. Priestley, S. Sritharan, J. Conley, and S. Pampanin. Preliminary Results and Conclusions from the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building. *PCI Journal* 44(6): 42-67, 1999.
- [2] C. Christopoulos, R. Tremblay, H.-J. Kim, and M. Lacerte. Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation. *Journal of Structural Engineering* 134(1): 96-107, 2008.
- [3] A. Palermo, S. Pampanin, A. Buchanan, and M. Newcombe. Seismic Design of Multi-Storey Buildings using Laminated Veneer Lumber (LVL). *New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*. Wairakei, New Zealand, 2005.
- [4] A. Buchanan, B. Deam, M. Fragiaco, S. Pampanin, and A. Palermo. Multi-Storey Prestressed Timber Buildings in New Zealand. *Structural Engineering International* 18(2): 166-173, 2008.
- [5] M. Newcombe. Beam to Column and Wall to Foundation Tests with Internal Dissipaters. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2005.
- [6] T. Smith, S. Pampanin, D. Carradine, A. Buchanan, F. Ponzo, A.D. Cesare, and D. Nigro. Experimental Investigations into Post-Tensioned Timber Frames with Advanced Damping Systems. *XIV Convegno di Ingegneria Sismica, Associazione Nazionale di Ingegneria Sismica*. Bari, Italy, 2011.
- [7] A. Dunbar, D. Moroder, S. Pampanin, and A.H. Buchanan. Timber Core-Walls for Lateral Load Resistance of Multi-Storey Timber Buildings. *World Conference on Timber Engineering*. Quebec, Canada, 2014.
- [8] T. Smith, F. Sarti, G. Granello, J. Marshall, V. Buckton-Wishart, M. Li, A. Palermo, and S. Pampanin. Long-term dynamic characteristics of a Pres-Lam Structure. *World Conference on Timber Engineering*. Vienna, Austria, 2016.
- [9] F. Wanninger, and A. Frangi. Experimental Analysis of a Post-tensioned Timber Connection. *Materials and Joints in Timber Structures*. S. Aicher, H. W. Reinhardt and H. Garrecht, Springer Netherlands. 9: 57-66, 2014.
- [10] R.S. Ganey. Seismic Design and Testing of Rocking Cross Laminated Timber Walls. *PhD Thesis*, University of Washington, Washington, WA, 2015.
- [11] National Science Foundation. A Resilience-based Seismic Design Methodology for Tall Wood Buildings, Arlington, Virginia, 2016.
- [12] A. Palermo, S. Pampanin, M. Fragiaco, A.H. Buchanan, and B.L. Deam. Innovative Seismic Solutions for Multi-Storey LVL Timber Buildings. *World Conference on Timber Engineering*, Portland, USA, 2006.
- [13] T. Smith. Work performed during summer research scholarship on LVL beam column joint. *Post-Tensioned Lab Test Report*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.
- [14] T. Smith. LVL Rocking Shear Walls: with External Dissipater Attachment. *3rd Professional Year Project*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.

- [15] A. Iqbal, T. Smith, S. Pampanin, M. Fragiaco, A. Palermo, and A.H. Buchanan. Experimental Performance and Structural Analysis of Plywood-Coupled LVL Walls. *Journal of Structural Engineering* 142(2): 04015123, 2016.
- [16] D. Marriott. The Development of High-Performance Post-Tensioned Rocking Systems for the Seismic Design of Structures. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2009.
- [17] M.P. Newcombe, S. Pampanin, and A.H. Buchanan. Experimental Testing of a Two-Storey Post-Tensioned Timber Building. *9th US National & 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Toronto, Canada, 2010.
- [18] D.M. Pino, S. Pampanin, D. Carradine, B. Deam, and A.H. Buchanan. Dynamic Response of a Multi-Storey Post-Tensioned Timber Building. *World Conference on Timber Engineering*. Riva del Garda, Trentino, Italy, 2010.
- [19] T. Smith. Post-tensioned Timber Frames with Supplemental Damping Devices. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2014.
- [20] T. Smith, F.C. Ponzio, A. Di Cesare, S. Pampanin, D. Carradine, A.H. Buchanan, and D. Nigro. Post-Tensioned Glulam Beam-Column Joints with Advanced Damping Systems: Testing and Numerical Analysis. *Journal of Earthquake Engineering* 18(1): 147-167, 2014.
- [21] W.A. van Beerschoten. Structural Performance of Post-tensioned Timber Frames under Gravity Loading. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2013.
- [22] F. Sarti. Seismic Design of Low-Damage Post-Tensioned Timber Wall Systems. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2015.
- [23] D. Moroder. Floor diaphragms in multistorey timber buildings. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2016.
- [24] D. Moroder, F. Sarti, A. Palermo, S. Pampanin, and A.H. Buchanan. Seismic design of floor diaphragms in post-tensioned timber buildings. *World Conference on Timber Engineering*. Quebec, Canada, 2014.
- [25] R.S. Costello. The Fire Performance of Post-Tensioned Timber Buildings. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2013.
- [26] P. Spellman, D. Carradine, A. Abu, P. Moss, and A. Buchanan. Full-scale fire tests of post-tensioned timber beams. *World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, 2012.
- [27] G. Granello, S. Giorgini, A. Palermo, and S. Pampanin. Post-tensioned LVL beams: experimental results and numerical modelling. *World Conference on Timber Engineering*. Vienna, Austria, 2016.
- [28] D. Yeoh, D. Carradine, A. Palermo, H. Morris, and R. Shrestha. Long Term Performance of Post-Tensioned LVL Frames and Walls. Structural Timber Innovation Company, Christchurch, New Zealand, August 2012, not published.
- [29] F. Wanninger, A. Frangi, and M. Fragiaco. Long-Term Behavior of Posttensioned Timber Connections. *Journal of Structural Engineering* 141(6): 04014155, 2015.
- [30] C.P. Devereux, T.J. Holden, A.H. Buchanan, and S. Pampanin. NMIT Arts & Media Building - Damage Mitigation Using Post-tensioned Timber Walls. *Pacific Earthquake Engineering Conference*. Auckland, New Zealand, 2011.
- [31] H.W. Morris, M. Wang, and X. Zhu. The long term instrumentation of the NMIT Arts Building - EXPAN shear walls. *New Zealand Timber Design Journal* 20(1): 13-24, 2011.
- [32] D. Dekker, and S. Chung. Carterton Events Centre Auditorium Pres-Lam Wall Design and Construction. *New Zealand Conference of Earthquake Engineering*. Christchurch, New Zealand, 2012.
- [33] M.P. Newcombe. Lateral Force Design of Post-Tensioned Timber Frame and Wall Buildings. *PhD Thesis*, University of Canterbury, Christchurch, 2011.
- [34] T. Armstrong, T. Smith, A. Buchanan, and S. Pampanin. Seismic Detailing of Post-Tensioned Timber Frames. *World Conference on Timber Engineering*. Quebec City, Canada, 2014.
- [35] A. Brown, J. Lester, S. Pampanin, and D. Pietra. Pres-Lam in Practice: A Damage-Limiting Rebuild Project. *SESOC Conference* Auckland, New Zealand, 2012.
- [36] A. Frangi. Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz - ETH House of Natural Resources. *Internationales Holzbau-Forum IHF*. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2014.
- [37] C. Leyder, E. Chatzi, and A. Frangi. Structural Health Monitoring of an Innovative Timber Building *Second International Conference on Performance-based and Lifecycle Structural Engineering*. Brisbane, Australia, 2015.