# Ein-Blick in die Mauer - Beurteilung von alten Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk mit Rating-System und zerstörungsfreien Prüfverfahren

Dr.-Ing. Bernd Kister
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, CC Konstruktiver Ingenieurbau, Horw, Schweiz

Dr. Johannes Hugenschmidt
Hochschule für Technik Rapperswil, Fachstelle Konstruktion und Bauwerkserhaltung, Rapperswil, Schweiz

**Zusammenfassung**

Im Rahmen des Verkehrswegebaus 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. Ein schneller Ersatz dieser grossen Anzahl von „betagten" Bauwerken ist nicht finanzierbar und auch volkswirtschaftlich nicht vertretbar. Folglich muss es das Ziel sein, einerseits die Nutzungsdauer dieser Bauwerke zu optimieren und andererseits eine eventuelle Gefährdung durch diese „betagten" Bauwerke möglichst auszuschliessen. Der erste Schritt hierzu, liegt in der Beurteilung des Zustandes der Bauwerke, aber auch ihrer konstruktiven Eigenschaften. An der Hochschule Luzern wurde in den vergangenen 8 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 ermitteln und zu bewerten. Da Unterlagen zum Aufbau dieser Bauwerke in der Regel fehlen, wird nun in einem Forschungsprojekt geprüft, welchen Beitrag zerstörungsfreie Prüfverfahren bei der Erkundung der konstruktiven Eigenschaften von alten Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk leisten können. Zum Einsatz kommen sowohl Verfahren mit akustischen Wellen als auch solche mit elektromagnetischen Wellen. Über erste Ergebnisse mit den Messverfahren Impact Echo und Georadar an einem 5 m langen und 1.8 m hohen, extra für das Projekt hergestellten Mauerwerksprobekörper wird berichtet.

## 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. 1.1). 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.

Der Beurteilung der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit von bestehender Bausubstanz und der Verlängerung der Lebenszyklen von Bauwerken kommt eine immer grössere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang wurden in der Schweiz die Norm SIA 269 sowie die zugehörigen Unternormen zur Erhaltung von Bauwerken eingeführt (vgl. z.B. Brühwiler, 2011). Die Norm SIA 269 legt fest, dass für alle Arten von Tragwerken eine Überwachung durchzuführen ist, deren Ziel es ist, ein unvorhergesehenes Tragverhalten, Schädigungsmechanismen und Gefährdungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Weiterhin sagt die Norm, dass Überprüfungen an den Tragwerken durchzuführen sind, die zum Ziel haben, die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich der vereinbarten Restnutzung nachzuweisen.

Um diesen Anforderungen nachkommen zu können, müssen Informationen sowohl zur Bauwerksgeometrie, der inneren Struktur von Bauteilen bzw. Bauwerken als auch den Materialparametern der Baustoffe vorliegen. Bei älteren Bauwerken liegen diese Daten in der Regel nicht oder nicht mehr vor. Insbesondere bei Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk, wie sie im Rahmen des Verkehrswegebaus vor ca. hundert Jahren erstellt wurden, liegen heute meist keine Pläne mehr zu deren Aufbau vor.

Abb. 1.1: Beispiele für die Verschiedenartigkeit der Stützbauwerke und ihres Mauerwerks aus Naturstein.

## 2. Konstruktive Eigenschaften und ihr Einfluss auf die Bauwerksstabilität

Die konstruktiven Eigenschaften des Bauwerks spielen insbesondere hinsichtlich der Beurteilung der Standsicherheit der Bauwerke eine wesentliche Rolle. Im GeoReport No. 31 (Chan, 1996) wird in einer Graphik aufgezeigt, dass Stützbauwerke aus Natursteinmauerwerk mit einem Schlankheitsgrad, d.h. einem Verhältnis Wandstärke am Fuss B zu Bauwerkshöhe H, kleiner 0.33 häufig von Schäden betroffen waren und wieder abgerissen werden mussten bzw. sogar kollabierten (Abb. 2.1). Bauwerke, deren Versagen mit hohen Konsequenzen verbunden war, waren hingegen mit einem grösseren Schlankheitsgrad als 0.33 erstellt worden und blieben stabil.

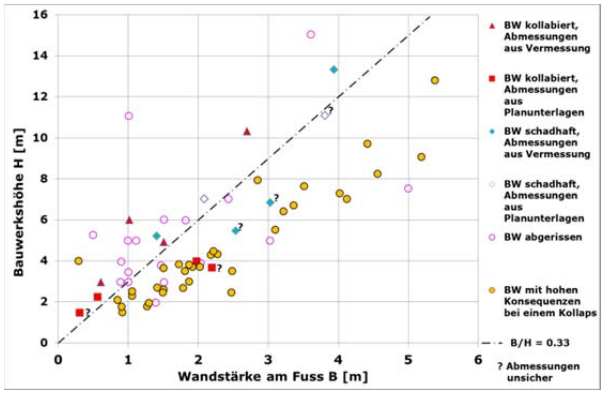


Abb. 2.1: Gegenüberstellung von Bauwerkshöhe H und Wandstärke am Fuss B aus dem Geo Report No. 31 (Chan, 1996, Darstellung modifiziert), Bauwerke mit einem Schlankheitsgrad B/H < 0.33 mussten demnach häufig wieder abgerissen werden oder wiesen Schäden auf bzw. kollabierten sogar.

Schwing (1991) hat ausgeführt, dass von 25 untersuchten alten Stützmauern die meisten einen Schlankheitsgrad zwischen 0.15 und 0.25 aufwiesen, dass aber alle diese Mauern Verformungen erlitten hatten und an den meisten dieser Bauwerke Reparaturen durchgeführt worden waren. Nahezu alle Bauwerke wiesen einen Rechteckquerschnitt auf und ihre rückwärtige Neigung war nahezu vertikal.

Untersuchungen von Burgoyne aus dem Jahr 1834 an 4 verschiedenen Mauerwerksquerschnitten haben bereits gezeigt, dass der Querschnittsform des Stützbauwerks und der Neigung der Lagerfugen einer Mauer eine erhebliche Bedeutung bei der Stabilität des Bauwerks zukommt (vgl. Abb. 2.2).

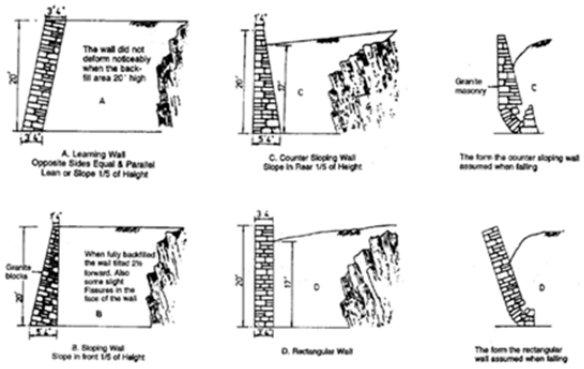


Abb. 2.2: Ergebnisse des Experiments von Burgoyne (1834) an 4 Stützbauwerken aus Natursteinmauerwerk mit unterschiedlichen Querschnittformen und Neigung der Lagerfugen, aber gleicher Wandstärke auf mittlerer Bauwerkshöhe (aus Chan, 1996)

Aus den vorliegenden Untersuchungen lässt sich somit schliessen, dass Bauwerke mit einem Schlankheitsgrad kleiner 0.3 eine geringere Stabilität aufweisen als solche mit einem Schlankheitsgrad grösser 0.3. Je kleiner der Wert für den Schlankheitsgrad ist, umso eher ist mit Schäden am Bauwerk zu rechnen.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen von Burgoyne, dass die Stabilität des Bauwerks durch Neigung der Lagerfugen des Mauerwerks zur Bergseite hin signifikant erhöht wird, auch für einen rechteckigen Mauerwerksquerschnitt. Ein Anzug des Mauerwerks auf der Bergseite kombiniert mit horizontalen Lagerfugen stellt hingegen keine gute konstruktive Lösung für die Stabilität eines Stützbauwerks aus Natursteinmauerwerk da.

Eine weitere wesentliche Grösse für die Stabilität von Mauerwerk ist der sogenannte Querverband, d.h. die Verzahnung und Einbindung der Mauerwerkssteine in die Tiefe. Bereits in den ersten Richtlinien zur Ausführung von Natursteinmauerwerk aus den 30er und 40er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden Regeln für die Anzahl und Verteilung der sogenannten Bindersteine, d.h. die Steine, die die vorderste Mauerwerksebene „zurückbinden“ bzw. nach hinten verankern, festgelegt (siehe Abbildungen 2.3 und 2.4).

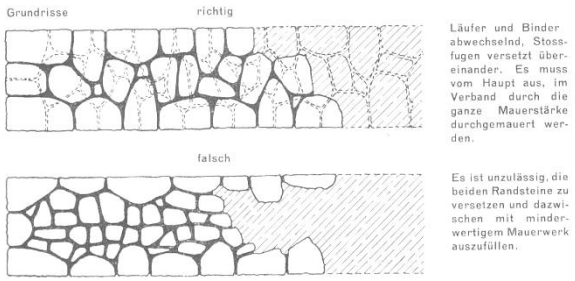


Abb. 2.3: Vorgaben für die Bindersteine in Natursteinmauerwerk gemäss der Richtlinie für die Ausführung von Natursteinmauerwerk von 1946.

Nach den Vorgaben der Richtlinie sollte mindestens jeder 3. Mauerwerksstein ein Binderstein sein und der Abstand zwischen Bindesteinen höchstens 1.8 m betragen.

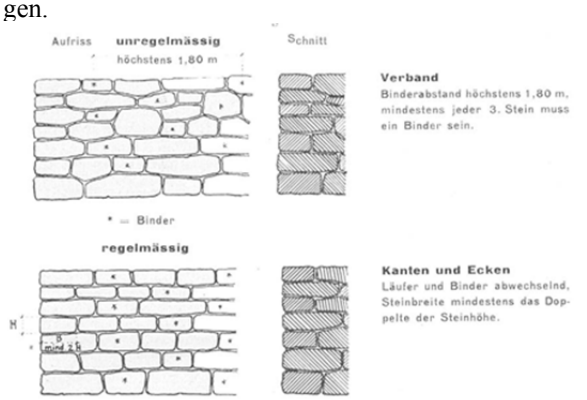


Abb. 2.4: Vorgaben für die Anzahl und Position von Bindersteinen in Natursteinmauerwerk gemäss der Richtlinie für die Ausführung von Natursteinmauerwerk von 1946.

## 3. Beurteilung und Bewertung mit dem Luzerner Rating-System

Aus den vorgenannten Gründen werden im „Luzerner Rating-System“ für Stützbauwerke aus Natursteinmauerwerk neben den Zustandsdaten des Bauwerks auch konstruktiven Eigenschaften des Bauwerks mit aufgenommen, auch wenn diese bei einer rein visuellen Bauwerksaufnahme in der Regel nicht ermittelt werden können. Das Rating-System untersucht somit die drei Bereiche

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

Für diese drei Bereiche werden einzelne Werte, so genannte Ratings, ermittelt, in die die folgenden Eigenschaften einfliessen:

konstruktive Eigenschaften $q_{Mk}$:
- Schlankheitsgrad der Mauer
- Einbindetiefe der Mauer und Neigung des Wandfussauflagers
- Eigenschaften der Steine
- Eigenschaften der Fugen
- Eigenschaften des Mauerwerks
- Entwässerung des Bauwerks

Zustand des Bauwerks $q_{Mz}$:
- Zustand des Gesamtbauwerks
- Zustand der Steine
- Zustand der Fugen
- Zustand der Entwässerungseinrichtungen

Zustand der „Umgebung“ $q_{TGz}$:
- Zustand Bewuchs auf und hinter dem Bauwerk
- Zustand „Untergrund“
- Zustand „Wasser“

Eine detaillierte Beschreibung des Rating-Systems findet sich in Kister et al (2008).

Die Ratings $q_{Mk}$, $q_{Mz}$ und $q_{TGz}$ können Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Sind die ermittelten Werte für $q_{Mk}$, $q_{Mz}$ und $q_{TGz}$ 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 einem guten Zustand bzw. guten konstruktiven Eigenschaften 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 Kennt-

nislücken vor. Letzterer Sachverhalt bedeutet, dass ein niedriges Rating bei den konstruktiven Eigenschaften nicht zwangsläufig als ungenügend hinsichtlich der Konstruktion zu interpretieren ist, sondern dass es Kenntnislücken gibt, die es, ggf. im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten für eine Instandsetzung, noch zu schliessen gilt.

Da zum einen zu den konstruktiven Eigenschaften dieser Bauwerke in der Regel keine Planunterlagen mehr vorliegen und diese auch visuell im Gelände nicht erfasst werden können und zum anderen das Öffnen des Mauerwerks mit hohen Kosten und einer Zerstörung der Bausubstanz verbunden ist, wird in einem aktuellen Forschungsvorhaben untersucht, inwieweit zerstörungsfreie Prüfverfahren helfen können, die fehlenden Informationen zu den konstruktiven Eigenschaften der Bauwerke zu ermitteln. Der Fokus liegt dabei auf

- der Ermittlung des Schlankheitsgrads des Bauwerks, d.h. der Bestimmung des Verhältnisses von Bauwerksstärke am Mauerwerksfuss zur Bauwerkshöhe,
- der Bestimmung der Querschnittsform und
- der Ermittlung der Ausführung des Querverbands.

Da die alten Stützbauwerke in der Regel nur eine geringe Einbindetiefe besitzen, lässt sich die Bauwerkshöhe meist recht einfach direkt messen. Für die Ermittlung des Schlankheitsgrads des Bauwerks muss daher noch die Wandstärke am Mauerwerksfuss ermittelt werden. Bestimmt man die Wandstärke des Bauwerks nicht nur auf dem Niveau des Wandfusses, sondern auf verschiedenen Höhen, so ergibt sich daraus auch die Querschnittsform.

Um den Abstand der Bindersteine und ihre Anzahl und Position im Mauerwerksverband zu bestimmen müssen die Steintiefen ermittelt werden. Geht man davon aus, dass das Mauerwerk korrekt nach der Richtlinie für die Ausführung von Natursteinmauerwerk von 1946 erstellt wurde, so müsste sich z.B. in einem repräsentativen Mauerwerksausschnitt aus 7 x 7 Steinen jeweils in der Horizontalen als auch in der Vertikalen mindestens 2 Bindersteine befinden, deren Steintiefe deutlich grösser ist als die ihrer Nachbarsteine.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens soll nun eine Messmethodik auf der Basis von zerstörungsfreien Messverfahren entwickelt werden, die eine einfache und kostengünstige Bestimmung der vorgenannten konstruktiven Eigenschaften der Bauwerke 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.

## 4 Mauerwerksprobekörper

Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind indirekte Messverfahren und bedürfen der Interpretation (vgl. z.B. Kister, 2006). Bei einem unbekannten 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. 4.1). Da in diesem Fall der Aufbau des Mauerwerksprobekörpers bekannt ist, lassen sich die Messergebnisse direkt mit den Bauwerkseigenschaften vergleichen und Fehlinterpretationen können so vermieden werden.

Abb. 4.1: Mauerwerksprobekörper an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

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. 4.2).

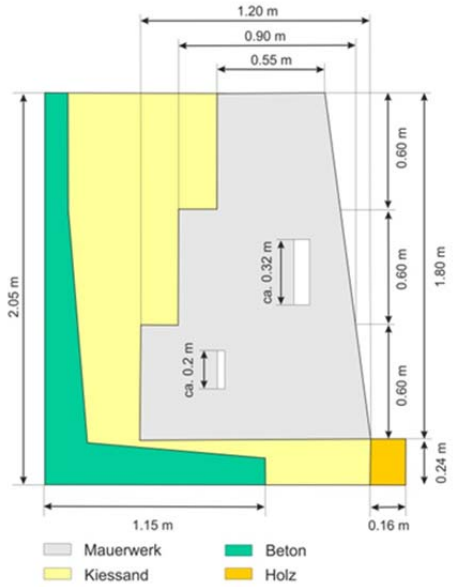


Abb. 4.2: Querschnitt des Mauerwerksprobekörpers.

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

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. 4.2), um deren Einfluss bei den Messungen mit zerstörungsfreien Messverfahren zu untersuchen.

Der rückseitige Abschluss des Bauwerks wird durch Betonwinkelplatten gebildet (Abb. 4.2). 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.

## 5 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.

Im Rahmen des Projekts werden die folgenden Messverfahren auf ihre Eignung für Untersuchungen an Natursteinmauerwerk überprüft:

- Impact Echo Verfahren (P-Wellen)
- Ultraschall-Impuls Messverfahren (S-Wellen)
- Spektralanalyse von Oberflächenwellen (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW)
- Georadar (elektromagnetische Wellen)

Eine erste Messreihe wurde im Herbst 2012 vorgenommen bevor die Mauer hinterfüllt wurde. Eine 2. Messreihe wurde im Frühjahr 2013 ausgeführt nach der Hinterfüllung des Bauwerks. Die Messungen mit akustischen Wellen werden von der Hochschule Luzern – Technik & Architektur, die Messungen mit dem Georadar von der Hochschule für Technik Rapperswil ausgeführt. Nachfolgend wird über erste Ergebnisse mit den Messverfahren Impact Echo und Georadar berichtet.

## 6 Impact Echo Verfahren

Das Impact Echo Verfahren wurde in den Jahren 1983 bis 1986 am U.S. National Bureau of Standards entwickelt und in den folgenden Jahren an der Cornell University weiterentwickelt. Zunächst wurden Bauteile aus Beton untersucht, später auch Mauerwerk aus Kunststeinen (vgl. Sansalone & Streett, 1997).

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 (Abb. 6.1).

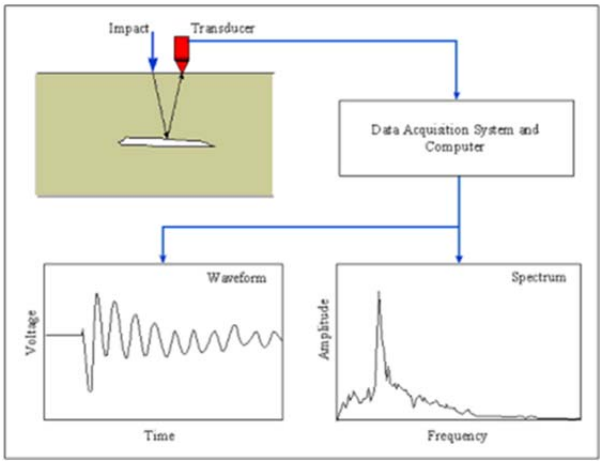


Abb. 6.1: Schematische Darstellung des Impact Echo Verfahrens.

Bei homogenen Platten, deren Dicke d klein gegenüber den anderen Abmessungen ist, ergibt sich im Frequenzspektrum eine signifikante Frequenzspitze (vgl. Abb. 6.1, unten rechts), die als Eigenwert der Platte interpretiert wird. Mit dieser Eigenfrequenz f und bei bekannter Wellengeschwindigkeit $v_p$ der Longitudinalwelle lässt sich nach Sansalone die Plattendicke d wie folgt bestimmen (Sansalone & Streett, 1997):

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

Die eigentliche Messgrösse ist bei diesem Verfahren also die Resonanzfrequenz. Um die Bauteildicke bzw. die Tiefenlage bestimmen zu können muss jedoch die Wellengeschwindigkeit $v_p$ bekannt sein. Der Vorteil des Verfahrens besteht vor allem darin, dass es auch bei Bauwerken angewendet werden kann, die nur von einer Seite her zugänglich sind, wie z.B. Stützbauwerke des Verkehrswegebaus.

Befinden sich im Laufweg weitere Unstetigkeiten wie z.B. horizontale Rissflächen, enthält das Spektrum noch weitere Maxima. Auch wenn anstatt Platten Bauteile mit anderen Querschnittsformen mit dem Verfahren untersucht werden, ergeben sich mehrere Maxima im Spektrum.

Lin & Sansalone (1992a, 1992b) untersuchten Betonbalken mit dem Impact Echo Verfahren, deren Länge mindestens 2 Mal grösser war als die Querschnittsabmessungen. Da sich auch in diesem Fall mehrere Frequenzpeaks ergeben, bestand die Problematik darin, diese Frequenzpeaks den Eigenschwingungen des Balkens zuzuordnen. Hierzu führten sie dynamische Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente durch und konnten so die Eigenfrequenzen identifizieren. Abb. 6.2 zeigt eine Zusammenstellung der aus diesen Untersuchungen gewonnenen Korrelationen zwischen Frequenz und Bauteilabmessungen.

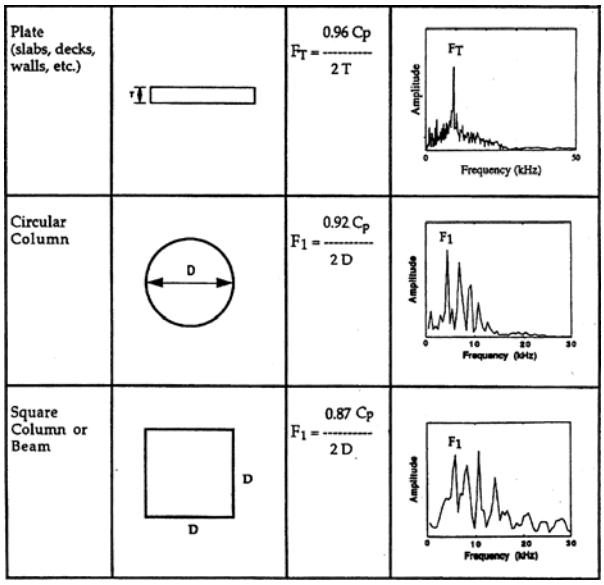


Abb. 6.2: Formeln und Frequenzspektren beim Impact Echo Verfahren bei unterschiedlichen Querschnitten von Betonteilen, $c_p$ = p-Wellengeschwindigkeit (Sansalone, 1997)

Die Untersuchungen von Sansalone (vgl. 1997) und Lin & Sansalone (1992a, 1992b) bezogen sich auf Betonbauteile, die zum einen homogen waren und zum anderen glatte, ebene Mantelflächen aufwiesen. Des Weiteren hatten die Untersuchungen ergeben, dass horizontale Untstetigkeiten, wie z.B. Rissflächen auch zu einer Zunahme der Frequenzpeaks im Spektrum führten. Es stellte sich daher die Frage, auf welche Art und Weise die Frequenzpeaks bei einer Impact Echo Messung an einer Natursteinmauer identifiziert werden können. Erschwerend kommt bei Natursteinmauerwerk hinzu, dass hier sowohl Eigenfrequenzen der Wand und Eigenfrequenzen der Steine auftreten können.

Da die Mauerwerkssteine dieser alten Mauern aus Naturstein in der Regel keine ideale Quaderform haben und zudem die Grösse der Steine sehr stark variieren kann, sind aufwändige numerische Berechnungen zur Identifizierung der Eigenfrequenzen hier keine Lösung.

In der Akustik werden die Eigenschwingungen eines Quaders mit sogenannten schallharten Wänden mit Hilfe der Lösung der Helmholtz-Gleichung bestimmt. Auf diese Weise lassen sich die theoretischen Eigenfrequenzen f(l,m,n) eines Quaders mit einer einfachen Formel berechnen:

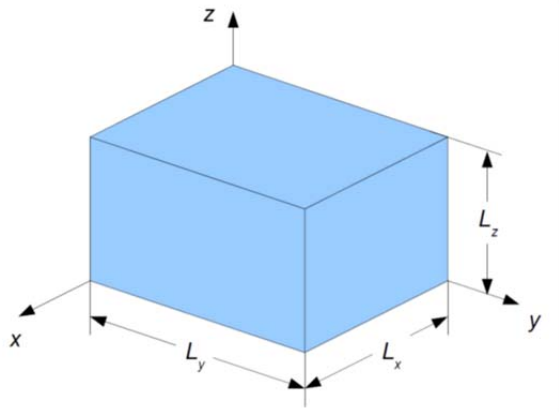


Abb. 6.3: Quader mit schallharten Wänden

$$f(l,m,n) = \frac{v_p}{2} \cdot \sqrt{\frac{l^2}{L_x^2} + \frac{m^2}{L_y^2} + \frac{n^2}{L_z^2}}, \qquad l,m,n = 0,1,2,\ldots$$

Sind die Abmessungen $L_x$ und $L_y$ gross, so lassen sich in erster Näherung die beiden vorderen Terme unter der Wurzel vernachlässigen. Mit n = 1 ergibt sich dann:

$$f = \frac{v_p}{2\,L_z} \cdot, n = 1$$

was, bis auf den Faktor 0.96, der Plattengleichung von Sansalone entspricht.

### 6.1 Bestimmung der Wellengeschwindigkeit

Für die Bestimmung der Abmessungen der Steine wird die Wellengeschwindigkeit des Gesteins benötigt, für die Bestimmung der Wandstärke hingegen die Wellengeschwindigkeit im Mauerwerk. 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 und die Wellengeschwindigkeit wird daher in Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil entsprechend variieren. Ziel der Untersuchungen war es daher auch festzustellen, in wie weit die Wellengeschwindigkeit im Mauerwerk variieren kann 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. Dort wird das eingehende Signal registriert. 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:

$$v = \frac{s}{\Delta t}$$

Man unterscheidet 3 Arten von Transmissionsmessungen (Abb. 6.4):

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

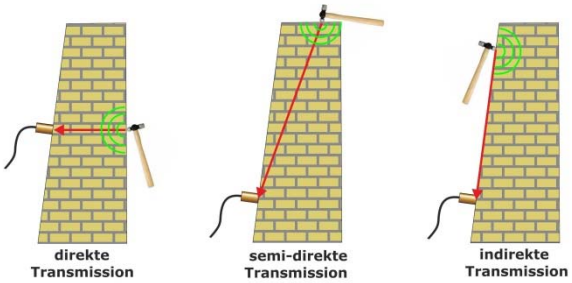


Abb. 6.4: Arten der Transmissionsmessung zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeit an einem Stützbauwerk

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 ± 150 m/s, wie erwartet, höher und wurde ebenfalls aus 5 Messungen ermittelt.

In Tabelle 6.1 sind die Mittelwerte der Geschwindigkeiten an den verschiedenen Stellen angegeben, Abb. 6.5 zeigt die Lage der Messstellen für die Durchschallungsmessungen am vermörtelten Mauerwerk im mittleren Teil B des Probekörpers. Die Messstellen mit den geringeren Wellengeschwindigkeiten können den Bereichen mit einem höheren Mörtelanteil im Mauerwerk zugeordnet werden (Abb. 6.6), während an den Messstellen mit hohen Geschwindigkeiten der Mörtelanteil im Mauerwerk vergleichsweise gering ist (Abb. 6.7).

| 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 |

Tabelle 6.1: Bei der Durchschallung des Mauerwerksprobekörpers gemessene Wellengeschwindigkeiten

Die indirekte Transmissionsmessung im Teil B des Mauerwerksprobekörpers ergab für die Wellengeschwindigkeit Werte zwischen 5000 m/s und 5600 m/s. Diese höheren Werte für die Wellengeschwindigkeit sind dadurch zu erklären, dass der Fugen- und damit der Mörtelanteil in vertikaler Richtung (im Haupt gemessen) geringer ist als in horizontaler Richtung (über die Wandstärke gemessen).

Abb. 6.5: Messpunkte der Durchschallungsmessungen am vermörtelten Mauerwerk, Teil B des Mauerwerksprobekörpers.

Abb. 6.6: Vermörteltes Mauerwerk im Abschnitt B, mittleres Drittel, mit hohem Mörtelanteil

Abb. 6.7: Vermörteltes Mauerwerk im Abschnitt B, unteres Drittel, mit hohem Steinanteil

## 6.2 Bestimmung der Steintiefe

Mit dem Impact Echo Verfahren wurden Messungen an einzelnen Steinen des Mauerwerks vorgenommen. Stellvertretend werden die Ergebnisse dieser Messungen am Beispiel des Mauerwerkssteins VM-S03 im Teil B des Mauerwerksprobekörpers (Abb. 6.8) vorgestellt und erläutert.

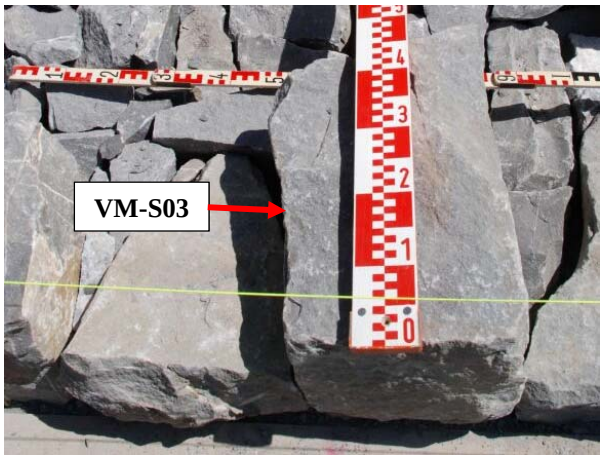


Abb. 6.8: Mauerwerksstein VM-S03 im Teil B des Mauerwerksprobekörpers, aufgenommen während des Baus

Es wurden jeweils 10 Messungen an einem Mauerwerksstein ausgeführt und die Spektren berechnet. Aus diesen 10 Spektren wurde ein Mittelwert gebildet und die Werte der Frequenzspitzen ermittelt (Abb. 6.9).

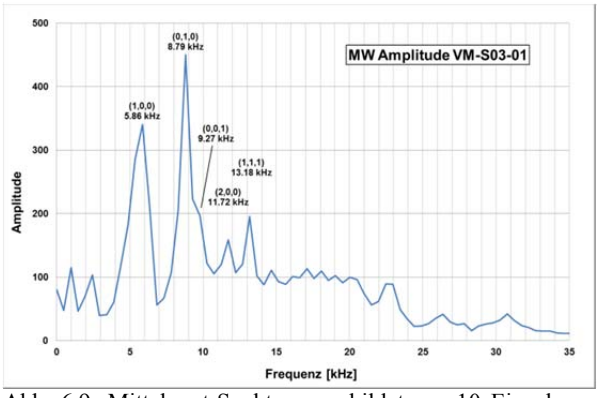


Abb. 6.9: Mittelwert-Spektrum, gebildet aus 10 Einzelmessungen am Mauerwerksstein VM-S03.

Für die Bestimmung der Steintiefe wird angenommen, dass die Mauerwerkssteine näherungsweise die Form eines Quaders aufweisen. Dann lassen sich die Eigenfrequenzen f(l,n,m) nach der Lösung der Helmholtz-Gleichung bestimmen. Für die Wellengeschwindigkeit des Gesteins wurde $v_p$ = 5750 m/s eingesetzt. In Tabelle 6.2 sind die theoretischen Frequenzen f(l,m,n) den gemessenen Frequenzen des Mittelwert-Spektrums aus Abb. 6.9 gegenübergestellt. Man ersieht aus der Tabelle, dass die theoretischen Eigenfrequenzen höhere Werte annehmen als die gemessenen Frequenzen.

| l | m | n | $f_{Theorie}$ [Hz] | $f_{Messung}$ [Hz] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 6250 | 5860 |
| 0 | 1 | 0 | 8984 | 8790 |
| 0 | 0 | 1 | 9914 | 9270 |
| 1 | 1 | 1 | 14767 | 13180 |
| 2 | 0 | 0 | 12500 | 11720 |

Tabelle 6.2 Gegenüberstellung von theoretischen Frequenzen f(l,m,n) und gemessenen Frequenzen des Mittelwert-Spektrums aus Abb. 6.9 für den Mauerwerksstein VM-S03.

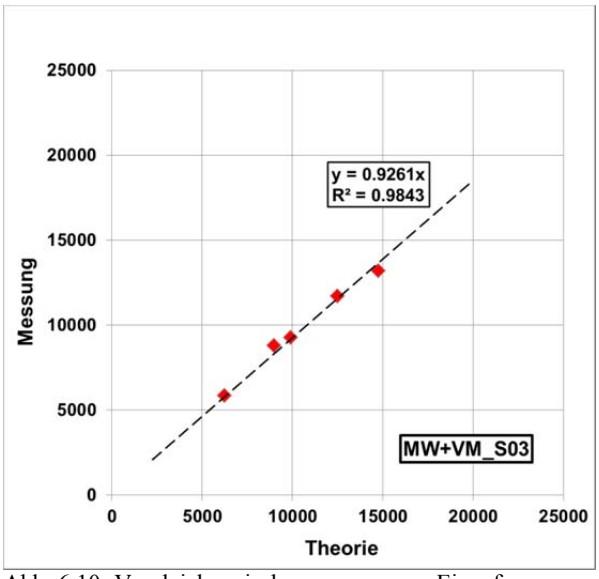


Abb. 6.10: Vergleich zwischen gemessenen Eigenfrequenzen und theoretischen Eigenfrequenzen nach der Lösung der Helmholtz-Gleichung für den Mauerwerksstein VM-S03.

In Abb. 6.10 sind die Wertepaare der theoretischen und gemessenen Eigenfrequenzen graphisch dargestellt. Es lässt sich eine Ausgleichgerade erstellen und ein Faktor $\alpha \approx 0.93$ als Verhältnis zwischen gemessener und theoretischer Frequenz bestimmen. Dieser Wert von ca. 0.93 für den Faktor $\alpha$ stimmt sehr gut mit den Werten überein, die Sansalone (1997) bzw. Lin & Sansalone (1992a, 1992b) in ihren Formeln angeben (vgl. Abb. 6.2).

Legt man den vorstehend beschriebenen Sachverhalt zu Grunde, so lässt sich die Steintiefe über einen iterativen Prozess ermitteln, zumal ja 2 der drei Steinabmessungen im Haupt direkt gemessen werden können. In Tabelle 6.3 sind die mittleren, aus den Frequenzen ermittelten Abmessungen des Mauerwerkssteins VM-S03 den tatsächlichen Abmessungen gegenübergestellt.

| | berechnet | Minimalwert gemessen | Maximalwert gemessen |
|---|---|---|---|
| Lx [m] | 0.46 m | 0.43 m | 0.48 m |
| Ly [m] | 0.32 m | 0.32 m | 0.32 m |
| Lz [m] | 0.29 m | 0.29 m | 0.33 m |

Tabelle 6.3: Abmessungen des Mauerwerkssteins VM-S03, berechnet aus den Frequenzen, im Vergleich zu den gemessenen Abmessungen

Bei den bisher durchgeführten Untersuchungen an den Mauerwerkssteinen des Mauerwerksprobekörpers an der HSLU konnten zumindest die Eigenfrequenzen f(1,0,0), f(0,1,0), f(0,0,1) und f(1,1,1) im Spektrum identifiziert bzw. zugeordnet werden, so dass sich aus mindestens 4 Punkten eine Ausgleichsgerade erstellen liess. Die Werte für $\alpha$ lagen bei den 13 untersuchten Steinen, die im Mauerwerk eingebaut waren, im Intervall zwischen 0.86 und 0.97. Die Abweichungen von der idealen Quaderform spielen hier sicherlich eine Rolle, dennoch sollte es mit diesem Verfahren möglich sein die Bindersteine zu identifizieren.

### 6.3 Bestimmung der Wandstärke

Für die Bestimmung der Wandstärke wurde die Gleichung für eine Platte von Sansalone verwendet (Abb. 6.2, oben). Es wurden Messungen mit Abtastraten von 1 µs und 10 µs durchgeführt und ausgewertet.

Die Messungen am Mauerwerksstein VM-S03 ergaben im Spektrum eine Frequenzspitze bei 2440 Hz, die der p-Welle als Resonanzfrequenz für die Wandstärke zugeordnet wird (vgl. Abb. 6.9). Gemäss den Durchschallungsmessungen liegt die Wellengeschwindigkeit im unteren Drittel des Mauerwerksprobekörpers zwischen 4500 m/s und 5000 m/s (vgl. Tabelle 6.1, Steine B-O und B-R). Mit der Plattenformel von Sansalone ergibt sich daraus eine Wandstärke von 0.89 m respektive 0.98 m. Die tatsächliche Wandstärke in diesem Bereich ist etwas grösser und liegt bei ca. 1.15 m.

Beim Stein B-F (vgl. Bild 6.5) wurde bei der Durchschallung mit 4100 m/s die geringste Wellengeschwindigkeit in diesem Abschnitt gemessen. Im Frequenzspektrum wurde der p-Welle als Resonanzfrequenz für die Wandstärke f = 2930 Hz zugeordnet (Abb. 6.11). Mit der Plattenformel von Sansalone ergibt sich dann für die Wandstärke d = 0.67 m. Die tatsächliche Wandstärke ist mit ca. 0.85 m auch hier etwas grösser.

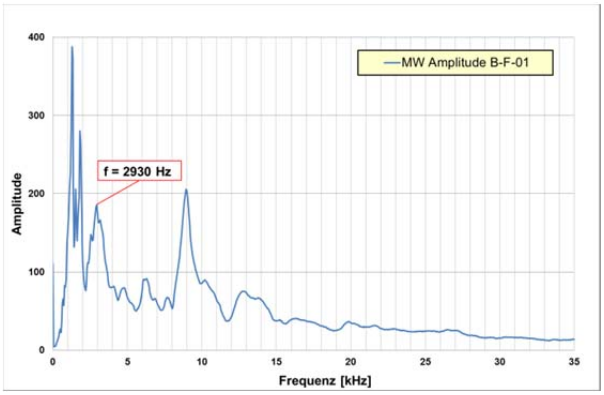


Abb. 6.11: Mittelwert-Spektrum, gebildet aus 10 Einzelmessungen am Mauerwerksstein B-F (vgl. Abb. 6.5).

Eine Messung am Mauerwerksstein B-A1, oberes Drittel des Probekörpers, ergab eine Wandstärke von etwa 0.7 m mit einer Wellengeschwindigkeit $v_p$ = 4850 m/s und einer Frequenz f = 3320 Hz. Die tatsächliche Wandstärke bei Stein B-A1 liegt bei ca. 0.6 m.

Die bisher ausgeführten Messungen und Auswertungen zeigen, dass die Wandstärke eines Stützbauwerks aus vermörteltem Natursteinmauerwerk mit dem Impact Echo Verfahren mit einer Genauigkeit von ca. 20% bis 25% bestimmt werden kann, wenn ein ausreichender Kontrast zwischen Mauerwerk und Hinterfüllung besteht. Die Genauigkeit, mit der die Wandstärke ermittelt werden kann, hängt dabei wesentlich davon ab mit welcher Genauigkeit zuvor die Wellengeschwindigkeit im Mauerwerk ermittelt werden konnte.

## 7 Georadar

Das Georadar basiert auf der Ausbreitung elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen, die in der Regel im Dezimeterbereich liegen. Mit dem Georadar können sowohl Transmissions- als auch Reflexionsmessungen durchgeführt werden. Bei der Reflexionsmessung wird ein elektromagnetisches Signal von einer Antenne abgestrahlt und an Grenzflächen reflektiert (Abb. 7.1, rechts). Das reflektierte Signal wird von einer zweiten Antenne empfangen und kann, nach Aufbereitung durch die Zentraleinheit des Messsystems, auf einem Monitor dargestellt und zur weiteren Bearbeitung auf einem PC auf Datenträger abgespeichert werden.

Eine einzelne Messung, bestehend aus Messwerten über eine bestimmte Zeit an einem Ort, wird als Zeitreihe, Spur, Einzelspur oder auch Scan bezeichnet. Diese Zeitreihe kann auf verschiedene Arten dargestellt werden. Im sogenannten Wiggle-Modus wird eine Kurve geplottet, bei der vielfach die zwischen der Kurve und dem Nullpunkt liegenden Flächen eingefärbt werden. Eine andere übliche Darstellung ist die Codierung der Signalstärke in Farben oder Graustufen.

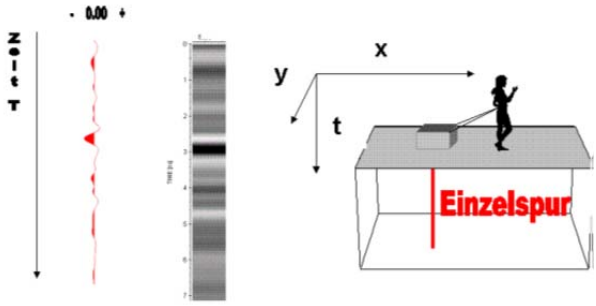


Abb. 7.1: Einzelspur im Wiggle-Modus (links), in Graustufendarstellung (Mitte) und schematische Darstellung der Einzelmessung an einem Ort (rechts)

Die physikalische Grundlage der Ausbreitung von Radarwellen ist durch die Maxwellgleichungen gegeben und als elektromagnetische Welle breitet sie sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit (c = 300'000 km/s bzw. 0.3 m/ns) aus. In einem Medium reduziert sich die Wellengeschwindigkeit nach der Gleichung:

$$c_m = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$$

$\varepsilon_r$ ist hierbei die relative Dielektrizitätskonstante und $\mu_r$ ist die relative Permeabilität. Beide Grössen sind materialabhängig, jedoch kann die relative Permeabilität, ausser bei ferromagnetischen Stoffen, in guter Näherung gleich 1 gesetzt werden. Die elektromagnetische Welle erfährt ausserdem noch eine Dämpfung während sie sich in Materie fortbewegt. Wie bei den akustischen Wellen, so gibt es auch hier eine geometrische Dämpfung, d.h. die Amplituden nehmen bei Kugelwellen umgekehrt proportional zum Abstand von der Quelle ab. Zudem findet eine materialabhängige Dämpfung der Welle statt, die einer Exponentialfunktion der Form $e^{-\alpha r}$ folgt. Die materialabhängige Dämpfungskonstante

α ist proportional zur elektrischen Leitfähigkeit $\sigma_{el}$ und umgekehrt proportional zur Wurzel der Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon_r$.

$$\alpha = \frac{1635\,\sigma_{el}}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Dies bedeutet, dass sich die Eindringtiefe der Radarwelle mit zunehmender Leitfähigkeit signifikant verringert.

Da die Eindringtiefe und die Auflösung abhängig sind von der Wellenlänge bzw. der Frequenz des verwendeten Signals, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene Radarantennen mit Frequenzen von 400 MHz, 900 MHz, 1.5 GHz und 2.6 GHz eingesetzt.

### 7.1 Bestimmung der Wellengeschwindigkeit

Am Block mit der Bezeichnung B1 wurden sowohl Reflexionsmessungen als auch Transmissionsmessungen mit dem Georadar durchgeführt (Abb. 7.1).

Abb. 7.1: Messung mit Georadar an einem Einzelstein, Block B1, zur Ermittlung der Wellengeschwindigkeit im Gestein

Die erhaltenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten $c_m$ für die Radarwelle variieren zwischen 0.118 m/ns (Reflexionsmessung) und 0.123 m/ns (Transmissionsmessung). Der Unterschied bei der Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit den beiden Verfahren beträgt somit ca. 5%.

### 7.2 Bestimmung der Steintiefe

Zur Detektion von Bindersteinen bzw. zur Ermittlung der Steintiefen wurden stationär Reflexionsmessungen an einzelnen Steinen durchgeführt. Abb. 7.2 zeigt die ermittelten Einzelspuren im Wiggle-Modus für 2 Mauerwerkssteine, TR-F_S06 und B1 im Bereich A, Trockenmauerwerk.

Bei dem Mauerwerksstein TR-F_S06 ist bei ca. 5 ns (blaue Linie) eine deutliche Reflexion zu erkennen. Die Umrechnung in ein Tiefenmass führt hier zu einer Steintiefe von ca. 0.3 m. Dieser Stein wurde während des Baus des Mauerwerksprobekörpers vermessen und besitzt eine maximale Steintiefe von 0.26 m.

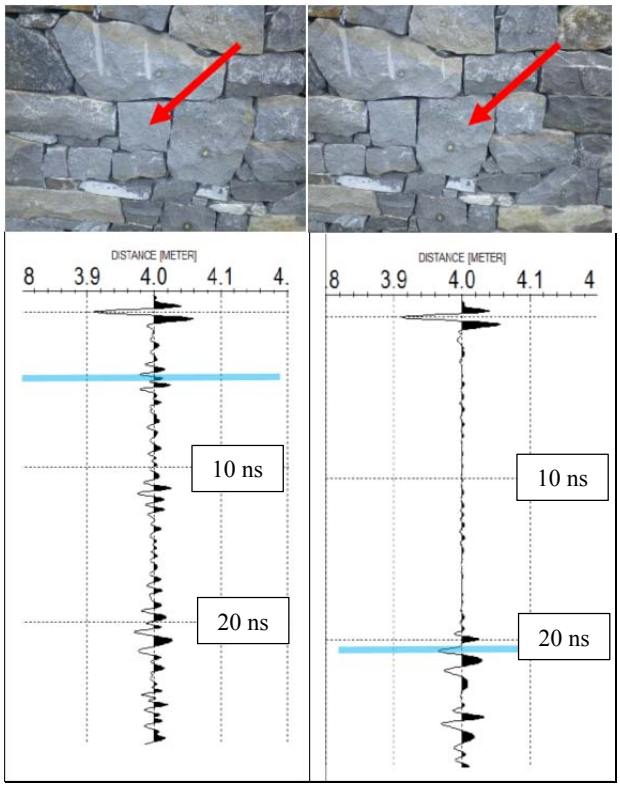


Abb. 7.2: Georadarmessresultate an Einzelsteinen im Abschnitt A des Mauerwerksprobekörpers, Trockenmauerwerk, links: Stein TR-F_S06, rechts: Block B1.

Beim Block B1 tritt eine erste Reflexion erst bei ca. 20 ns auf. Die Umrechnung in ein Tiefenmass ergibt hier eine Steintiefe von ca. 1.2 m. Auch der Block B1 wurde beim Einbau in das Mauerwerk vermessen. Er weist Kantenlängen zwischen 1.16 und 1.20 m auf.

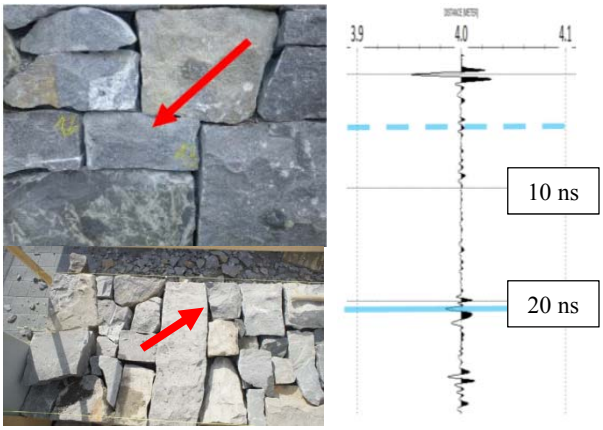


Abb. 7.3: Messung mit Georadar an einem Einzelstein, Stein C13, zur Ermittlung der Steintiefe.

Beim Mauerwerksstein C13 traten deutliche Reflexionen bei ca. 20 ns auf (Abb. 7.3, rechts). Dieser Stein ist jedoch kein Binderstein, wie man aus Abb. 7.3, unten links deutlich erkennt. Die starken Reflexionen stammen von der Rückseite der Wand. Aufgrund des sehr engen und mit Sand verfüllten Fugenraums treten hier bei ca. 5 ns und bei 10 ns nur sehr schwach ausgebildete Reflexionen auf. In solchen Fällen besteht bei in-situ Messungen die Gefahr einer Fehlinterpretation.

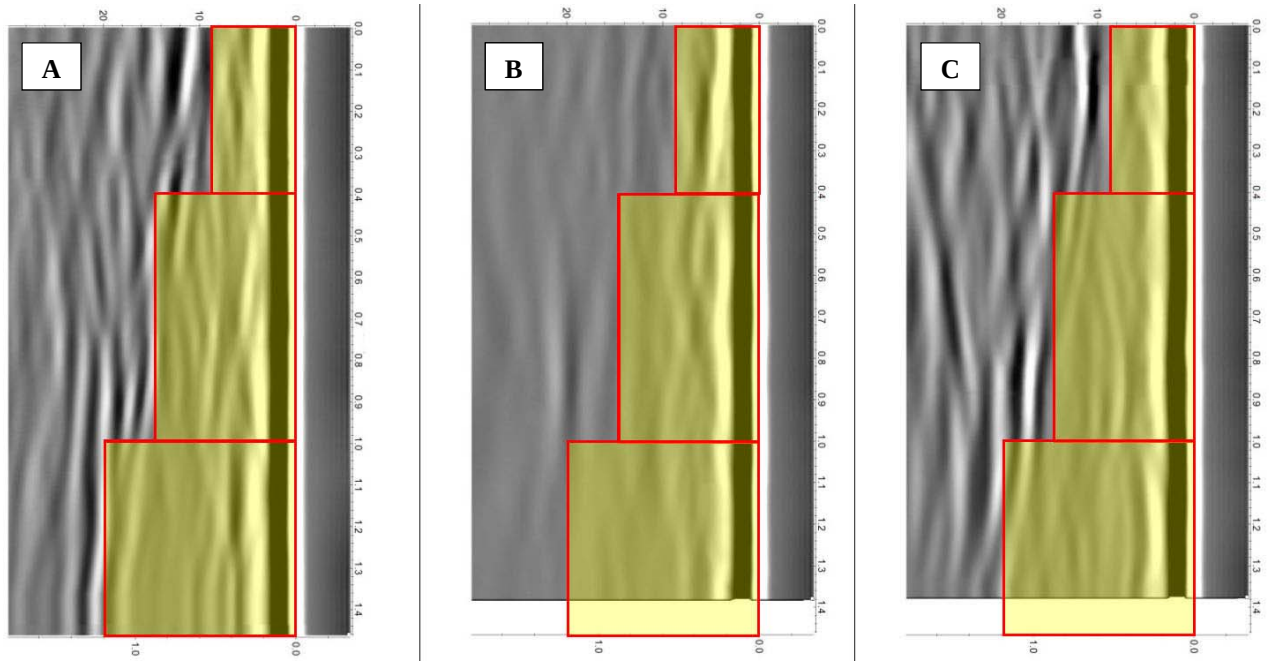


Abb. 7.4: Ergebnis der Georadarmessungen in Graustufendarstellung in Vertikalschnitten in den Abschnitten A - Trockenmauerwerk, B – vermörteltes Mauerwerk und C – Mauerwerk, Fugenraum mit Sand verfüllt, Messung erfolgte vor der Hinterfüllung

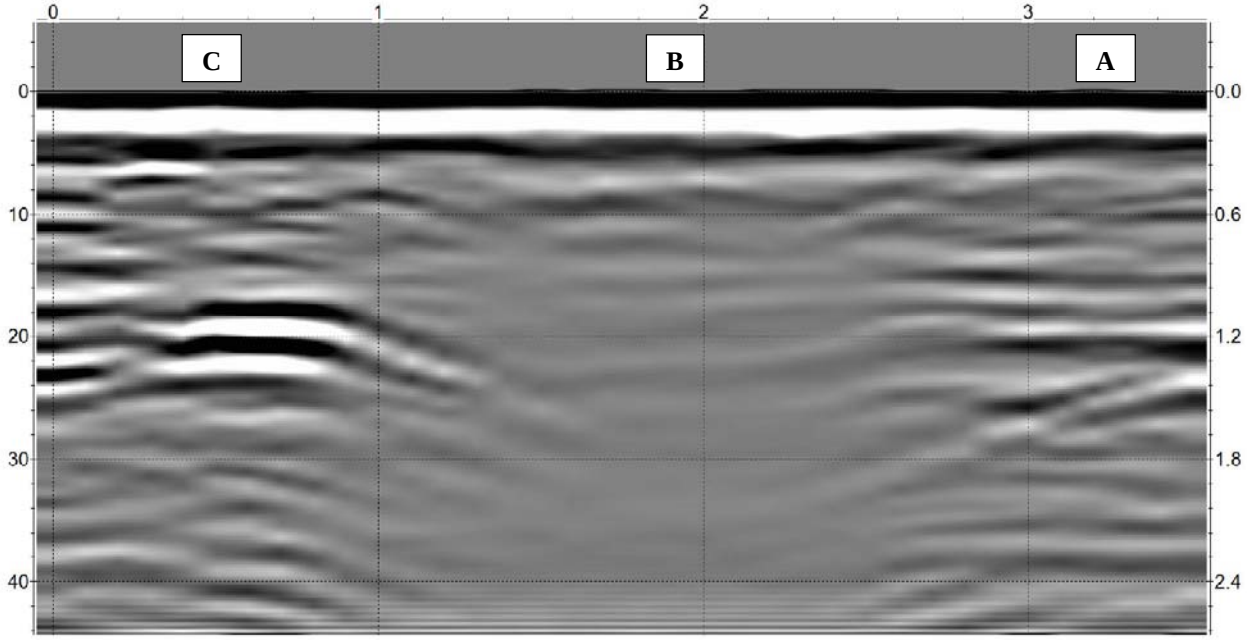


Abb. 7.5: Ergebnis der Georadarmessungen mit einer 400 MHz-Antenne in Graustufendarstellung in einem Horizontalschnitt auf Niveau 1.33 m, d.h. im obersten Drittel des Bauwerks, A; Trockenmauerwerk, B: vermörteltes Mauerwerk, C: Mauerwerk, Fugenraum mit Sand verfüllt. Auffällig ist hier, dass im Bereich B mit vermörteltem Mauerwerk nur noch geringe Reflexionen von der Wandrückseite vorhanden sind. Messung erfolgte vor Hinterfüllung des Probekörpers

Die Messungen an den Einzelsteinen mit einer hochfrequenten Radarantenne haben gezeigt, dass die Detektion von Bindersteinen mit dem Georadar in allen 3 Bereichen - Trockenmauerwerk, vermörteltes Mauerwerk und Mauerwerk mit Sandfüllung in den Fugen – grundsätzlich möglich ist.

### 7.3 Bestimmung der Wandstärke

Zur Bestimmung der Wandstärke und der Querschnittsform wurden Georadarmessungen mit 3 Antennen mit Frequenzen von 400 MHz, 900 MHz und 1.5 GHz durchgeführt. Dabei wurden im Abstand von 0.1 m vertikale Profile aufgenommen.

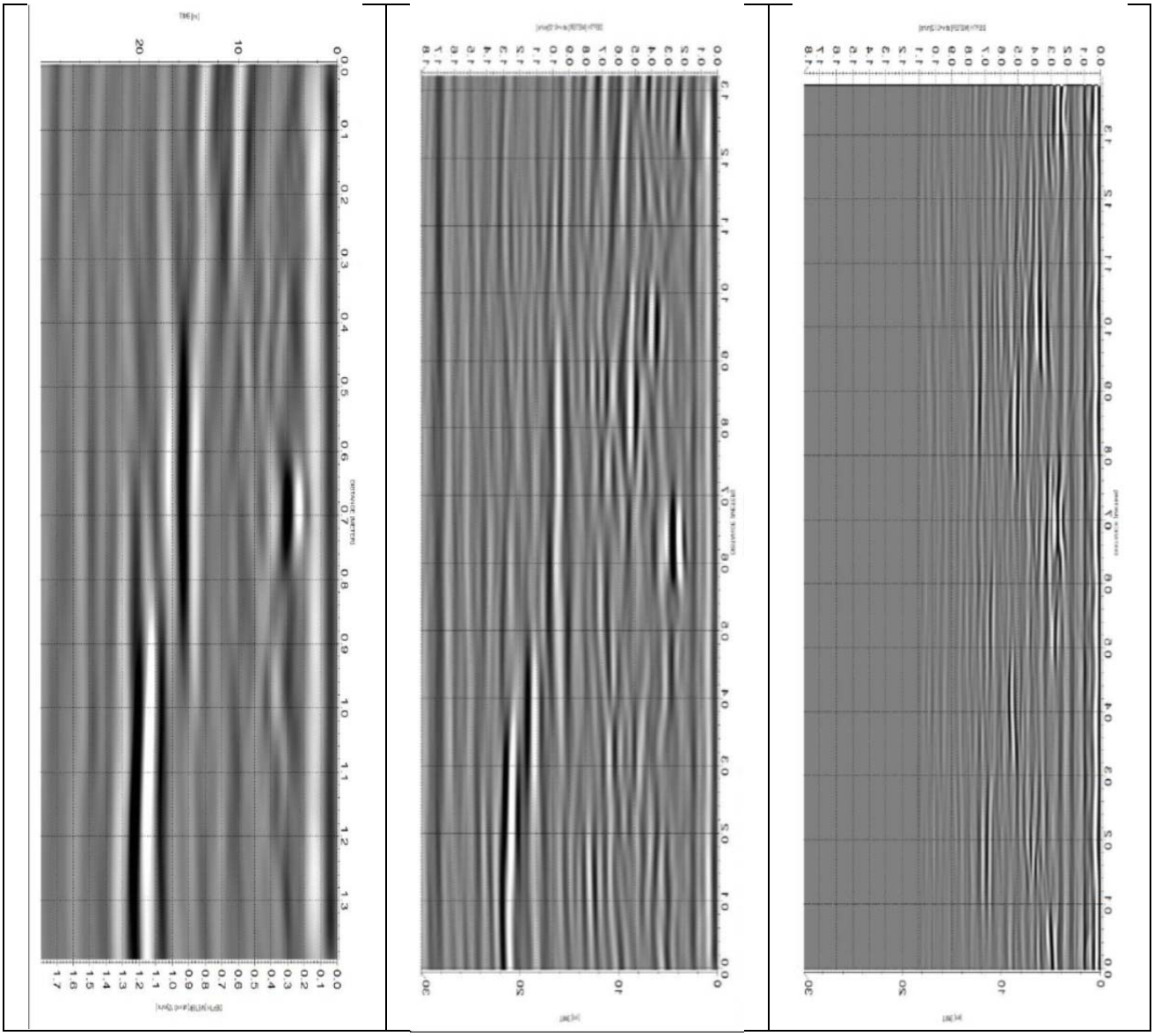

Abb. 7.6: Ergebnisse der Georadarmessungen in Graustufendarstellung in einem Vertikalschnitt bei 0.68 m im Abschnitt A; Trockenmauerwerk, vor Hinterfüllung, links: 400 MHz-Antenne, Mitte: 900 MHz-Antenne, rechts: 1.5 GHz-Antenne. Mit der 400 MHz-Antenne wird die Rückseite des Mauerwerks gut erkannt, während mit der 1.5 GHz-Antenne die Rückseiten der Mauerwerkssteine besser erkennbar werden.

Zunächst wurden Messungen ausgeführt bevor die Mauer mit Kiessand hinterfüllt wurde. In den Abschnitten mit Trockenmauerwerk (A) und Mauerwerk mit Fugen mit Sandfüllung (C) konnte in diesem Fall die Rückseite des Mauerwerks durch deutliche Reflexionen erkannt werden (Abb. 7.4 und 7.5).

Überraschenderweise ergaben sich im Bereich B mit vermörteltem Mauerwerk stark abgeschwächte Reflexionen an der Rückwand, obwohl dieser Teil am ehesten als monolithischer Block angesehen werden kann. Ursache für diesen Effekt dürfte der für den Bau des vermörtelten Mauerwerks verwendete Kalkmörtel sein. Dieser bindet Feuchtigkeit und erhöht damit die Leitfähigkeit im Mauerwerk. Eine erhöhte Leitfähigkeit führt jedoch, wie vorstehend erläutert, zu einer höheren Dämpfung des Signals und zu geringeren Eindringtiefen.

Nach der Hinterfüllung des Mauerwerksprobekörpers wurde eine 2. Messkampagne mit dem Georadar durchgeführt. Es zeigte sich, dass durch die Hinterfüllung der Mauer der Kontrast an der Materialgrenze Mauerwerk - Hinterfüllung für das Messverfahren Georadar signifikant reduziert worden war. Reflexionen waren mit den konventionellen Auswerteverfahren weit weniger gut zu erkennen. Zurzeit wird nach Möglichkeiten gesucht die Auswertung hier noch zu optimieren.

## 8 Zusammenfassung

Für die Beurteilung der Standsicherheit eines Stützbauwerks aus Natursteinmauerwerk sind der Schlankheitsgrad des Bauwerks, seine Querschnittsform und die Ausführung des Querverbands von grosser Bedeutung. Da bei den rund 100-jährigen Bauwerken im Verkehrswegebau in der Regel keine Planunterlagen vorliegen und damit diese Informationen nicht vorhanden sind, wird in einem Forschungsprojekt an der Hochschule Luzern zurzeit geprüft welche zerstörungsfreien Messverfahren eingesetzt werden können, um diese Informationen zu gewinnen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte bisher aufgezeigt werden, dass Informationen zum Querverband, d.h. Position und Steintiefe von Bindersteinen im Mauerwerk, sowohl mit dem Impakt Echo Verfahren als auch mit dem Georadar mit ausreichender Genauigkeit gewonnen werden können.

Bei der Ermittlung der Wandstärke und damit letztlich auch der Feststellung des Bauwerksquerschnitts spielt der Kontrast zwischen Mauerwerk und Hinterfüllung eine sehr grosse Rolle. Ist dieser ausreichend gross lassen sich mit dem Georadar Wandstärke und Querschnittform gut bestimmen. Sind im Mauerwerk jedoch Stoffe enthalten, die zu einer erhöhten Leitfähigkeit führen, kann die Eindringtiefe signifikant reduziert werden und Reflexionen von der Rückseite der Wand sind nicht mehr zu erkennen. Andererseits bietet die unterschiedliche Dämpfung verschiedener Materialien auch die Möglichkeit verschiedene Fugenfüllungen zu unterscheiden.

Die Anwendung des Impact Echo Verfahrens zur Bestimmung der Wandstärke mit der Auswertung nach der Gleichung für eine Platte nach Sansalone führt zurzeit noch zu Fehlern in der Grössenordnung von 20% bis 25%. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die Genauigkeit mit der die p-Wellengeschwindigkeit im Mauerwerk bestimmt werden kann. Auch der Einfluss anderer Grössen, wie z.B. die Sampling-Rate, muss in den weiteren Untersuchungen noch näher betrachtet werden.

**Verdankung**

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

**Literatur**

CHAN, Y. C.: Study of old masonry retaining walls in Hong Kong, Geo Report No. 31, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Government of Hong Kong, Special Administrative Region, 1996, reprinted 2000

HUGENSCHMIDT, J.: Geophysics and non-destructive testing for transport infrastructure, with special emphasis on ground penetrating radar, Dissertation, ETH Zürich, ETH N o 19225, 2010

HUGENSCHMIDT, J.; KALOGEROPOULOS, A.: The inspection of retaining walls using GPR, Journal of Applied Geophysics, 67: 335-344, 2009

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.

LIN, Y.; SANSALONE, M.: Transient response of thick rectangular bars subjected to transverse elastic impact, J. Acoust. Soc. Am., 91 (5), pp. 2674 – 2685, May 1992b

LIN, Y.; SANSALONE, M.: Transient response of thick circular and square bars subjected to transverse elastic impact, J. Acoust. Soc. Am., 91 (2), pp. 885 – 893, Feb. 1992a

SANSALONE, M. J.; STREETT, W. B. (1997): Impact Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry. – Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 339

SCHWING, E.: Standsicherheit historischer Stützwände, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 121, 1991

ISRM (International Society for Rock Mechanics): Commission on classification of rock masses, basic geotechnical description of rock masses, 1980

Schweizerischer Baumeisterverband: Richtlinien für die Ausführung von Natursteinmauerwerk entsprechend den besonderen Bestimmungen der SBB, Herausgegeben vom Schweizerischen Baumeisterverband unter Mitwirkung der Schweizerischen Bundesbahnen, 2. Auflage, A. G. Verlag Hoch- und Tiefbau, Zürich, 1946

SIA V 178: Empfehlung Naturstein-Mauerwerk, 1996, ersetzt durch SIA 266/2

SIA 266/2: Schweizer Norm Bauwesen, Natursteinmauerwerk, SIA, 01/2012

SIA 269/6-1:2011: Schweizer Norm Bauwesen, Erhaltung von Tragwerken – Mauerwerksbau,
Teil 1: Natursteinmauerwerk, 2011