

Erkenntnisse und Empfehlungen zur Erdbebensicherheit von Blockbauten

Lukas Furrer, Prof. Martin Geiser
Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Innosuisse-Projekts «Veta/Nova – Gebäudeerneuerung Oberwallis» wurden insgesamt acht Leitfäden zu unterschiedlichen Themen betreffend Realisierung von Bauvorhaben erarbeitet. Das Ziel des Projekts war die Vereinfachung und Vereinheitlichung von Planungs- und Bewilligungsprozessen und die Erarbeitung von Musterlösungen beim Umbau von historischen Gebäuden. In diesem Beitrag werden die Untersuchungen zum Arbeitspaket 4 Erdbebensicherheit und die wichtigsten Erkenntnisse daraus zusammengefasst dargestellt. Im Leitfaden (Furrer, Geiser und Dany-Cavasin, 2022) werden Grundsätze zur Projektierung hinsichtlich der Erdbebensicherheit von historischen Gebäuden aufgezeigt. Des Weiteren werden die Einwirkungen aus Erdbeben, die Verteilung der Erdbebenkräfte auf die aussteifenden Blockwände und der Tragwiderstand von Blockwänden gegenüber Horizontallasten behandelt und schliesslich werden Massnahmen zur Verstärkung und Verankerung der Wände vorgeschlagen. Dieser Tagungsbeitrag kann als Zusammenfassung der zentralen Forschungsarbeiten betrachtet werden. Der komplette Leitfaden inklusive Berechnungsbeispiel ist auf der Website des Projekts «Veta/Nova» frei als PDF verfügbar (www.vetanova.ch).

Hinsichtlich der Erdbebeneinwirkungen lag der Fokus auf der korrekten Ermittlung der Grundschiwingzeit und auf der Dämpfung, welche für die Ermittlung der Erbebenkräfte angesetzt werden können. Im Rahmen des Projekts wurden Ambient Vibration Measurements (AVM) an zehn Walliser Blockbauten durchgeführt. Das Ziel dieser Messkampagne lag insbesondere darin, die dynamischen Eigenschaften der Gebäude zu untersuchen und schliesslich Vorschläge für die korrekte Ermittlung der Grundschiwingzeit, welche für die Berechnung der Erdbebenkräfte benötigt wird, zu machen. An einem der zehn Gebäude wurden zusätzlich zu den Messungen Ausschwingversuche durchgeführt, um die dynamischen Eigenschaften bei grossen Auslenkungen zu untersuchen, wobei das Augenmerk insbesondere auf der Dämpfung und der Grundschiwingzeit gelegen hat.

Zum Thema Tragwiderstand von Blockwänden wurden Untersuchungen hinsichtlich der Gleitreibung und Verstärkungen der Wände durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen resultieren in Vorschlägen für die Reibung, welche rechnerisch angesetzt werden kann und für Verstärkungsmassnahmen mit Schrauben, die den Tragwiderstand gewährleisten sollen.

2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

2.1 Untersuchungen zu den Erdbebeneinwirkungen

Um Erkenntnisse zu den dynamischen Eigenschaften von Walliser Blockbauten zu gewinnen, wurden unterschiedliche Untersuchungen an bestehenden Gebäuden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichen es, die Erdbebenkräfte korrekt zu ermitteln, da wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Grundschiwingzeit und der Dämpfung der Gebäude haben gewonnen werden können. Einerseits sind Ambient Vibration Measurements (AVM) an zehn Blockbauten unterschiedlicher Ausprägung durchgeführt worden, woraus man auf die dynamischen Eigenschaften von Gebäuden dieser Bauweise schliessen kann. Andererseits sind an einem der zehn Gebäude Ausschwingversuche gemacht worden, wodurch die dynamischen Eigenschaften bei grossen Amplituden, wie sie bei einem Erdbeben zu erwarten sind, untersucht werden konnten. Im Folgenden werden diese Untersuchungen beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse präsentiert.

2.1.1 Ambient Vibration Measurements

Die AVM-Kampagne beinhaltete Messungen an insgesamt zehn unterschiedlichen Blockbauten. Die untersuchten Gebäude sind auf der Karte in Abbildung 1 dargestellt und unterscheiden sich in Alter, Dimensionen, Gebäudetypus und Ausbaustatus. Das Ziel der Messkampagne bestand darin, die dynamischen Eigenschaften bei sehr kleinen Auslenkungen (ambient vibrations) zu untersuchen. Aus den Messungen kann auf die Grundschiwingzeit, Schwingungsformen und auf die Dämpfung geschlossen werden, wobei Grundschiwingzeit und Dämpfung bei sehr kleinen Amplituden grundsätzlich kleiner sind als bei grossen Auslenkungen, wie sie im Fall eines Erdbebens zu erwarten sind.

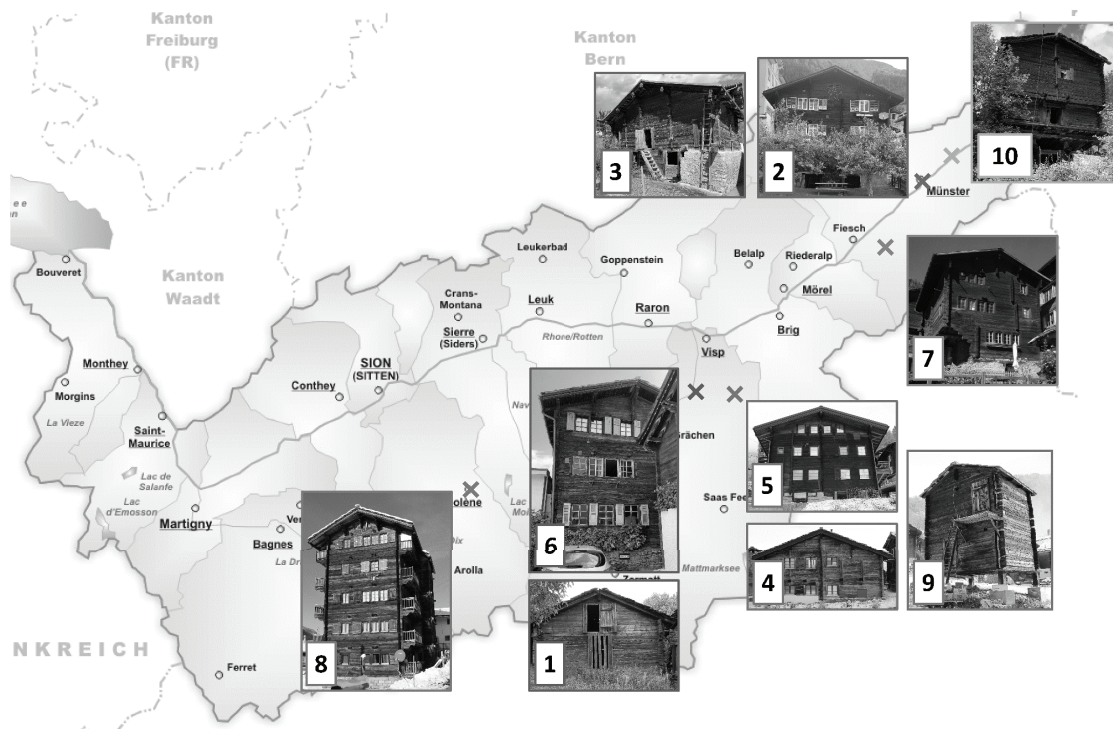


Abb. 1: Karte des Kantons Wallis mit den Gebäuden der AVM-Kampagne

2.1.2 Ausschwingversuche

Gemäss Oberbach (2021) beträgt die Grundschiwingzeit bei Gebäuden in Stahlbeton-, Mauerwerks- oder Holzrahmenbauweise bei grossen Auslenkungen rund das 1.5-fache der bei AVM gemessenen Grundschiwingzeit $T_{1,AVM}$ und auch die Dämpfung ist von der Auslenkung abhängig. Um die dynamischen Eigenschaften von Blockbauten bei grossen Auslenkungen zu ermitteln, welche für die Berechnung der Erdbebenkräfte verwendet werden, wurden am Gebäude 1 neben den AVM auch Ausschwingversuche durchgeführt. Das Ziel dieser Versuche lag darin, durch das Erzeugen grosser Auslenkungen an einem realen Gebäude auf den Faktor zur Berücksichtigung grosser Amplituden zu schliessen und die rechnerisch anzusetzende Dämpfung zu ermitteln.

Der Versuchsaufbau ist auf der Abbildung 2 dargestellt. Bei den Ausschwingversuchen wurde mithilfe eines Habeggens an dem First des Gebäudes gezogen, wobei zwischen dem Habegger und der Kraftmessdose der Auslösemechanismus angebracht worden war. Der Auslösemechanismus bestand aus jeweils einer Gewindestange mit zwei Ringmuttern an beiden Enden, wobei die Gewindestange mit einer Einschnürung versehen worden war, deren Durchmesser die Kraft bei der Auslösung bestimmte. Bei jedem neuen Versuch wurde also eine neue Gewindestange angebracht, wobei pro Kraftstufe (8 kN, 16 kN, 24 kN, 32 kN, 40 kN und 48 kN) jeweils drei Versuche durchgeführt wurden. An der Rückseite des Gebäudes wurde an sechs Stellen die Verschiebung mit gefederten Wegaufnehmern gemessen; an beiden Seitenwänden jeweils oben und unten, an dem First und am Mauerwerk als Referenz. Das Dach war vor den Versuchen mit Holzbrettern und Windrispenbändern wie auf der Abbildung 2 mit den Kreuzen angedeutet verstärkt worden, sodass eine ausreichende Scheibenwirkung gewährleistet war und die Kräfte auf die Seitenwände geleitet werden konnten.

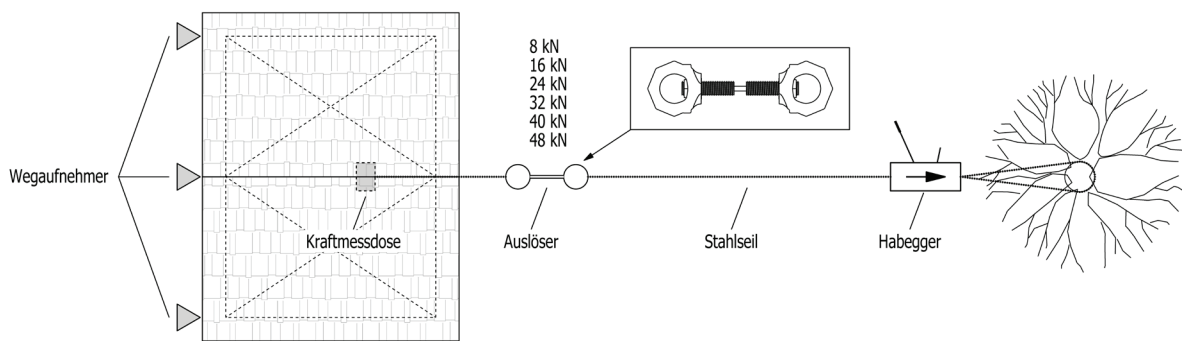


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

2.1.3 Ergebnisse Erdbebeneinwirkungen

In der Tabelle 1 sind die aus der AVM-Kampagne resultierenden ($T_{1,AVM}$) und die abgeschätzten Grundschnitzzeiten ($T_{1,est}$) aufgelistet. Die Schätzformel gemäss kanadischer Norm NBCC (2010) zur Ermittlung der Grundschnitzzeit lautet wie folgt:

$$T_{1,est} = 0,05 \cdot h^{0,75} \quad \text{mit } h = \text{Gebäudehöhe ab Einbindungshorizont}$$

Für fast alle Gebäude gibt es eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit der abgeschätzten Grundschnitzzeit. Nur bei den Gebäuden, welche auf Stützen stehen (Gebäude 3 und 4), ist die Grundschnitzzeit nach Schätzformel kleiner als die gemessene.

Tab. 1: Vergleich der gemessenen und der abgeschätzten Grundschnitzzeiten. Hervorgehoben wird die Spalte des Gebäudes 1, an dem zusätzlich Ausschwingversuche durchgeführt wurden.

Gebäude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{1,AVM}$ [s]	0,16	0,16	0,17	0,20	0,17	0,20	0,24	0,37	0,27	0,32
$T_{1,est}$ [s]	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,22	0,37	0,19	0,22

Die beiden Diagramme der Abbildung 3 stellen die Ergebnisse aus den AVM und den Ausschwingversuchen an Gebäude 1 zusammenfassend dar. Links dargestellt ist die mittlere Grundschnitzzeit und rechts die mittlere Dämpfung, jeweils in Abhängigkeit der Auslenkung. Eine Auslenkung von 100 % entspricht einer Auslenkung unter Erdbebeneinwirkung $F_d = 43$ kN gemäss Norm SIA 261:2020 (Baugrundklasse B, Erdbebenezone z3b) und eine Auslenkung von 0 % bezieht sich auf die bei den AVM ermittelten Werten. Die Grundschnitzzeit wie auch die Dämpfung steigen mit zunehmender Auslenkung.

Bei 100 % Auslenkung hat sich eine effektive Grundschnitzzeit T_1 von rund 0,20 s ergeben. Die mit AVM ermittelte Grundschnitzzeit ($T_{1,AVM} = 0,16$ s) kann daher mit dem Faktor 1,2 multipliziert werden, um auf die Grundschnitzzeit bei grossen Amplituden zu schliessen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der AVM-Ergebnisse und der Grundschnitzzeiten gemäss Schätzformel und unter Berücksichtigung grosser Amplituden kann die Grundschnitzzeit für Blockbauten wie folgt ermittelt werden:

$$T_1 = 1,2 \cdot 0,05 \cdot h^{0,75} \quad \text{mit } h = \text{Gebäudehöhe ab Einbindungshorizont}$$

Die viskose Dämpfung von 5 %, wie sie gemäss Norm SIA 261 (2020) üblicherweise für die Ermittlung der Erdbebenekräfte verwendet wird, scheint die Dämpfung bei Blockbauten deutlich zu unterschätzen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Dämpfung bei 100 % Auslenkung deutlich höher ist als die von der Norm vorgegebenen 5 %.

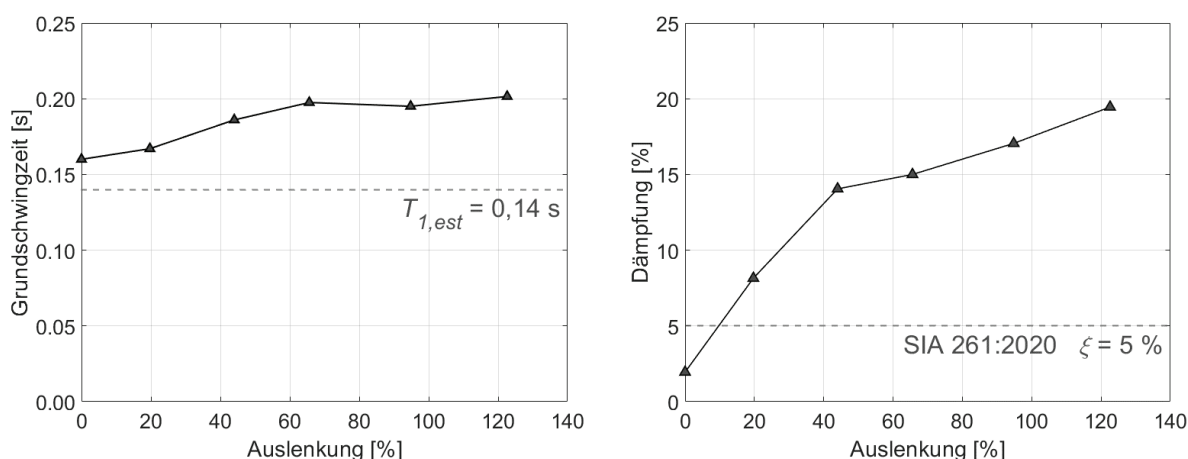


Abb. 3: Ergebnisse der Ausschwingversuche hinsichtlich der Grundschwingzeit (links) und Dämpfung (rechts) in Abhängigkeit der Auslenkung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Grundschwingzeit von Blockbauten werden auf der Abbildung 4 zusammengefasst dargestellt. Für die Gebäude 1 bis 8 kann eine gute Übereinstimmung der aus den AVM resultierenden Grundschwingzeiten mit den Grundschwingzeiten nach Schätzformel festgestellt werden. Bei den Gebäuden 9 und 10, welche auf Stützen stehen, liegt die gemessene Grundschwingzeit deutlich höher. Allerdings ist die geringe Steifigkeit im untersten Teil des Gebäudes hinsichtlich der Erdbebensicherheit problematisch, sodass bei solchen Gebäuden in der Regel Massnahmen nötig sind, um diese weichen Geschosse auszusteifen. Die Formel $T_1 = 1,2 \cdot 0,05 \cdot h^{0,75}$ liefert für Blockbauten plausible Grundschwingzeiten für die Ermittlung der Erdbebenkräfte. Die obere gestrichelte Linie steht für die Obergrenze von $2 \cdot T_{1,est}$ (prEN 1998-1-1, 2022).

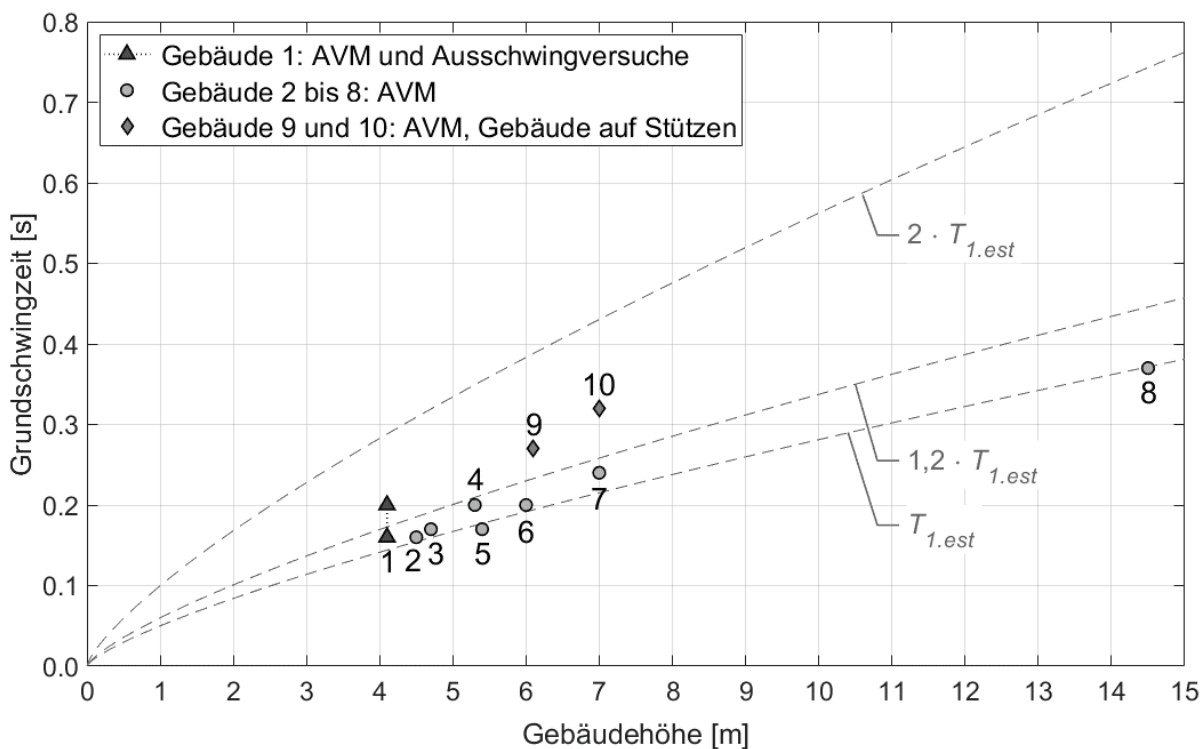


Abb. 4: Untersuchungsergebnisse zur Grundschwingzeit der untersuchten Gebäude

2.2 Untersuchungen zum Tragwiderstand

Der horizontale Tragwiderstand einer Blockwand setzt sich zusammen aus der Reibung zwischen den Blöcken, der Verkämmung («Gwätt»), der Verdübelung und allfälligen Verstärkungen. Der teilweise schlechte Zustand der Verkämmung und Unsicherheiten betreffend Anzahl und Art der Verdübelung verlangen eine fallweise Beurteilung durch den zuständigen Ingenieur. Die Reibung kann einen beachtlichen Beitrag zum Tragwiderstand leisten, wobei die vertikale Erdbebenkomponente berücksichtigt werden muss. Da der Tragwiderstand aus der Reibung nicht immer für die Kraftübertragung ausreicht, besteht die Möglichkeit, die Scherfugen mit querbelasteten Schrauben zu verstärken. Untersuchungen an der BFH haben gezeigt, dass der Tragwiderstand aus der Reibung mit dem Tragwiderstand der Schrauben addiert werden kann. Diese Untersuchungen werden im Folgenden erläutert und die Erkenntnisse daraus zusammengefasst.

2.2.1 Versuche Reibung und Verstärkung von Blockwänden

Im Rahmen von Untersuchungen zur Überprüfung von Holzbalkendecken in Bestandsbauten haben Wenk et al. (2020) Gleitreibungskoeffizienten für verschiedene Oberflächenbedingungen ermittelt. Die Autoren geben einen Bemessungswert für die Gleitreibung von Holz auf Mörtel von 0,4 und von gesägtem oder gehacktem Holz aufeinander von 0,3 an. Ein Ziel der Reibungsversuche an der BFH im Rahmen des Projekts Veta/Nova bestand darin, die bei Wenk et al. (2020) ermittelten Gleitreibungskoeffizienten an grösseren Prüfkörpern zu verifizieren, um einerseits zu ermitteln, ob es einen Volumeneffekt gibt. Andererseits sind die Prüfkörper nach den zyklischen Reibungsversuchen mit Holzschrauben mit Teilgewinde verstärkt worden, um zu ermitteln, welchen Einfluss die Reibung auf den Tragwiderstand einer verstärkten Wand hat. Das zweite Ziel bestand schliesslich darin, herauszufinden, ob der Tragwiderstand aus der Reibung mit dem Tragwiderstand der Schrauben addiert werden kann, um den gesamten horizontalen Tragwiderstand zu ermitteln.

Der Versuchsaufbau ist auf der Abbildung 6 dargestellt. Getestet wurde jeweils die gestrichelte Scherfuge zwischen die zwei dunkleren Balken, bei denen es sich um sägerohes Holz (Fichte/Tanne) handelte und welche einen Querschnitt von 120 mm x 150 mm aufwiesen. Beim unteren Teil handelt es sich um den Prüfaufbau, der nötig gewesen ist, damit die Prüfkörper gleichzeitig vertikal und horizontal haben belastet werden können.

Bei sämtlichen Versuchen wurde jeweils eine konstante Vertikalkraft F_v aufgebracht und die Horizontalkraft F_h unter vorgegebener Verschiebung gemessen. Der horizontale Zylinder ist dabei über den Weg gesteuert worden gemäss den Belastungsprotokollen, welche auf der Abbildung 5 dargestellt sind. Bei den Versuchen zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten wurde das links dargestellte Protokoll gemäss Steiger et al. (2018) verwendet. Pro Prüfkörper wurden jeweils vier zyklische Tests durchgeführt: Der erste mit einer Vertikalkraft F_v von 10 kN, der zweite mit 20 kN, der dritte mit 30 kN und schliesslich nochmals ein Versuch mit 10 kN. Das Ziel dabei lag einerseits darin, den Einfluss der Vertikalkraft auf die Reibung zu ermitteln, andererseits sollte untersucht werden, ob eine allfällige «Verseifung», also das Glattreiben der Fasern, zu einem niedrigeren Reibungskoeffizienten führt. Aus diesem Grund wurde am Schluss nochmals ein Versuch mit 10 kN Vertikalkraft durchgeführt, dessen Ergebnisse dann mit denen des jeweils ersten Tests verglichen werden konnten.

Bei den Versuchen mit Verstärkung der Scherfuge durch schräg eingedrehte, querbelastete Holzschrauben mit Teilgewinde wurde das auf der Abbildung 5 rechts dargestellte Protokoll gemäss SN EN12512:2001 angewandt. Das Gewinde der Holzschraube befand sich dabei jeweils nur in einem der beiden betrachteten Blöcke. Die Prüfkörper, an welchen zunächst wie oben beschrieben die vier Reibungsversuche durchgeführt worden waren, wurden daraufhin wie in der Abbildung 6 rechts dargestellt mit Holzschrauben verstärkt. Schliesslich wurden sie entweder mit einer Vertikalkraft von 10 kN oder 30 kN zyklisch getestet. Eine Scherfuge wurde also insgesamt fünf Mal getestet: Vier Mal zur Ermittlung des Reibungskoeffizienten und einmal mit Verstärkungen, um das Tragverhalten einer verstärkten Scherfuge unter unterschiedlicher Vertikalbelastung (10 kN oder 30 kN) zu untersuchen.

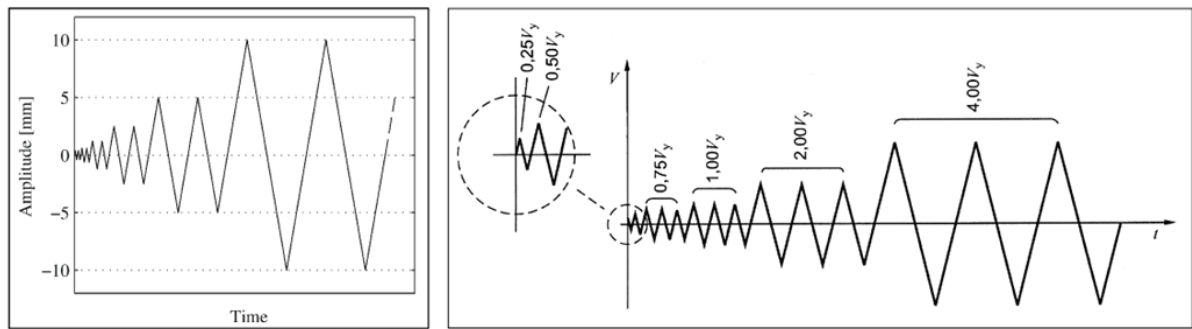


Abb. 5: Belastungsprotokolle für die zyklischen Versuche bezüglich Reibung (links) und Verstärkung (rechts)

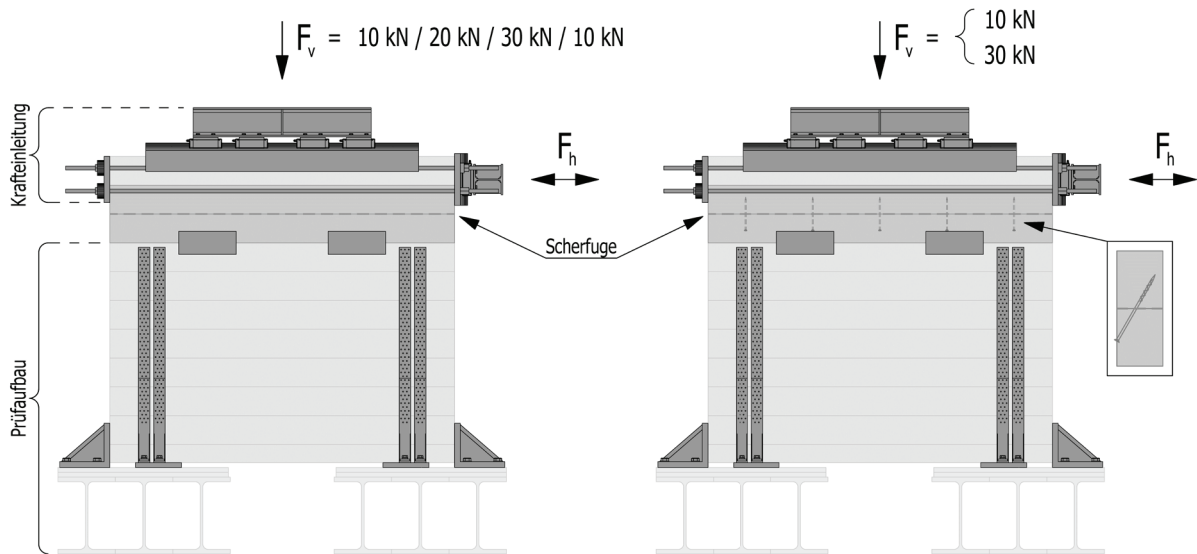


Abb. 6: Darstellung des Versuchsaufbaus für die Ermittlung der Reibung (links) und zur Untersuchung des Tragwiderstands mit Verstärkungen der Scherfuge (rechts)

2.2.2 Ergebnisse Tragwiderstand

Die Abbildung 7 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich der Gleitreibung aus den insgesamt sieben Prüfkörpern. Es hat sich gezeigt, dass die Gleitreibung bei höherer Vertikalkraft etwas kleiner geworden ist, allerdings deutlich weniger von 20 kN auf 30 kN als von 10 kN auf 20 kN. Dies deutet darauf hin, dass der Gleitreibungskoeffizient auch bei höherer vertikaler Belastung nicht massgeblich tiefer liegen würde. Im Mittel ist ein Gleitreibungskoeffizient μ von 0,64 ermittelt worden mit einer Standardabweichung von 0,05. Die Ergebnisse von Wenk et al. (2020) konnten somit auch bei Versuchen an grossen Prüfkörpern verifiziert werden. Es ist also angemessen, den von Wenk et al. (2020) angegebenen Bemessungswert der Gleitreibung zwischen zwei Blöcken $\mu_d = 0,3$ für die Ermittlung des Beitrags der Gleitreibung zum Tragwiderstand einer Blockwand zu verwenden.

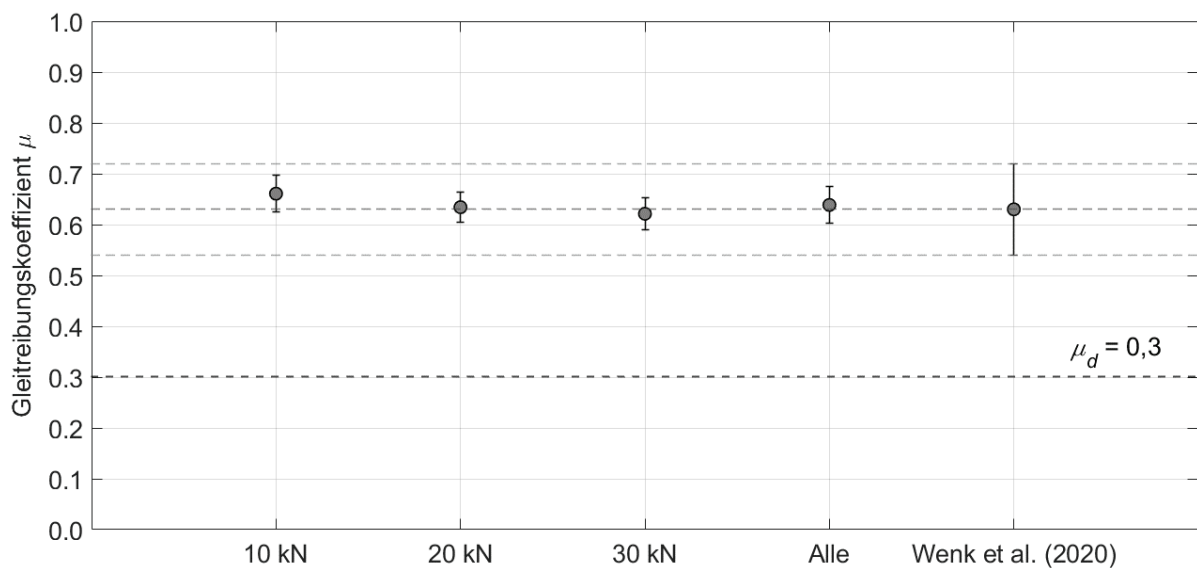


Abb. 7: Darstellung der Ergebnisse ($\mu \pm \sigma$) bezüglich Gleitreibungskoeffizienten bei unterschiedlicher vertikaler Belastung und Vergleich mit den Ergebnissen von Wenk et al. (2020).

Mit Verstärkungen durch Schrauben sind drei Prüfkörper mit einer Vertikalkraft F_v von 10 kN und zwei Prüfkörper mit einer Vertikalkraft F_v von 30 kN getestet worden. Die Scherfuge ist dabei bei allen fünf Prüfkörpern mit Holzschrauben verstärkt worden, wie in der Abbildung 6 rechts dargestellt. Die Grafik links auf der Abbildung 8 zeigt die Kraft-Verschiebungskurve eines Prüfkörpers, welcher bei einer Vertikalkraft F_v von 10 kN, die Grafik rechts die eines Prüfkörpers, welcher bei einer Vertikalkraft F_v von 30 kN getestet worden ist. Die Kraft beim Nulldurchgang F_0 ist die durchschnittliche Horizontalkraft, welche bei einer Verschiebung von 0 mm gemessen worden ist. ΔF bezeichnet die Differenz aus der Maximalkraft und der Kraft beim Nulldurchgang. Wie sich bei einem Vergleich der beiden Diagramme feststellen lässt, ist ΔF bei beiden Prüfkörpern in etwa gleich gross, während der Unterschied hinsichtlich des Tragwiderstands vor allem mit der unterschiedlichen Kraft beim Nulldurchgang erklärt werden kann. Diese Kraft ist beim rechts dargestellten Prüfkörper aufgrund der höheren Vertikalbelastung grösser, es zeigt sich also ein deutlicher Einfluss der Reibung auf den gesamten Tragwiderstand. Multipliziert man die Differenz der Vertikalkräfte ($30 \text{ kN} - 10 \text{ kN} = 20 \text{ kN}$) mit dem ermittelten Reibungskoeffizienten von 0,64, so erhält man etwa die Differenz zwischen F_0 bei 10 kN und 30 kN Vertikalkraft. Daraus lässt sich schliessen, dass der Tragwiderstand, welcher sich aus der Gleitreibung ergibt mit demjenigen der Verstärkung durch Schrauben aufaddiert werden kann, um den gesamten Tragwiderstand einer verstärkten Scherfuge zu ermitteln.

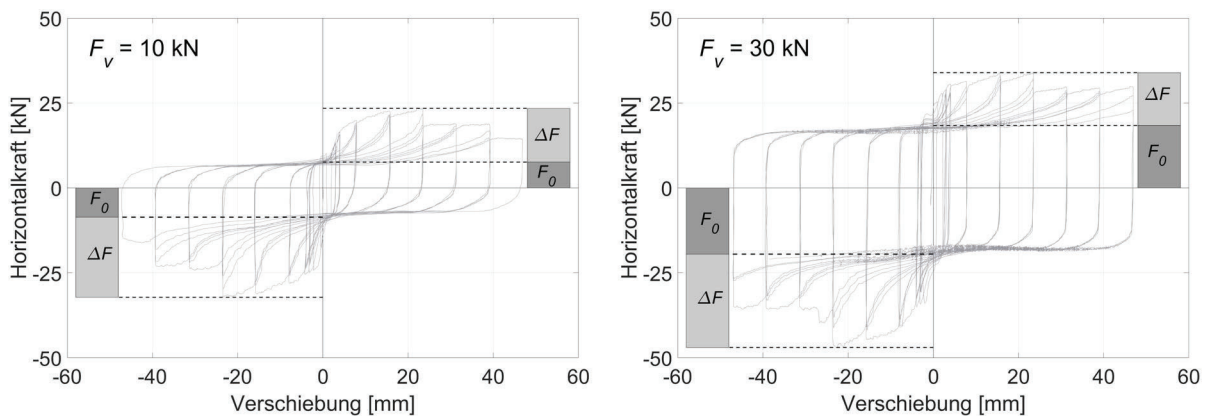


Abb. 8: Kraft-Verschiebungsdiagramme bezüglich Verstärkung mit Schrauben bei unterschiedlicher vertikaler Belastung; links: Vertikalkraft $F_v = 10 \text{ kN}$; rechts: Vertikalkraft $F_v = 30 \text{ kN}$

3 DANKSAGUNG

Ein Dank geht an alle beteiligten Personen, Institutionen, Arbeitsgruppen, fachlichen Stellen und Gremien sowie Unternehmen für die konstruktive Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die SRP Ingenieur AG, namentlich an Linda Dany-Cavasin, die an der Ausarbeitung des Leitfadens und insbesondere des Berechnungsbeispiels beteiligt gewesen ist.

4 REFERENZEN

- Eurocode 8 (2022) Design of structures for earthquake resistance - part 1: General rules and seismic action. CEN (prEN 1998-1-1)
- Furrer, L., Geiser, M. und Dany-Cavasin, L. (2022) Gebäudeerneuerung Oberwallis – Teil 5 Erdbebensicherheit. Biel: Berner Fachhochschule und Brig: ARGE Dorfkernerneuerung Oberwallis.
- NBCC. (2010). National Building Code of Canada. Ottawa: National Research Council Canada.
- Oberbach, U. (2021). Ermittlung der dynamischen Eigenschaften von mehrgeschossigen Holzrahmenbauten mittels Ausschwingversuch. Biel: Berner Fachhochschule.
- SIA 261:2020 Einwirkungen auf Tragwerke. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SN EN 12512 (2001), Timber Structures - Test methods – Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. CEN
- Steiger, R., Fink, G., Nerbano, S., & Hack, E. (2018). Experimental investigation of friction stresses between adjacent panels made of Oriented Strand Board (OSB) and between OSB Panels and glued laminated timber (GLT) frame members. *Materials and Structures* 51, 2.
- Wenk, T., Brunner, R., Pacheco de Almeida, J., & Beyer, K. (2020). Überprüfung bezüglich Erdbeben von Holzbalkendecken in Bestandesbauten. *Der Bauingenieur*, vol. 95, no. 4, S. 8-13.