

FALLVERSUCHE AUF BODENMATERIAL

MESSUNG DER VERZÖGERUNG

Werner Gerber¹ und Axel Volkwein¹

ZUSAMMENFASSUNG

In der Versuchsanlage Walenstadt sind 96 Fallversuche mit würfelförmigen Betonkörpern durchgeführt worden. Unterschiedliche Massen sind auf verschieden starke, geschüttete Bodenschichten aus unterschiedlichen Höhen fallen gelassen worden. Dabei umfasste die kinetische Energie der Fallkörper einen Bereich von 20-1'200 kJ. Während den Versuchen sind die Beschleunigung resp. die Verzögerung der Fallmassen mit Sensoren gemessen worden. Aus diesen Messdaten konnten die maximale Verzögerung, die Eindringtiefe und die Eindringzeit ermittelt werden. Aus den Parametern Masse, Fallhöhe und Bodenstärke ist mit einer multiplen, linearen Regression die mittlere Eindringtiefe berechnet worden. Die entsprechende Formel wird im Beitrag dargestellt. Zusätzlich wird in diesem Beitrag auch ein Modell vorgestellt, mit dem der Abbremsvorgang in Abhängigkeit der Zeit erklärt werden kann. Dabei stimmen die Werte der Verzögerungen, der Geschwindigkeiten und der Eindringtiefen physikalisch überein.

Keywords: Steinschlag, Fallversuche, Verzögerung, Eindringtiefe

ABSTRACT

96 falling weight tests with cube-like bodies made of re-inforced concrete have been performed at the WSL test site in Walenstadt. Different masses fell on dumped soil with varying thicknesses. The kinetic energy of the falling bodies ranged 20-1'200 kJ. During the experiments the deceleration and re-acceleration of the test specimen have been measured using fix attached acceleration sensors. From the measured data the maximum deceleration, the penetration depth and the braking time could be retrieved. The parameters mass, falling height and soil thickness were used to evaluate an averaged penetration depth through multiple linear regressions. This resulted in a suggested formula for practical application proposed in this contribution. Furthermore, this article presents a model to explain the braking process in dependency to the time. Decelerations, velocities and penetrations physically match.

Keywords: rock fall, impact, large-scale experiment, deceleration, penetration depth

EINLEITUNG

In den Bergregionen der Schweiz schützen viele Erddämme die darunterliegenden Gebiete vor Steinschlag und reduzieren dadurch das Risiko eines Schadens. Um fallende Steine und Felsblöcke auf diese Art zu stoppen werden sehr hohe Kräfte im Dammkörper benötigt. Diese Kräfte sind noch weitgehend unbekannt und es gibt auch keine allgemeingültige Formel mit der solche Kräfte berechnet werden könnten. Ziel unserer Versuche war es, solche Kräfte respektive die Verzögerungen in abbremsenden Betonblöcken zu messen. Dabei sind unterschiedliche Massen auf verschieden starke Bodenschichten aus variablen Höhen fallen gelassen worden. Mit diesen Messungen resultierten Daten über den Verlauf der Verzögerung, dessen Maximalwert, die Eindringtiefe des Wurfkörpers in den Boden und die Eindringzeit bis zum tiefsten Punkt. Aus diesen Datensätzen konnten wir mit Hilfe einer multiplen linearen Regression die mittlere Eindringtiefe aus den

¹ Swiss Federal Research Institute WSL, Zuercherstr. 111, 8903 Birmensdorf, Switzerland (e-mail: werner.gerber@wsl.ch)

Parametern Masse, Fallhöhe und der Schichtstärke des Bodenmaterials berechnen. Es zeigte sich welche Parameter einen hohen Einfluss haben und welche einen kleineren. Zudem wird in diesem Beitrag für den Abbremsvorgang ein Modell vorgestellt mit dem auch die Zusammenhänge zwischen der Einfallgeschwindigkeit, der Eindringtiefe, der Abbremszeit und der maximalen Verzögerung erklärt werden können.

VERSUCHSANORDNUNG

Drei würfelförmige Betonkörper mit unterschiedlichen Massen (800 kg, 4'000 kg und 8'000 kg) wurden aus verschiedenen Höhen (2.5 m, 5 m, 10 m und 15 m) auf vier verschiedenen starke Bodenschichten (0.5 m, 1 m 1.5 m und 2 m) fallen gelassen. In einer ersten Phase wurde die kleinste Bodenschicht geschüttet, verdichtet und die Versuche durchgeführt. Dabei ist jeder Versuch 3 mal wiederholt worden (mit gleicher Fallhöhe) und es ist darauf geachtet worden, dass die nachfolgenden Einschlagpunkte auf dem Boden nicht schon von einem vorangegangenen Versuch beeinflusst worden sind. Dieser Ablauf ist auch bei den anderen Bodenschichten eingehalten worden. Die kinetische Energie der fallenden Blöcke umfasste einen Bereich zwischen 20 kJ bei den kleinen Blöcken und kleinen Fallhöhen und 1'200 kJ bei den grossen Blöcken mit grossen Fallhöhen.



Bei jedem der 96 Versuche (Tab.1) wurden mit 6 Sensoren die Beschleunigungen resp. die Verzögerungen in der Freifallphase und während dem Aufschlagen auf den Boden gemessen. Zwei der Sensoren hatten eine Kapazität der 100-fachen Erdbeschleunigung und 4 eine solche der 500-fachen Erdbeschleunigung. Die Messdauer betrug jeweils 3 Sekunden bei einer Messrate von 5 Kilohertz. Neben diesen Messungen wurden noch andere Parameter wie Fallhöhe oder beispielsweise die statische Lage vor und nach dem Einschlag gemessen.

Fig. 1 4'000 kg test block before falling testation

Fig. 1 Betonblock mit 4'000 kg Masse kurz vor Versuchsbeginn

Tab. 1 Enumeration of experiments with corresponding masses, soil thicknesses and falling heights

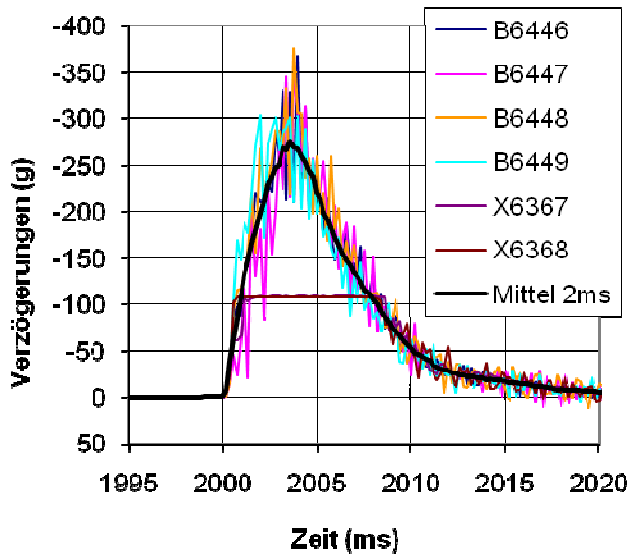
Tab. 1 Versuchsnummern mit Angabe der Masse, Bodenstärke und Fallhöhe

Masse	Bodenstärke	Fallhöhe	2.5 m	5 m	10 m	15 m
800 kg	0.5 m		1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	10, 11, 12
	1 m		13, 14, 15	16, 17, 18	19, 20, 21	22, 23, 24
	1.5 m		25, 26, 27	28, 29, 30	31, 32, 33	34, 35, 36
4'000 kg	1 m		37, 38, 39	40, 41, 42	43, 44, 45	46, 47, 48
	1.5 m		49, 50, 51	52, 53, 54	55, 56, 57	58, 59, 60
	2 m		61, 62, 63	64, 65, 66	67, 68, 69	70, 71, 72
8'000 kg	1.5 m		73, 74, 75	76, 77, 78	79, 80, 81	82, 83, 84
	2 m		85, 86, 87	88, 89, 90	91, 92, 93	94, 95, 96

DATENANALYSE UND ERSTE RESULTATE

Vor den ersten Analysen wurden die Messdaten einer Qualitätskontrolle unterzogen respektive auf deren Plausibilität untersucht. In der Ruhephase der Messung (Betonblock hängt am Seil) mussten die gemittelten Messwerte den Wert 1 (der Erdbeschleunigung entsprechend) und in der Freifall-Phase den Wert 0 ergeben. Aus diesen beiden Kontrollen resultierte ein Korrekturwert, welcher je nachdem zu den Messwerten addiert oder subtrahiert werden musste.

Erste Analysen der Messungen zeigten, dass die Werte der Verzögerung die 100-fache Erdbeschleunigung bei vielen Versuchen überschritten und somit die Sensoren mit der geringeren Kapazität überlastet worden sind (Fig. 2).



Deshalb sind zur einheitlichen Analyse die Daten der 500g-Sensoren verwendet worden. Aus den 4 Messreihen ist ein zeitgleiches Mittel gebildet worden und aus dieser Datenreihe ist ein gleitendes Mittel über 2 Millisekunden (11 Messwerte) berechnet worden. Aus dieser Kurve des gleitenden Mittels ist die maximale Verzögerung in m/s^2 für jeden Versuch ermittelt worden (Fig. 3).

Mit der Eindringgeschwindigkeit und der Integration der Verzögerung konnte der Verlauf der Geschwindigkeit während dem Aufprall auf den Boden bestimmt werden. Eine weitere Integration der Geschwindigkeitswerte ergab die Bewegung des Steines im Bodenmaterial. Aus diesen Daten konnte die Eindringtiefe und die Eindringzeit bestimmt werden.

Fig. 2 Example for measured decelerations with 2ms moving average
 Fig. 2 Beispiel von Messwerten der Verzögerung und gleitendes Mittel über 2 ms

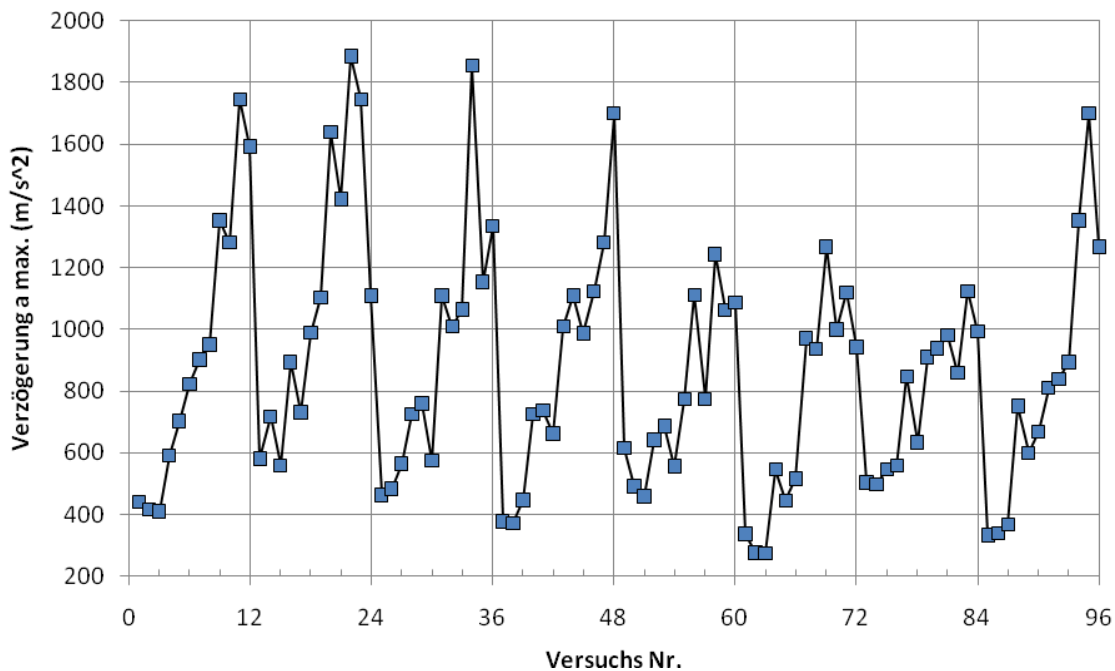


Fig. 3 Maximum decelerations of single impact tests
 Fig. 3 Maximale Werte der Verzögerungen bei den einzelnen Versuchen

Die maximalen Verzögerungen liegen in einem Bereich von 280-1880 m/s^2 . Die Resultate zeigen eine starke Abhängigkeit von der Fallhöhe und eine geringe Abhängigkeit von der Fallmasse. Die Stärke der Bodenschicht hat praktisch keinen Einfluss auf die Grösse der maximalen Verzögerung. Bei den Resultaten der maximalen Eindringtiefe z sind die Abhängigkeiten ähnlich. Es sind Werte zwischen 0.04-0.26 m gemessen worden. Aus diesen Messwerten und den dazugehörigen Parametern Fallhöhe h , Bodenstärke d und Masse m sind mit einer multiplen, linearen Regression

Mittelwerte der Eindringtiefen von 0.07-0.20 m berechnet worden (Fig. 4). Die entsprechende Formel lautet:

$$\text{Eindringtiefe } z = 7.63 \cdot 10^{-3} \cdot h - 1.19 \cdot 10^{-3} \cdot d + 4.57 \cdot 10^{-6} \cdot m + 0.053 \quad (1)$$

Dabei sind nachfolgende Einheiten zwingend: Fallhöhe h (m), Bodenstärke d (m), Masse m (kg). Diese Formel kann nun auch für allgemeine Fälle von Abbremsvorgängen in Erdmaterial angewendet werden.

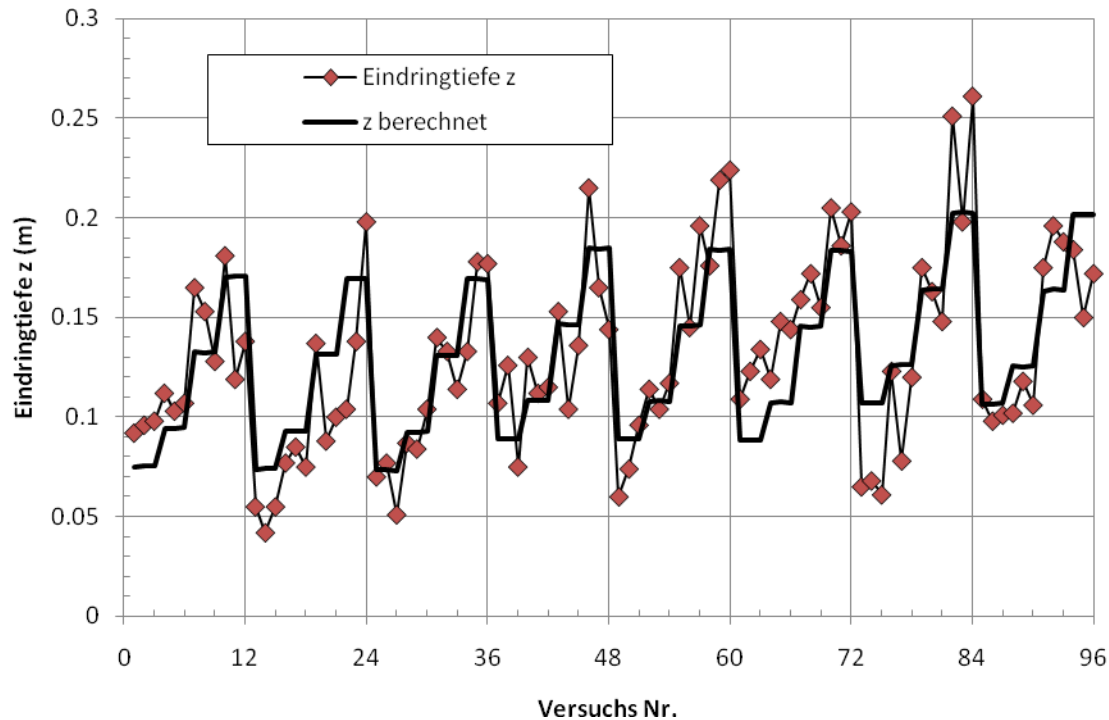


Fig. 4 Maximum penetration depths calculated using multiple linear regressions

Fig. 4 Maximale Eindringtiefe aus Messwerten und mit multipler, linearer Regression berechnete Werte

ABBREMSMODELL

Um konkrete Aussagen bezüglich Abbremsvorgang machen zu können ist ein Modell entwickelt worden mit dem der Verlauf der Verzögerung bis zum Stillstand des Wurfkörpers im Boden berechnet werden kann. Dabei ist der Einfluss der Erdbeschleunigung vernachlässigt worden, weil die Auswirkungen marginal sind. Bei den relativ kurzen Abbremszeiten von 14-34 Millisekunden ist der Einfluss auf die Geschwindigkeit 0.1-0.3 m/s und der Einfluss auf die Eindringtiefe 1-5 mm.

Der Verlauf der Verzögerung im Modell weist folgende Eigenschaften auf: Der Maximalwert der Verzögerung tritt nach 40% der Eindringzeit t (Bremszeit) auf, fällt nach 70% der Zeit auf 1/3 des Maximalwertes ab und bleibt bis zum Stillstand des Körpers konstant (Fig. 5a). Mit dieser Darstellung des Abbremsvorganges können die Beziehungen zwischen der Verzögerung, der Geschwindigkeit und der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Zeit berechnet werden (Fig. 5b, 5c). Beim gewählten Modell kann die Eindringzeit t mit der Geschwindigkeit v und der Eindringtiefe z nach Formel (2) berechnet werden. Zudem kann anschliessend mit der bekannten Zeit t die maximale Verzögerung mit Formel (3) berechnet werden. Wird Formel (2) in Formel (3) eingesetzt resultieren die Formeln (4) und (5). Diese können nun unabhängig von Versuchen angewendet werden, um Daten über die maximalen Verzögerungen a_{\max} zu erhalten bei bekannter Aufprallgeschwindigkeit v und berechneter Eindringtiefe z . Auf der anderen Seite kann mit diesem Modell auch die Eindringtiefe z berechnet werden, falls die Aufprallgeschwindigkeit v und die Verzögerung a_{\max} bekannt sind oder geschätzt werden.

Bremszeit t :
$$t = \frac{2 \cdot z}{v} \quad (2)$$

Verzögerung a_{\max} :
$$a_{\max} = 2 \cdot \frac{v}{t} \quad (3)$$

Verzögerung a_{\max} :
$$a_{\max} = \frac{v^2}{z} \quad (4)$$

Eindringtiefe z :
$$z = \frac{v^2}{a_{\max}} \quad (5)$$

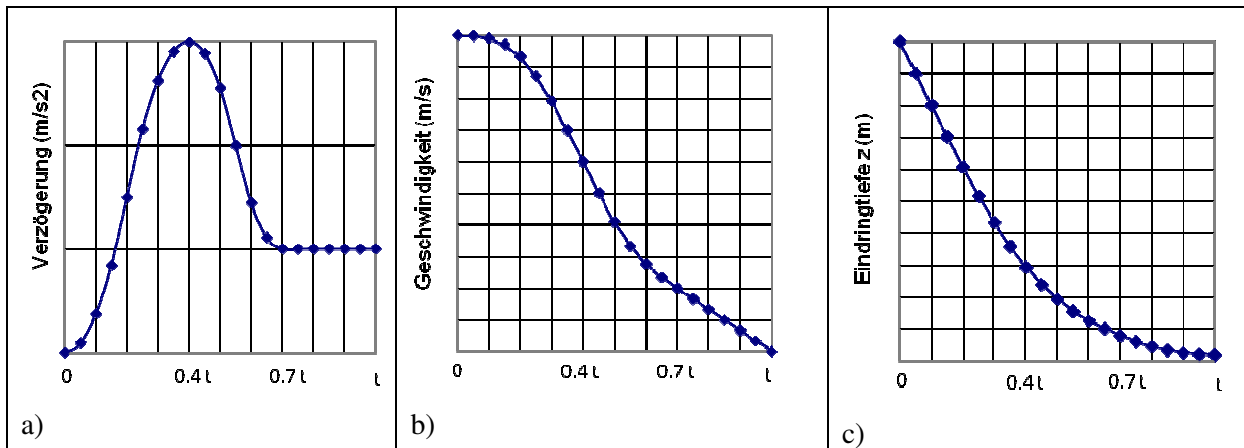


Fig. 5 Brake down model for deceleration (a) with velocity (b) and ground penetration (c) over the time
Fig. 5 Abbremsmodell der Verzögerung (a) mit Geschwindigkeitsverlauf (b) und Eindringkurve (c)

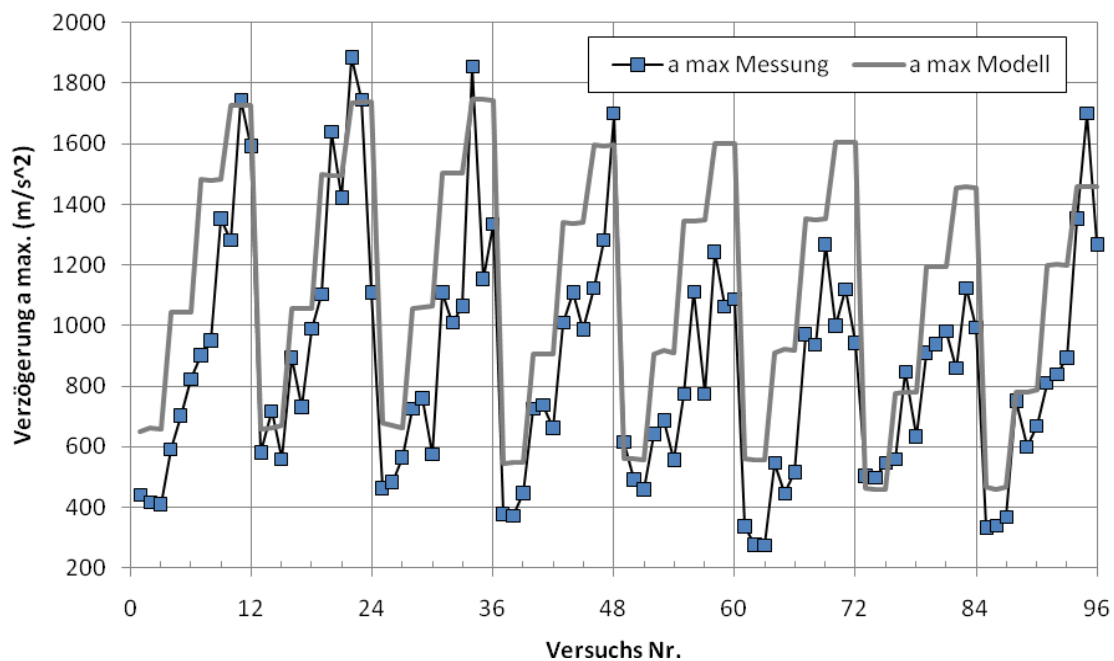


Fig. 6 Comparison of measured and calculated maximum decelerations
Fig. 6 Vergleich der maximalen Verzögerungen mit den aus dem Modell gerechneten Werten

VERZÖGERUNG UND EINDRINGTIEFE

Auf der Grundlage des oben beschriebenen Abbremsmodells und der mit der multiplen, linearen Regression berechneten Eindringtiefe z sind Werte über die maximalen Verzögerungen berechnet worden. Diese wurden mit den Messwerten verglichen und es zeigt sich, dass die mit dem Modell berechneten Werte im Durchschnitt um 34 % höher liegen (Faktor 1.34); dies bei einer Standardabweichung von 27% (0,27). Werden die einzelnen Messwerte betrachtet, so liegen die gemessenen Verzögerungen bei rund 10 Versuchen höher als die mit dem Modell berechneten Werte (Fig. 6).

Vor allem interessant ist nun die Darstellung der Messwerte der Verzögerungen bezüglich der Eindringtiefe. Diese Darstellung der Werte zeigen generell eine Abnahme der Verzögerungen mit einer Zunahme der Eindringtiefe (Fig.7). Dies ist unabhängig von der Fallhöhe respektive der Aufprallgeschwindigkeit. Bezüglich jeder Fallhöhe respektive Aufprallgeschwindigkeit nimmt die Verzögerung mit zunehmender Eindringtiefe ab. Die verschiedenen Fallhöhen sind mit unterschiedlichen Farben (Helligkeitsstufen) markiert. Es ist fast in jedem Fall klar ersichtlich von welcher Fallhöhe das entsprechende Datenpaar (Verzögerung/Eindringtiefe) produziert worden ist.

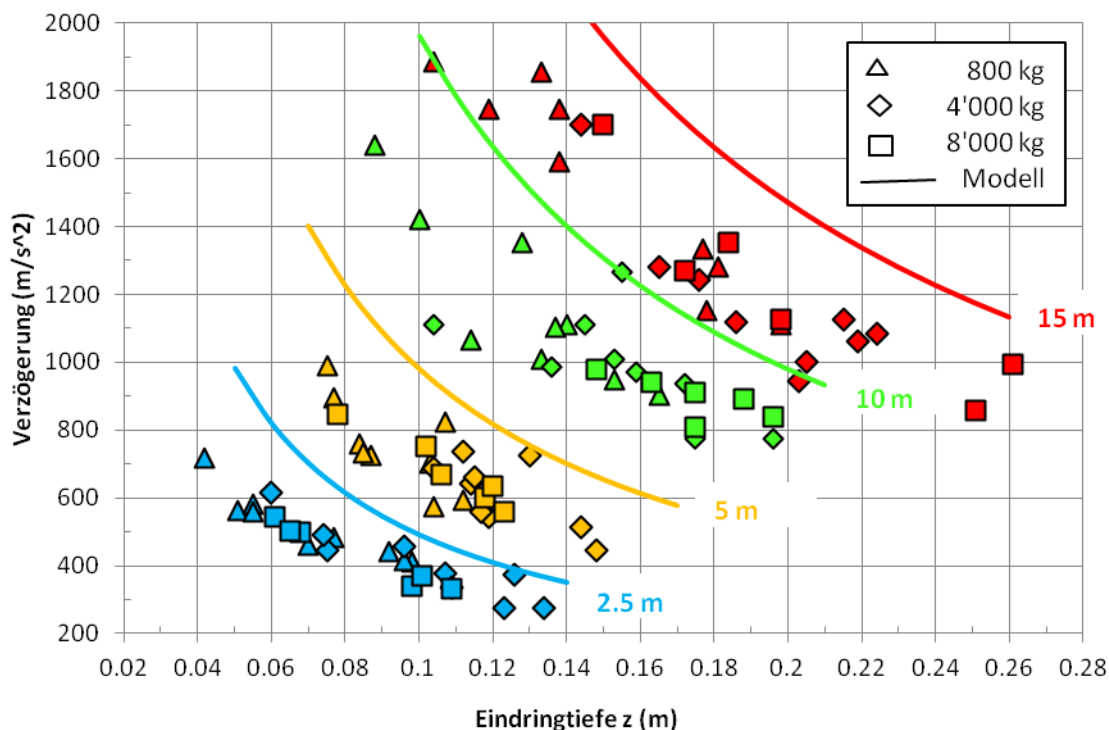


Fig. 7 Maximum decelerations and penetration depths for different falling heights

Fig. 7 Vergleich der maximalen Verzögerungen mit den aus dem Modell gerechneten Werten für unterschiedliche Fallhöhen

Werden nun die Verzögerungen mit dem Modell berechnet und dabei die Fallhöhen h und die Eindringtiefen z gemäss den Berechnungen mit der Regression eingesetzt, kann dafür die Formel (6) verwendet werden. Dabei ist g als Erdbeschleunigung mit $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ einzusetzen. Die Formel (6) entspricht der Formel (4) wobei die Geschwindigkeit durch die entsprechende Fallhöhe ersetzt worden ist.

$$\text{Verzögerung } a_{\max}: \quad a_{\max} = \frac{2 \cdot g \cdot h}{z} \quad (6)$$

Die Resultate dieser Berechnungen zeigen für die vier unterschiedlichen Fallhöhen auch verschiedene Werte der Verzögerung (Fig.7). Beispielsweise kann eine Eindringtiefe von 0.12 m von 3

verschiedenen Fallhöhen (2.5 m, 5 m und 10 m) erreicht werden. Dabei nehmen die Verzögerungen entsprechend den Fallhöhen Werte von zirka 400 m/s^2 , 800 m/s^2 und 1600 m/s^2 an.

Vergleicht man nun die mit Formel (6) berechneten Verzögerungen mit den Messwerten, so liegen die berechneten Werte alle höher. Durchschnittlich liegen die berechneten Verzögerungen um einen Faktor 1.35 höher als die gemessenen Werte; dies bei einer Standardabweichung von 0.15. Dieser Umstand ist bewusst gemacht worden, da mit dem Modell ein oberer Grenzwert der maximalen Verzögerung berechnet werden soll und nicht ein Mittelwert.

DISKUSSION

Bei den Versuchen von Schellenberg et al. (2006, 2007) sind die Steinmassen auf 40 cm Kies fallen gelassen worden. Dabei war der Kies selber auf einer Betonplatte geschüttet und verdichtet worden. Diese relativ dünne Schicht und die Interaktionen des Abbremsvorganges mit der Betonplatte zeigten sehr hohe Werte der Verzögerung und kleine Eindringtiefen. Ein Vergleich der Verzögerungen bei Aufprall auf die Betonplatte mit den Verzögerungen auf Erdmaterial wird in Gerber und Volkwein (2010) gegeben. Bei den Versuchen mit der Betonplatte wurden Werte gemessen, die um einen Faktor 3-4 höher liegen als beim Aufprall auf Erdmaterial.

Bei den Versuchen mit Erdmaterial (Gerber und Volkwein 2010) zeigen die Resultate der Verzögerungen einen signifikanten Unterschied bei verschiedenen Stärken von Bodenschichten aber nur bei der Masse 4000 kg, nicht so bei der Masse 800 kg. Unter anderem auch aus diesem Grunde sind neue Versuche mit mehr Bodenschichten und mehr unterschiedlichen Massen durchgeführt worden. Die in diesem Bericht präsentierten Resultate zeigen eine hauptsächliche Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Fallhöhe (respektive von der Aufprallgeschwindigkeit) und eine sekundäre Abhängigkeit von der Masse des fallenden Körpers. Die Stärke der Bodenschicht hat bei diesen Versuchen praktisch keinen Einfluss auf die Grösse der Eindringtiefe. Der Faktor mit der die Bodenschicht multipliziert wird, beträgt gemäss Formel (1) $-1.19 \cdot 10^{-3}$ und bei Bodenstärken von 1-2 m resultieren negative Werte im Bereich von Millimetern.

DANK

Die Durchführung der Feldversuche auf der Anlage in Walenstadt wurde teilfinanziert vom Bundesamt für Umwelt BAFU Bern aus dem Kredit A4300.0103.

REFERENCES

- Gerber W., Volkwein A. (2010). Impact loads of falling rocks on granular material. In: Darve F.; Doghri I.; El Fatmi R.; Hassis H.; Zenzri H. (eds) *Euromediterranean Symp. on Advances in Geomaterials and Structures*. 3rd Edition, Djerba. 337-342.
- Schellenberg K., Volkwein A., Roth A., Vogel T. (2006). Rockfall - Falling weight tests on galleries with special cushion layers. In: Manjorana C., Salomoni V., Lok T.S. (eds) *Proc. 3rd Int. Conference on Protection of Structures against Hazards*. 28-29 September 2006, Venice Italy. 251-258.
- Schellenberg K., Volkwein A., Roth A., Vogel T. (2007). Large-scale impact tests on rock fall galleries. In: Huang F.L., Li Q.M., Lok T.S. (eds) *Proceedings of the 7th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures*. 17-19 October 2007. Beijing, China. 497-504.