

Hangmuren Einwirkungen – erste Projektergebnisse

Luuk Dorren¹, Albrecht von Bötticher², Christophe Dénervaud³, Thomas Egli⁴, Alexandra Erbach¹, Stephan Fricker⁵, Claudia Kurzböck⁴, Christine Moos¹, Dirk Proske⁵, Demian Schneider³

¹ BFH-HAFL, Zollikofen; ² SK&, Zürich; ³ Bundesamt für Umwelt BAFU; ⁴ Egli Engineering, St. Gallen; ⁵ BFH-AHB, Burgdorf; E-mail: luuk.dorren@bfh.ch

MAR 2025

In der Schweiz verursachen spontane Rutschungen und Hangmuren immer wieder hohe Infrastrukturschäden, Sperrungen kritischer Infrastrukturen, Evakuierungen sowie Todesfälle. Die Berechnung der möglichen Schäden von Hangmuren beruht auf einer Druckberechnungsformel wobei die Geschwindigkeit angegeben werden soll. Die Abschätzung der Geschwindigkeit des fließenden Materials bleibt aber eine Herausforderung für die Praxis. Zudem werden bei der Bewertung möglicher Schäden weder Baumaterial noch Bauweise berücksichtigt. Dieses Poster präsentiert das BAFU finanzierte Hangmuren Einwirkungen Projekt welches die Auswirkungen von Hangmuren auf Gebäude in der Schweiz untersuchte. Das Hauptziel dieses Projekts ist darum, die Einwirkungen von Hangmuren mit Bezug zum Schadenpotenzial genauer beurteilen zu können. Zum Erreichen dieses Hauptzieles haben wir die folgenden spezifischen Ziele definiert:

1. Entwicklung von Grundlagen für zukünftige Praxisempfehlungen zur Geschwindigkeitsabschätzung von Hangmuren
2. Erstellen von Grenzlastkurven für Hangmuren-Aufprälle je nach Bauweise und -Material
3. Überprüfung der verwendeten Druckformeln für Hangmuren u.a. in der SIA-Norm 261/1 mittels Druck- (gemessen oder nach Schäden rückgerechnet), Geschwindigkeit- und Fliesstiefe-Daten
4. Das liefern von Grundlagen für die Verbesserung von den bestehenden, eher statischer Prozess orientierten Hangmuren- Intensitätskriterien



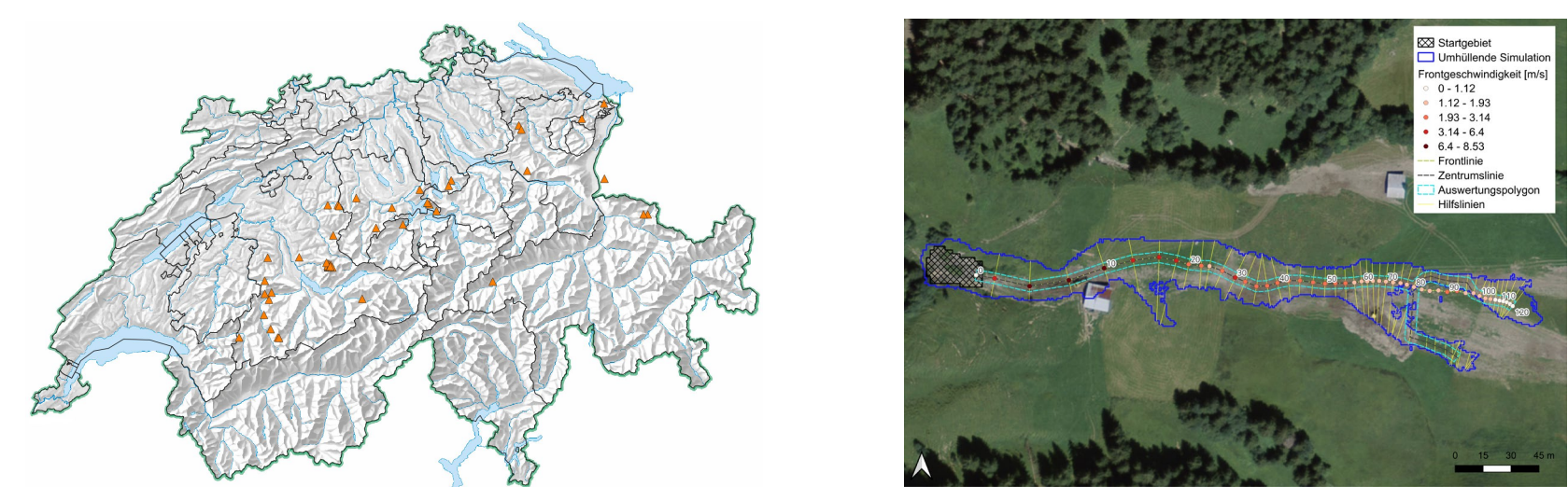
Schlussfolgerungen

- Die maximale Frontgeschwindigkeit der 94 simulierten Hangmurenereignisse variiert von 1.5 m/s bis 14.7 m/s, wobei der Median bei 6.3 m/s liegt. Die klassische Aussage, dass Hangmuren sich mit einer Geschwindigkeit von 4 bis 7 m/s bewegen sollte angepasst werden. Hangmuren bewegen sich i.d.R. mit Geschwindigkeiten zwischen 4 und 12 m/s.
- Die Frontgeschwindigkeit der Hangmuren korreliert stark mit Hangneigung, Wassergehalt und Feinanteil. Der Wassergehalt einer Hangmure ist schwierig vorherzusagen, aber Hangneigung lässt sich gut und Feinanteil mit etwas Aufwand in Bodenproben definieren. Die getestete statistische Modelle, v.a. das RF-Modell, können bei der Abschätzung der Frontgeschwindigkeit an einem gewissen Punkt entlang vom Auslaufprofil helfen.
- Für Gebäude in Gebieten mit mittleren Intensität Hangmurengefährdung soll mindestens im Erdgeschossbereich Stahlbeton verwendet werden.
- Die Analysen der Druckformeln haben gezeigt, dass die Formel von Scheidegger (1975) zukünftig für die Dimensionierung von Bauwerken zu bevorzugen ist, da sie eine bessere Vorhersagegenauigkeit zeigte als die Formel welche zurzeit in der SIA-Norm 261/1 verwendet wird.
- Eine Integration von den berechneten Drücken in den Intensitätskriterien für Hangmuren könnte dazu beitragen, die Lücke zwischen Theorie und Praxis zu schliessen. Die Grenzlastkurven der verschiedenen Bauweisen und -Materialien zeigen, dass die Verwendung der definierten Grenzwerte für Lawinen auch für Hangmuren sinnvoll scheinen zu sein.

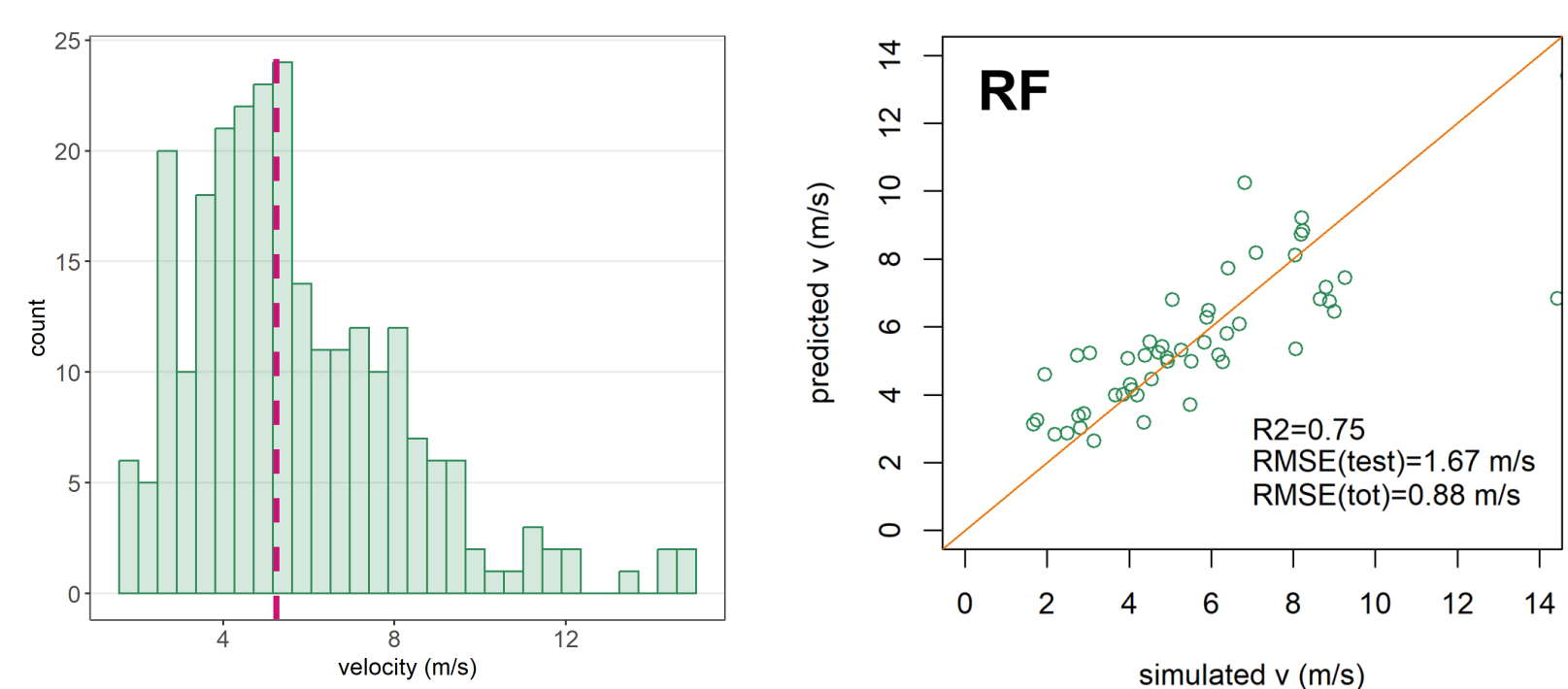
Methoden & Ergebnisse

1. Statistische Analyse von Hangmuren Geschwindigkeiten

Es wurde eine Datenbank mit historischen Ereignissen erstellt, welche gesamthaft 45 Hangmurenereignisse umfasst. Davon liegen 26 in BE, 7 in LU, jeweils 3 in GR und SG, jeweils 2 in AR und ZG sowie ein Ereignis in OW und eines im FL. Diese Ereignisse wurden mittels dem an der WSL und ETH entwickelten Hangmuren- und Murgangcode DebrisInter-Mixing nachsimuliert und die Frontgeschwindigkeit in 2,5 s Takt entlang der Auslaufbahn ausgewertet. Zusätzlich wurden dabei 23 Fälle mit verändertem Volumen und /oder Wassergehalt simuliert.

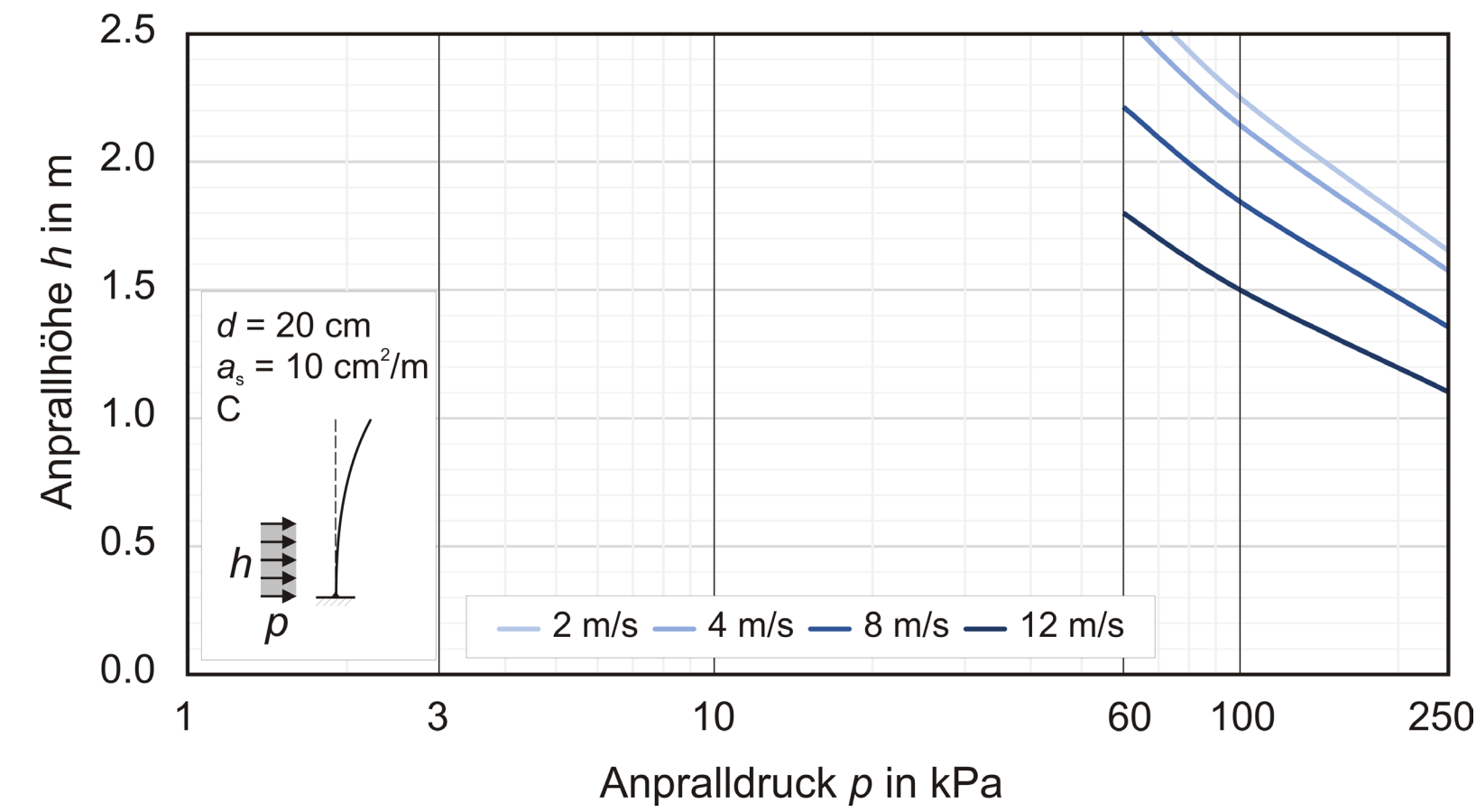


Die simulierten Frontgeschwindigkeiten wurden in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften (z.B. Wassergehalt, Tongehalt, Schüttwinkel) sowie Geländerparameter (z.B. Hangneigung, Krümmung) analysiert. Dabei wurden nur Frontgeschwindigkeiten > 1 m/s sowie ab einer zurückgelegten Distanz von 2 m berücksichtigt. Für die 94 simulierten Hangmuren entspricht dies 875 Auswertungspunkten. Generalized Linear Regression (GLM), Regression Tree (RT) und Random Forest (RF) wurden getestet um ein "Meta-Modell" zu entwickeln, das die Frontgeschwindigkeiten zuverlässig in Abhängigkeit der erklärenden Variablen vorhersagen kann.

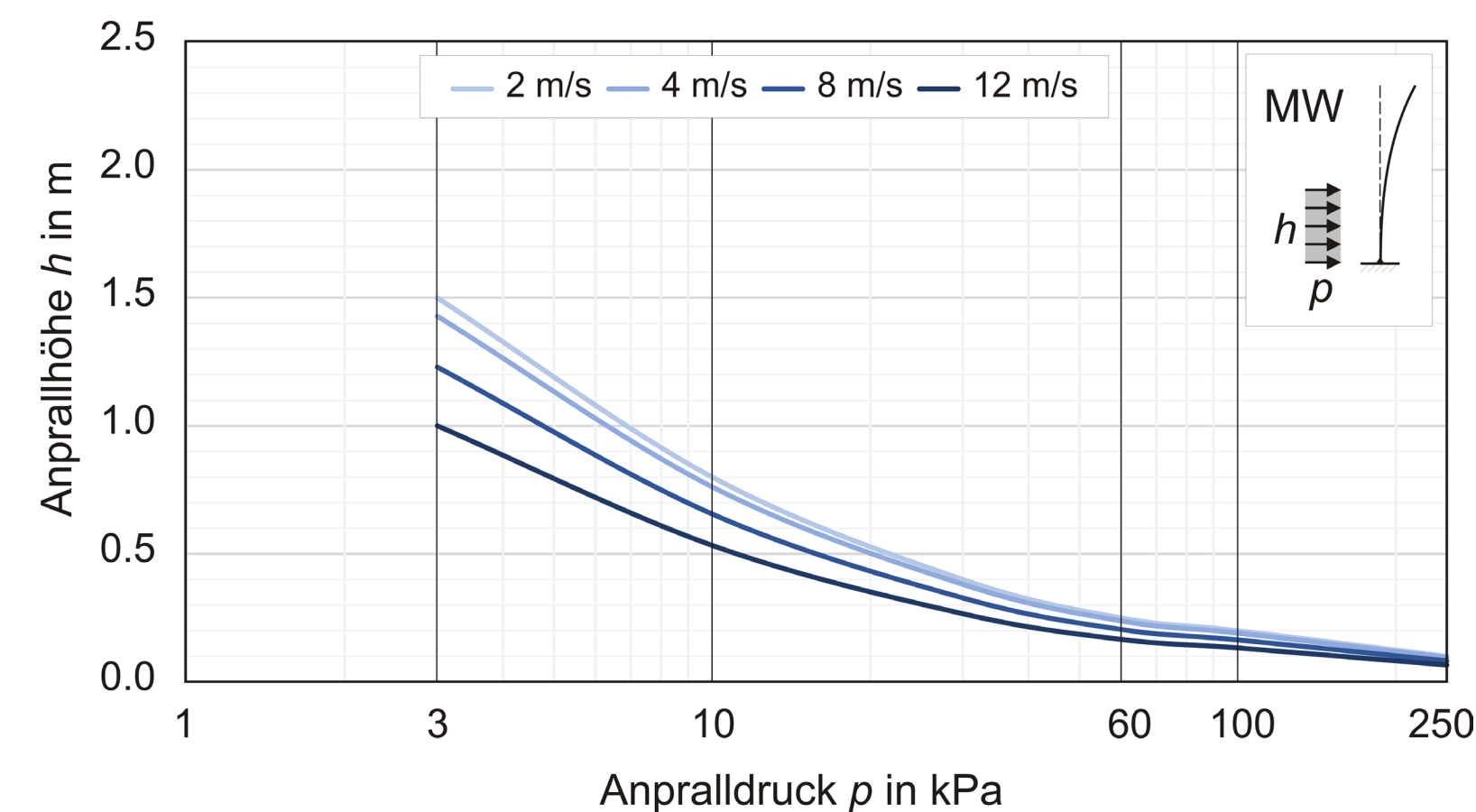


2. Grenzlastkurven nach Bauweise und -Material

Die Berechnungen zielen darauf ab, sogenannte **Grenzlastkurven** zu bestimmen, die die Anprallkraft und die maximale Anprallhöhe darstellen. Grundlage der Berechnungen sind statische Systeme für verschiedene Gebäudetypen sowie die Tragfähigkeitsanalyse von Konstruktionselementen, insbesondere der Wände, unter Berücksichtigung aktueller Schweizer Baunormen. Dabei wurden baustoffspezifische Normen für **Stahlbeton** (siehe hier unten),

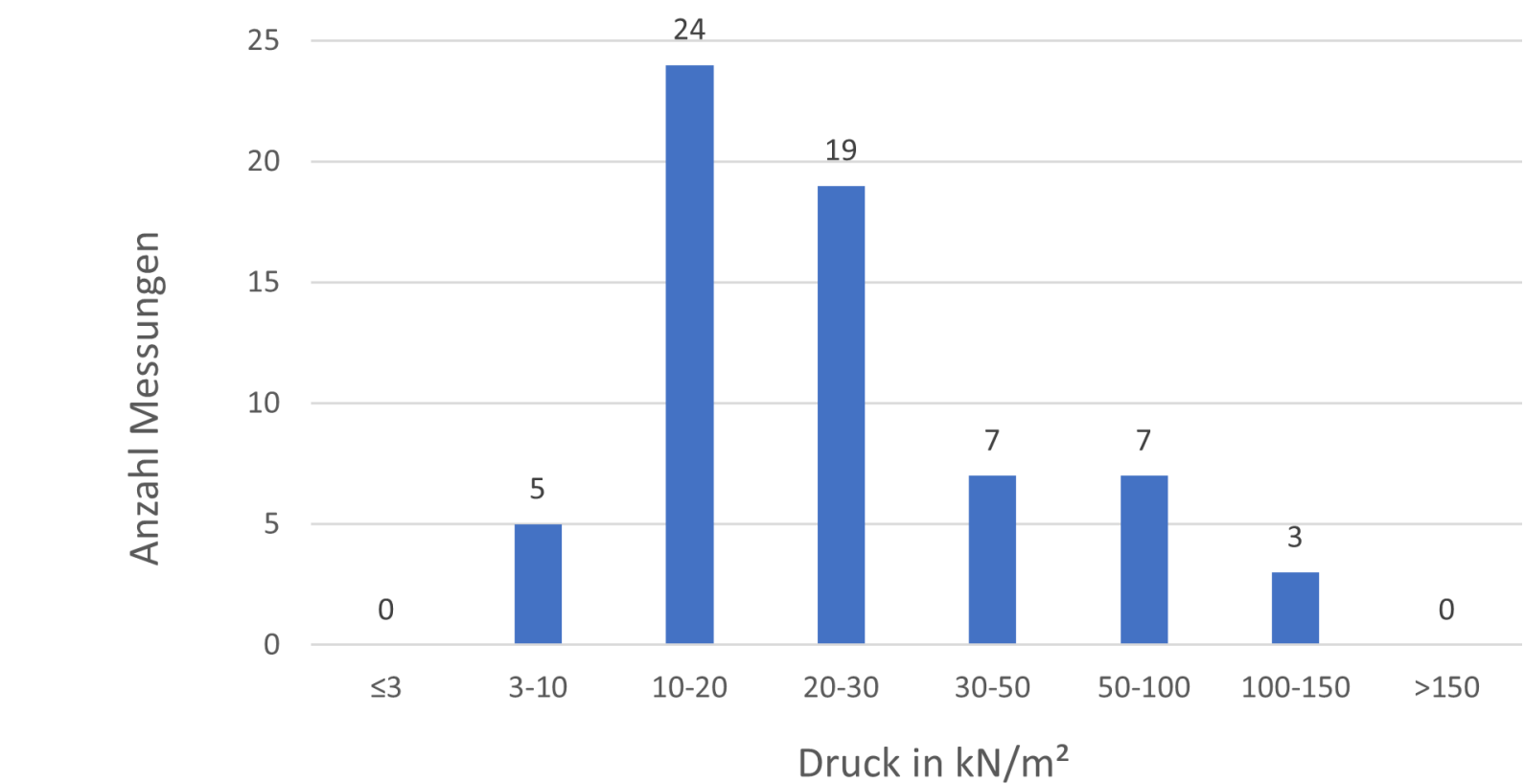


Mauerwerk und Holz verwendet. Dabei wurden sowohl statische als auch dynamische Berechnungen durchgeführt, wobei letzteren insbesondere zur Ermittlung von Lasterhöhungsfaktoren dienen. Die Untersuchungen führten zu einer umfassenden Bewertung der Tragfähigkeit verschiedener Bauweisen und ermöglichen eine präzisere Einschätzung der Widerstandsfähigkeit von Gebäuden gegenüber Anprallkräften. Hierunter die Grenzlastkurve von **Mauerwerk**.



3. Evaluation der Druckformeln für Hangmuren

Das Ziel dieser Untersuchung war der Vergleich verschiedener Modelle zur Vorhersage von Anprallwirkungen von Hangmuren. Dabei wurden 12 Druckformeln mit gemessenen Anpralldrücken verglichen. Da keine natürlichen Messdaten existierten, wurden experimentelle Studien und Rückrechnungen genutzt. Baustatische Rückrechnungen erfolgten anhand von Schadensbildern an Gebäuden (Bächtold und Moor 2009, 2010). In der Versuchsanlage Veltheim wurden Realmassstab-Experimente mit Druckplatten durchgeführt (Bugnion, 2012). Laborexperimente von Cui et al. (2015) und Zheng et al. (2022) lieferten weitere Daten. Dabei wurden Druck, Geschwindigkeit, Fließhöhe und Dichte erfasst.



Insgesamt wurden 65 Messungen verwendet um die Genauigkeit der Druckformeln zu bewerten mittels Intensitätsklassen, Verhältniswerte und eine Fehleranalyse bewertet. Schließlich wurden die Druckformeln anhand gewichteter Gütemaße gerankt, wobei die Experimente in Veltheim am stärksten gewichtet wurden. Das Ranking zeigt, dass die gemessenen Drücke am besten wiedergegeben werden durch die Druckformel von Scheidegger (1975):

$$p = \rho \cdot g \cdot \left(h_f + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

Wobei, p = Anpralldruck (kN/m^2), ρ = Dichte (kg/m^3), $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, v = Frontgeschwindigkeit (m/s), h_f = FINormiesstiefe (Fließhöhe) in m. Die Formel der SIA 261/1 liegt mit Rang 5 im Mittelfeld.