

# Beurteilung von alten Stützbauwerken des Verkehrswegebbaus aus Natursteinmauerwerk mit Rating-System und zerstörungsfreien Prüfverfahren

On the assessment of old retaining walls made of natural stone masonry with a rating system and nondestructive test methods

Bernd Kister<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Bernd Kister, CC Konstruktiver Ingenieurbau, Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Horw, Schweiz, bernd.kister@hslu.ch

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Verkehrswegebbaus im 19. Jahrhundert wurde in der Schweiz eine sehr große Anzahl von Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk erstellt. Diese heute rund 100-jährigen Bauwerke befinden sich z.B. an den Alpenpassstraßen, aber auch an den Bahnstrecken und werden immer noch rege genutzt. An der Hochschule Luzern wurde in den vergangenen 7 Jahren ein Rating-System zur Beurteilung solcher Stützbauwerke aus Natursteinmauerwerk entwickelt und bereits bei verschiedenen Projekten angewendet. Das Ziel dieses Rating-Systems ist es, sowohl den Zustand der Stützbauwerke als auch deren konstruktiven Eigenschaften zu berücksichtigen und zu bewerten. Da Unterlagen zum Aufbau dieser Bauwerke in der Regel fehlen, soll in einem Forschungsprojekt geprüft werden, welchen Beitrag zerstörungsfreie Prüfverfahren bei der Erkundung der konstruktiven Eigenschaften von alten Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk leisten können. Über erste Ergebnisse mit den verschiedenen Messverfahren an einem 5 m langen und 1.8 m hohen, extra für das Projekt hergestellten Mauerwerksprobekörper wird berichtet.

**Schlüsselworte:** Natursteinmauerwerk, Stützbauwerke, Zustand, konstruktive Eigenschaften, Luzerner Rating-System, Schlankheitsgrad, Querverband, zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP)

## Abstract

During the construction of traffic lines in the 19th century a lot of retaining walls made of natural stone masonry had been established in Switzerland. These constructions, with an age of approximately 100 years now, are still in use and one can find the walls along mountain roads as well as along railroad tracks. Because those constructions are still part of the traffic routes their structural safety has to be controlled. During the last 7 years a rating system has been developed at the Lucerne University of Applied Sciences and Arts for the assessment of such retaining walls made of natural stone masonry. The purpose of the rating system is to take into account the as-is state of a retaining wall as well as its constructiveness. Additionally some environmental aspects, as for example cover of vegetation, properties of the subsoil, topography and others, have been incorporated in the rating. Because of the lack of information concerning data like wall thickness and masonry bond of those old constructions a research project has been established to check the suitability of nondestructive testing methods to get these data. For this purpose a test segment made of natural stone masonry has been constructed with 5 m in length and approximately 1.8 m in height. First results of the measurements done at that test segment with different methods are presented.

**Keywords:** natural stone masonry, retaining walls, as-is state, constructiveness, Lucerne Rating System, slenderness ratio, masonry bond, nondestructive testing (NDT)

## 1 Einleitung

Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts war die Blütezeit des Baus von Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk im Rahmen der Erstellung von Verkehrswegen im Alpenraum. Die Nutzung der neuen Verkehrsmittel - Automobil und Eisenbahn - deren Bedeutung während der Industrialisierung immer wichtiger wurde, erforderte den Bau neuer Verkehrswege. Für die zahlreichen Stützbauwerke,

welche für die Straßen und Bahnstrecken erstellt werden mussten, wurde in der Regel das vor Ort vorhandene Material – Naturstein – eingesetzt. Die Bauwerke sind daher regional sehr unterschiedlich (vgl. Abb. 1). Der Naturstein wurde sowohl in Form von Mörtelmauerwerk als auch in Form von Trockenmauerwerk beim Bau der Stützbauwerke verwendet. Viele dieser mittlerweile ca. 100-jährigen Mauern sind auch heute noch in Betrieb und sichern insbesondere die Schweizer Passstraßen.



Abb. 1: Beispiele für die Verschiedenartigkeit der Stützbauwerke und ihres Mauerwerks aus Naturstein.

Fig. 1: Examples showing the diverseness of retaining walls and their natural stone masonry.

## 2 Risikopotential

Aufgrund der großen Anzahl von Bauwerken einerseits und der zur Verfügung stehenden begrenzten finanziellen und personellen Mittel andererseits, ergibt sich, dass die Datenerfassung bei einer Inspektion nicht bei allen Bauwerken mit der gleichen Intensität erfolgen kann. Es bietet sich an, eine Einteilung der Stützbauwerke hinsichtlich ihres Risikopotentials, d.h. hinsichtlich der Auswirkungen bei einem Versagen, vorzunehmen und den Inspektionsaufwand entsprechend dem Risikopotential von niedrig zu hoch zu steigern. Es wird daher eine Einteilung der Stützbauwerke in drei Risikoklassen vorgeschlagen:

- Mauer mit niedrigem Risikopotential (Klasse 3)
- Mauer mit mittlerem Risikopotential (Klasse 2)
- Mauer mit hohem Risikopotential (Klasse 1)

Zu den Mauern mit niedrigem Risikopotential gehören Mauern auf der Bergseite von geringer Höhe (d.h. die maximale Höhe der Mauer liegt unter 2 m), die entlang einsehbarer Strecke angeordnet sind. Das Versagen solcher Bauwerke kann zwar z.B. zu Sachschäden und Straßensperrungen führen, eine Gefährdung von Menschenleben ist jedoch nicht zu erwarten.

Zu den Mauern mit mittlerem Risikopotential gehören:

- bergseitige Bauwerke, die eine Stützfunktion ausüben und eine Höhe  $h > 2$  m aufweisen,
- bergseitige Bauwerke, die an unübersichtlichen Stellen platziert sind und daher bei deren Versagen eine Gefährdung von Menschen besteht

- talseitige Bauwerke von geringer Höhe (maximale Höhe  $< 1$  m), bei denen jedoch nicht von einem plötzlichen Versagen mit großen Versätzen auszugehen ist, so dass keine unmittelbare Gefährdung von Menschen besteht.

Zu den Mauern mit hohem Risikopotential gehören generell die talseitigen Stützbauwerke mit Bauwerkshöhen  $> 1$  m sowie Bauwerke, bei deren Versagen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Gefährdung von Menschen besteht.

Die allgemeinen und technischen Daten zum Bauwerk (talseitige oder bergseitige Lage, Höhe des Stützbauwerks, Einsehbarkeit, etc.) bilden somit die Entscheidungsgrundlage, ob das Risikopotential des Bauwerks niedrig, mittel oder hoch eingeschätzt wird.

## 3 Homogenbereiche

Die Stützbauwerke aus Natursteinmauerwerk haben zum Teil eine erhebliche Länge und variieren stark in ihrer Höhe. Manchmal ändert sich auch die Steingröße oder es ändert sich sogar die Art des Mauerwerkverbands. Bereiche, die als Trockenmauern erstellt wurden, wechseln mit vermörtelten Bereichen ab.

In solchen Fällen wird empfohlen, die Mauer in einzelne Homogenbereiche zu unterteilen. Homogenbereiche zeichnen sich dadurch aus, dass sie (KISTER et al, 2008):

- nur einen Mauerwerkstyp enthalten
- weitgehend das gleiche Gefüge besitzen
- über annähernd gleiche geometrische Eigenschaften verfügen.

#### 4 Beurteilungskriterien

Bei einer Stützmauer, die über viele Jahre ihre Funktion erfüllt hat, kann man davon ausgehen, dass bei ihrer Errichtung eine ausreichende Sicherheit gegenüber dem Versagenszustand vorhanden gewesen sein muss. Treten dann nach langer Zeit Schäden auf, so muss es im Laufe der Zeit zu Veränderungen gekommen sein. Diese Schäden können ihre Ursache z.B. in einem Alterungsprozess der Baustoffe haben. Wenn Verwitterungsprozesse im Mauerwerk zu einer Reduzierung der Festigkeit geführt haben, können ungünstige konstruktive Eigenschaften, wie lokale Häufung von kleinen Mauerwerkssteinen oder eine geringe Anzahl von Bindersteinen, eine weitere Schädigung des Bauwerks beschleunigen und schließlich zum Kollaps des Bauwerks führen. Auch eine Änderung der auf das Stützbauwerk wirkenden Kräfte, wie z.B. anstehender Wasserdruck, Wurzeldruck durch Bewuchs oder erhöhte Verkehrslasten können die Ursache für solche Schäden sein. Meist ist es nicht nur eine einzelne Ursache, die einer Schädigung zu Grunde liegt, sondern eine Kombination oder zyklische Abfolge von verschiedenen Ursachen.

Das verwendete Rating-System zur Beurteilung und Bewertung von Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk untersucht daher die drei Bereiche

- konstruktive Eigenschaften des Bauwerks,
- Zustand des Bauwerks und
- Zustand der „Umgebung“.

Für diese drei Bereiche werden einzelne Werte, sogenannte Ratings, ermittelt, in die die folgenden Eigenschaften einfließen:

Rating konstruktive Eigenschaften  $q_{Mk}$  (Abb. 2):

- Schlankheitsgrad der Mauer (RKB)
- Einbindetiefe der Mauer und Neigung des Wandfußauflagers (RKF)
- Eigenschaften der Steine (RKG1 bis RKG6)
- Eigenschaften der Fugen (RKG7 bis RKG8)
- Eigenschaften des Mauerwerks (RKG9)
- Entwässerung des Bauwerks (RKE)

Rating Zustand des Bauwerks  $q_{Mz}$  (Abb. 3):

- Zustand des Gesamtbauwerks (RZN, RZS, RZV)
- Zustand der Steine (RZM1 bis RZM4)
- Zustand der Fugen (RZM5)
- Zustand der Entwässerungseinrichtungen (RZE)

Rating Zustand der „Umgebung“  $q_{TGz}$  (Abb. 4):

- Zustand Bewuchs auf und hinter dem Bauwerk (RZB)
- Zustand „Untergrund“ (RZU)
- Zustand „Wasser“ (RZW)

Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Ratingwerte mit Tabelle findet sich bei KISTER et al, 2008.

Grunddaten				
Bauwerk		Elemente (Steine + Fugen)		Entwässerung
Schlankheitsgrad der Mauer (Mauerwerksdicke am Fuss / max. Höhe der Mauer)	RKB	Steine:	RKG	Entwässerungsschlitze
		Variation der Steingröße in der Mauer		
Neigung des Wandfußauflagers Einbindetiefe der Mauer	RKF	Position der größten Steine	RKE	Drainage Wandfuss
		Verhältnis Schichtdicke zu Steinlänge		
		Lagerhaftigkeit		
		Ausführung des Querverbands		
		Fugen:		
		Kreuzfugen		
		Stossfugen über mehrere Schichten		
		Fugeneigenschaften bezogen auf den Mauerwerkstyp		

Abb. 2: Grunddaten zur Beurteilung eines Stützbauwerks aus Natursteinmauerwerk.

Fig. 2: Basic data for the assessment of constructiveness.

Zustand				
Bauwerk		Elemente (Steine + Fugen)		Entwässerung
Teileinbrüche bzw. Ausbrüche des Mauerwerks Ausbauchungen / Ablösung der vorderen Läufer-Binder-Schicht Schiefstellung bzw. Veränderung der Schiefstellung Überhang	RZN	Steine:	RZM	Entwässerungsschlitze
		Verwitterungsgrad		
		Druckfestigkeit der Steine		
		Beschädigung durch Überbeanspruchung		
		Austreiben einzelner Steine		Drainage Wandfuss
		Fugen:		
Setzungen am Bauwerk	RZS	Trockenmauer: Eigenschaften der Gesteinsoberfläche		Erosion
Mauerwerksverband	RZV	vermörtelte Fugen: Zustand des Mörtels		

Abb. 3: Kriterien zur Beurteilung des Zustandes eines Stützbauwerks aus Natursteinmauerwerk.

Fig. 3: Assessment criteria of the as-is state of a retaining wall.

Zustand				
Untergrund	Wasser		Bewuchs	
Aufwölbung am Mauerfuss Absenkung in der Hinterfüllung bzw. auf der Strasse Hangbewegungen	RZU	trocken	RZW	unbedeutend
		Anzeichen für Wasser Austritte		Bewuchs mit tief in die Fugen eindringenden Wurzeln auf der Mauer
		Vernässung		strauch- oder baumartiger Bewuchs auf oder direkt hinter der Mauer
				RZB

Abb. 4: Kriterien zur Zustandsbeurteilung „Umgebung“.

Fig. 4: Assessment criteria of the as-is state of the surrounding area.

Die Werte für  $q_{Mk}$ ,  $q_{Mz}$  und  $q_{TGz}$  können zwischen 0 und 1 variieren. Sind sie grösser als 0.6 so ist von annehmbaren



konstruktiven Eigenschaften des Bauwerks bzw. von einem annehmbaren Zustand auszugehen, d.h. es liegen keine größeren Mängel oder Schäden vor. Ein Wert von 0.8 oder höher würde guten konstruktiven Eigenschaften bzw. einem guten Zustand entsprechen.

Ergeben sich hingegen für die Zustandsbewertungen bzw. die konstruktiven Eigenschaften Werte kleiner 0.6 respektive kleiner 0.5, so sind Schäden respektive erhebliche Schäden vorhanden bzw., im Falle der Grunddaten „konstruktive Eigenschaften“, liegen, falls die entsprechenden Merkmale nicht ermittelt werden konnten, zumindest Kenntnislücken bzw. erhebliche Kenntnislücken vor. Bei letzterem Sachverhalt bedeutet ein niedriges Rating bei den konstruktiven Eigenschaften nicht zwangsläufig, dass das Bauwerk hinsichtlich der Konstruktion als unzureichend anzusehen ist, sondern dass es Kenntnislücken gibt, die es, ggf. im Rahmen von Vorbereitungsarbeiten für eine Instandsetzung, noch zu schließen gilt.

Bei der Beurteilung der konstruktiven Eigenschaften dieser alten Bauwerke ergeben sich daher zunächst in der Regel ungenügende Rating-Werte, da Planunterlagen aus denen man wesentliche Kenngrößen, wie Wandstärke, Einbindetiefe oder gar Angaben zur Ausführung des Querverbands, entnehmen könnte, meist fehlen. Heute lassen sich solche Daten nur mit sehr großem Aufwand, d.h. durch ein Öffnen des Mauerwerks und somit der Zerstörung der Bausubstanz, gewinnen. Auch dann gelten, genau genommen, die gewonnenen Informationen immer nur für einen lokalen Ort.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens soll daher eine Messmethodik auf der Basis von zerstörungsfreien Messverfahren entwickelt werden, die eine einfache und kostengünstige Bestimmung von konstruktiven Eigenschaften der Bauwerke, d.h. Wandstärke und Anzahl Bindersteine, auch an mehreren Stellen, erlaubt, ohne dass das Mauerwerk dafür geöffnet werden muss. Zudem könnten zerstörungsfreie Messverfahren auch dabei helfen eine Ablösung der vordersten Steinlage bei vermörteltem Mauerwerk zu erkennen bevor es zu massiven Ausbauchungen kommt. Die Messmethodik ergänzt somit das bereits bestehende Rating-System für Stützbauwerke aus Natursteinmauerwerk und führt zu einer besseren Beurteilung dieser Bauwerke. Die Kombination aus Rating-System und zerstörungsfreien Prüfmethoden hilft ein unvorhergesehenes Tragverhalten, Schädigungsmechanismen und Gefährdungen möglichst frühzeitig zu erkennen und unterstützt damit die Vorgaben, die sich aus der neuen Norm SIA 269 und ihrer Unternormen für die Erhaltung von Bauwerken ergeben.

## 5 Mauerwerksprobekörper

Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind indirekte Messverfahren und bedürfen der Interpretation (vgl. KISTER, 2006). Bei einem unbekanntem Bauwerk können bei der Interpretation der Messdaten auch Fehlinterpretationen auftreten. Um dies auszuschließen, wurde an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur ein Stützmauerabschnitt aus Natursteinmauerwerk nach historischem Vorbild nachgebaut (Abb. 5).

Da in diesem Fall der Aufbau des Mauerwerksprobekörpers bekannt ist, lassen sich die Messergebnisse direkt mit den Bauwerkseigenschaften vergleichen und Fehlinterpretatio-

nen können so vermieden werden.



Abb. 5: Mauerwerksprobekörper an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

Fig. 5: Test segment of natural stone masonry at the Lucerne University of Applied Sciences and Arts.

Der Mauerwerksprobekörper besitzt eine Gesamtlänge von ca. 5 m und eine Höhe von ca. 1.8 m. Er wurde auf einer ca. 24 cm mächtigen Kiesschicht aufgebaut und besitzt im Haupt einen Anzug von ca. 8:1. Um unterschiedliche Wandstärken untersuchen zu können, wurde die Rückseite des Mauerwerks stufenförmig ausgebildet (Abb. 6).

Als Mauerwerksstein wurde Quarzsandstein aus dem Steinbruch Guber, Alpnach, Schweiz verwendet.

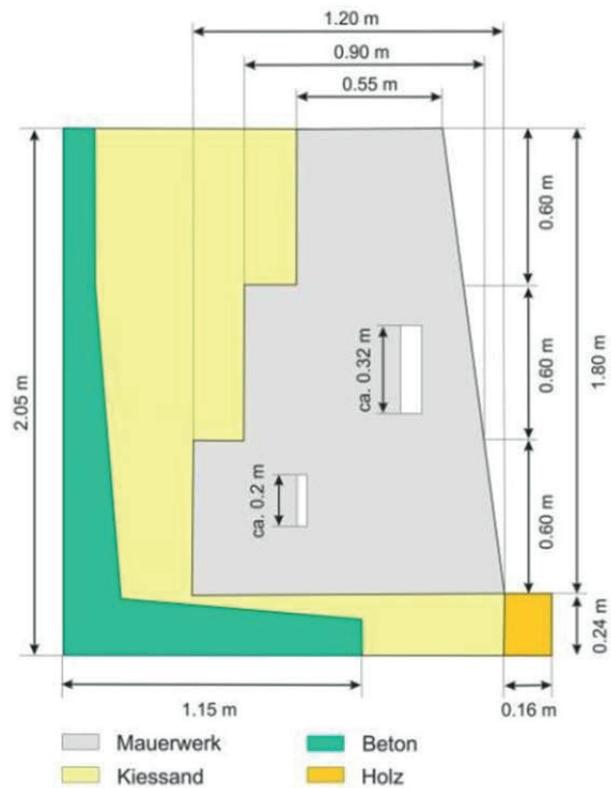


Abb. 6: Querschnitt des Mauerwerksprobekörpers.

Fig. 6: Cross section of the test segment.

Damit verschiedene Mauerwerksarten bzw. „Alterungszustände“ untersucht werden können, wurde die Stützmauer in

ihrer Länge ebenfalls in 3 Teilbereiche von jeweils ca. 1.65 m Länge unterteilt. Ein Teilbereich besteht aus Trockenmauerwerk (Teil A), ein zweiter aus vermörteltem Mauerwerk (Teil B). Im dritten Teilbereich (Teil C) wurde der Fugenraum mit Sand verfüllt. Der Sand soll dabei einen vollständig zersetzten Mörtel simulieren. Des Weiteren wurden 2 Hohlräume im Teil A bzw. im Übergang Teil A / Teil B in das Mauerwerk integriert (Abb. 6), um deren Einfluss bei den Messungen mit zerstörungsfreien Messverfahren zu untersuchen.

Der rückseitige Abschluss des Bauwerks wird durch Betonwinkelplatten gebildet (Abb. 6). Der Zwischenraum zwischen Natursteinmauer und Betonplatte wurde mit Kiessand verfüllt. Die Gesamtstärke des Bauwerks beträgt ca. 1.7 m am Fuß. In die Hinterfüllung aus Kiessand wurden Injektionsschläuche eingelegt, so dass auch der Einfluss einer Vernässung des Mauerwerks von der Rückseite aus auf die Messungen untersucht werden kann.

## 6 Messverfahren

An dem Mauerwerksprobekörper soll zunächst die Eignung verschiedener Messverfahren bzw. Messanordnungen zur Bestimmung der konstruktiven Eigenschaften solcher Bauwerke untersucht werden. In einer späteren Phase des Projekts werden dann die Verfahren und Messanordnungen, die sich als geeignet erwiesen haben, auf ein bestehendes Bauwerk angewandt.

Die Bestimmung von Bauteilabmessungen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) kann grundsätzlich mittels Laufzeitmessungen von akustischen oder elektromagnetischen Wellen erfolgen. Als generelle Vorgehensweise bei Bauteilen, die nur von einer Seite aus zugänglich sind, kann die Reflexionsmethode angesehen werden.

Bei Reflexionsmessungen wird üblicherweise der Abstand Sender – Empfänger klein gewählt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Weg der Welle vom Sender zum Reflektor und der Weg vom Reflektor zum Empfänger gleich groß ist. Die Laufzeit der Welle vom Sender zum Reflektor beträgt somit die Hälfte der am Empfänger registrierten Laufzeit. Unter dieser Voraussetzung und mit der vorgängig ermittelten Wellengeschwindigkeit lässt sich dann die Zeitdarstellung in eine Tiefendarstellung umwandeln und die Lage von Reflektoren oder Beugungsstrukturen bestimmen. Die Genauigkeit, mit der die Tiefenlage einer Struktur bestimmt werden kann, hängt somit ganz wesentlich davon ab mit welcher Genauigkeit die Wellengeschwindigkeit vorab ermittelt werden konnte.

Im Rahmen des Projekts werden die folgenden Reflexionsverfahren auf ihre Eignung für Untersuchungen an Natursteinmauerwerk untersucht:

- Impact Echo Verfahren (P-Wellen)
- Ultraschall-Impuls Messverfahren (S-Wellen)
- Georadar (elektromagnetische Wellen)

Zudem werden Untersuchungen mit Oberflächenwellen, zur Bestimmung der Wandstärke durchgeführt. Dieses Verfahren wird als Spektralanalyse von Oberflächenwellen (Spect-

ral Analysis of Surface Waves, SASW) bezeichnet.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen mit den unterschiedlichen zerstörungsfreien Messverfahren liegt dabei auf:

- der Ermittlung der Wandstärke des Mauerwerks und
- der Ermittlung von Bindersteinen im Mauerwerk.

Da bei diesen beiden Größen in der Regel signifikante Unterschiede in der Längenausdehnung bestehen, müssen Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen bzw. Wellenlängen ausgeführt werden, um die jeweilige Größe zu ermitteln. Nachfolgend werden erste Ergebnisse der Messungen mit akustischen Wellen vorgestellt.

## 7 Bestimmung der Wellengeschwindigkeit

Wie vorstehend bereits erwähnt, wird die Wellengeschwindigkeit benötigt, um die mit einem Reflexionsverfahren ermittelte Zeitmessung in eine „Tiefenmessung“ umzuwandeln. Aber auch beim Impact Echo Verfahren, welches auf einer Frequenzanalyse des Messsignals basiert, wird die Wellengeschwindigkeit benötigt. Der Bestimmung der Wellengeschwindigkeit kommt daher eine große Bedeutung zu, da die Messfehler bei der Geschwindigkeitsmessung direkt in die Abstandsermittlung eingehen.

Beim Natursteinmauerwerk handelt es sich um einen heterogenen Baustoff, der aus den Steinen und dem Mörtel besteht. In der Regel werden Gestein und Mörtel unterschiedliche Wellengeschwindigkeiten aufweisen. Ziel der Untersuchungen war es daher auch festzustellen, in wie weit die Wellengeschwindigkeit im Mauerwerk variiert und wie groß die Abweichung von der Wellengeschwindigkeit im Gestein ist.

Die Wellengeschwindigkeit wird mittels einer Transmissionsmessung bestimmt, d.h. es wird ein Signal von einer Quelle mit bekannter Position ausgesendet und läuft direkt zu einem Empfänger, ebenfalls mit bekannter Position, wo das eingehende Signal registriert wird. Da bei dieser Konstellation sowohl der Abstand  $s$  zwischen Quelle und Empfänger als auch die Laufzeit  $\Delta t$  der Welle bekannt sind, kann die Wellengeschwindigkeit direkt berechnet werden aus:

$$v = s/\Delta t.$$

Man unterscheidet 3 Arten von Transmissionsmessungen (Abb. 7):

- direkte Transmission oder Durchschallung
- semi-direkte Transmission
- indirekte Transmission

Während bei einem bestehenden Stützbauwerk eine direkte Transmission oder Durchschallung nicht möglich ist, konnten solche Messungen am Mauerwerksprobekörper vor der Hinterfüllung mit Kiessand durchgeführt werden. Es wurden jeweils 5 Einzelmessungen ausgeführt, aus denen ein Mittelwert gebildet wurde. Dabei ergaben sich für das vermörtelte Mauerwerk des Teils B Geschwindigkeiten zwischen ca. 4000 m/s und 5500 m/s. Die Wellengeschwindigkeit des Gesteins liegt mit  $5750 \pm 150$  m/s, wie erwartet, höher und wurde ebenfalls aus 5 Messungen ermittelt.

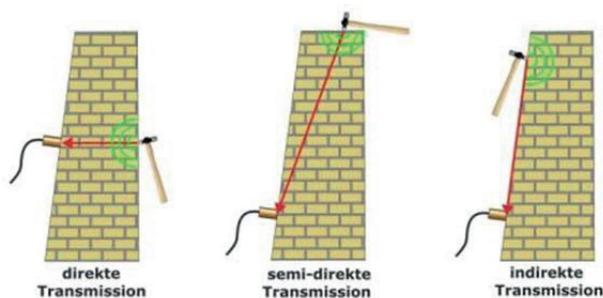


Abb. 7: Arten der Transmissionsmessungen an einem Mauerwerksquerschnitt.

Fig. 7: Types of sound transmission measurement at a wall cross section.

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der Geschwindigkeiten an den verschiedenen Stellen angegeben, Abb. 8 zeigt die Lage der Messstellen für die Durchschallungsmessungen am vermörtelten Mauerwerk im mittleren Teil B des Probekörpers.

Tab. 1: *p*-Wellengeschwindigkeit im vermörtelten Mauerwerk des Teils B des Mauerwerksprobekörpers.

Tab. 1: Velocity of *p*-waves in section B, masonry with mortar.

Material	Messstelle	$v_p$ [m/s]
Mauerwerk	B-S	5500
Mauerwerk	B-U	5250
Mauerwerk	B-A1	4850
Mauerwerk	B-F	4100
Mauerwerk	B-O	5000
Mauerwerk	B-R	4450
Gestein	C-B3	5750



Abb. 8: Messpunkte der Durchschallungsmessungen am vermörtelten Mauerwerk, Teil B.

Fig. 8: Measurement points of the sound transmission measurements at section B, masonry with mortar

## 8 Impact Echo Verfahren

Beim Impact Echo Verfahren wird durch den Schlag mit einem Impaktor (Kugel, Hammer) eine Welle erzeugt, die

durch das Bauteil bzw. Bauwerk läuft und an internen Unstetigkeiten oder der Rückseite des Bauteils bzw. Bauwerks reflektiert wird. Das reflektierte Signal wird in unmittelbarer Nähe der Impaktstelle gemessen und dann einer Frequenzanalyse unterzogen (vgl. z.B. SANSALONE & STRETT, 1997). Bei homogenen Platten, deren Dicke  $d$  klein gegenüber den anderen Abmessungen ist, ergibt sich im Frequenzspektrum eine signifikante Frequenzspitze, die als Eigenwert der Platte interpretiert wird. Mit dieser Eigenfrequenz  $f$  und der bekannten Wellengeschwindigkeit  $v_p$  lässt sich nach Sansalone die Plattendicke  $d$  wie folgt bestimmen (SANSALONE & STRETT, 1997):

$$d = 0.96 \cdot \frac{v_p}{2 \cdot f}$$

Abb. 9 zeigt das Frequenzspektrum einer Impact Echo Messung an der Stelle B-S (vgl. Abb. 8). Aufgrund der Heterogenität des Mauerwerks ergeben sich hier mehrere Frequenzspitzen. Aufgrund der „Plattenformel“ von Sansalone und der gemessenen Wellengeschwindigkeit von 5500 m/s wäre die Eigenfrequenz bei ca. 4 kHz zu erwarten. Dies stimmt gut mit der 2. Frequenzspitze bei 3.91 kHz überein, jedoch nicht mit der höchsten Frequenzspitze in Abb. 9 bei 1.95 kHz. In den weiteren Untersuchungen muss dieser Sachverhalt noch abgeklärt werden.

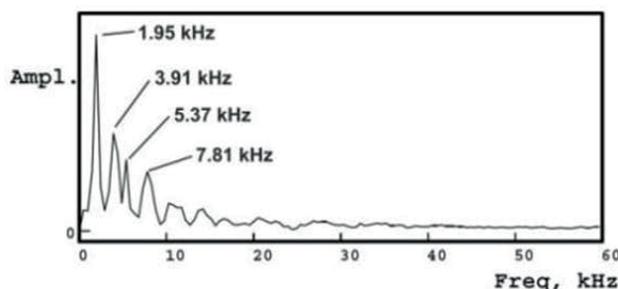


Abb. 9: Frequenzspektrum einer Impact Echo Messung, Stelle B-S.

Fig. 9: Spectrum of an impact echo measurement at location B-S.

## Verdankung

Das Projekt wird durch die Gebert Rüt Stiftung und den Kanton Uri gefördert. Wir möchten der Gebert Rüt Stiftung und dem Kanton Uri an dieser Stelle für die Unterstützung des Projektes danken.

## Literatur

- KISTER, B. ; ZIMMERLI, B.; FELLMANN, W. (2008): Über die Problematik einer systematischen Bewertung des Zustandes von älteren Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk. – Veröff. 6. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 22. und 23. Januar 2008, 227-239.
- KISTER, B. (2006): Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen von zerstörungsfreien Prüf- und Messverfahren in der Geotechnik. – Fachseminar Messen in der Geotechnik, TU Braunschweig, 23. und 24. Februar 2006, 31 - 78.
- SANSALONE, M. J. ; STRETT, W. B. (1997): Impact Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry. – Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 339