



Bericht

Nr.:19097/1

Auftraggeber:	Sihltal Zürich Uetliberg Bahn AG Wolframplatz 21 8045 Zürich
Auftrag:	Materialtechnische Untersuchung der Stützmauer
Objekt:	Stützmauer Sihlwald, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 13.396-13.502
Baustoffe:	Naturstein, Mörtel
Probenmaterial:	4 Bohrkerne

Inhalt:

1. Auftragsbeschreibung



2. Ergebnisse und Kommentar



3. Zur Instandsetzung



4. Untersuchungsprotokolle



1. Auftragsbeschreibung



Allgemeines

Im nachfolgenden Bericht wird die Stützmauer Sihlwald (Linie Zürich - Sihlbrugg, km 13.396-13.502 in Sihlwald aus materialtechnischer Sicht beurteilt. Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der Messwerte (Druckfestigkeit, E-Modul und Mauergeometrie) für die statische Analyse, welche durch das Ingenieurbüro Gruner-Wepf AG berechnet wird, sowie eine kurze Beurteilung der Baustoffqualität. Die detaillierte visuelle Aufnahme wird durch das bearbeitende Ingenieurbüro gemacht.

Die Aussagen des Berichts stützen sich auf Beobachtungen vor Ort, auf Sondierungen mittels Kernbohrungen (4 Bohrkerne, Entnahme durch Firma Transbohr GmbH aus Gretzenbach) und auf labortechnische Untersuchungen an den entnommenen Bohrkernen. Die Bohrungen und die Aufnahmen erfolgten in Juni 2019.

Bestehende Dokumentation

Zur Stützmauer steht ein Bericht des Ingenieurbüros Flückiger und Bosshard AG aus dem Jahr 2018 zur Verfügung. Der Zustand wurde aufgrund der vielen schadhaften Fugen und Mauersteine, sowie aufgrund des verbreiteten Bewuchses, als schlecht (Klasse 4) eingestuft. Nichtsdestotrotz wurde die Tragsicherheit aufgrund der Mauerstärke (130 bis 145 cm), des guten Zustands der Baustoffe bei den Baggerschlitten im Mauerkronenbereich, sowie aufgrund des Abstands zwischen Stützmauer und Gleis als statisch unkritisch beurteilt.

2. Ergebnisse und Kommentar



Allgemeines

Für diese Stützmauer liegen keine Originalpläne vor. Es handelt sich um eine etwa 100 m lange Stützmauer mit einer Maximalhöhe von etwa 3.5 m und einem Anzug von ca. 1:10. Bei der Kurzaufnahme wurden die Mauersteine bis ca. 2.5 m Höhe abgeklopft.

Beobachtungen vor Ort

Konstruktion

Die Stützmauer besteht einheitlich aus feinkörnigen Kalksteinen. Die Mauersteine sind grob behauen, bossiert und zeigen unterschiedliche Formate. Die Fugen sind nur noch lokal vorhanden und weisen eine Stärke von 3 bis 5 cm auf. Die ursprünglichen Fugen bestehen aus einem hellgrauen Mörtel mit Fugenstrich. Lokal sind geflickte Fugen aus einem hellgrauen Mörtel ohne Fugenstrich vorhanden.

Zustand

Am Bauwerk sind keine Verformungen oder Setzungen festzustellen. Im Bereich zwischen Mast 25 und der Brücke, sowie beim Mast 23 ist die Mauerkrone leicht versetzt (Photo 1). Etwa 60 Mauersteine sind stark ausgewittert (dumpfer Klang bei der Abklopfprüfung) oder zeigen einen starken Bröckelzerfall. Des Weiteren kommen viele Bereiche mit leicht hohltönenden Mauersteinen vor, welche auf einen schlechten Verbund zwischen den Mauersteinen hindeuten.

Praktisch alle Fugen sind schadhaft oder stark ausgewittert (Photo 2).

Visueller Zustand der Bohrlöcher und der Bohrkerne



Die Positionen der Bohrungen (\varnothing 100 mm) sind auf Photos 3 und 4 dargestellt. Die Bohrkerne sind im Kapitel 4 aufgezeichnet. Die Bohrkerne wurden in unterschiedlichen Höhen entnommen, um die Mauergeometrie ermitteln zu können.

Konstruktion und Geometrie

Die Mauersteine an der Sichtfläche sind grob behauen und zeigen eine Stärke von 30 bis 40 cm. Die Fugenbreite ist somit unregelmässig und variiert zwischen 3 und 5 cm. Der Mauermantel kann somit als Bruchstein-Schichtenmauerwerk eingestuft werden.

Der Mauerkern besteht sowohl aus Kalksteinbruchstücken mit viel Mauermörtel, wie auch grossen Mauersteinen und wird als Bruchsteinmauerwerk eingestuft.

Die Mauerstärke links von der Brücke liegt bei 100 cm (Bohrkerne 1.3 und 1.4). Rechts der Brücke ist die Mauer höher und die Mauerstärke liegt zwischen 130 und 160 cm. Die Mauerstärke ist nicht von der Höhe abhängig.

Zustand

Im Allgemeinen zeigt der Mauermantel die grössten Schäden. Die gebohrten Mauersteine an der Sichtfläche bröckeln stark ab und der Mauermörtel ist entweder fehlend oder mürbe. Im Mauerkern (ab ca. 50 cm Tiefe) sind die Mauersteine und der Mauermörtel normalerweise intakt.

Laboruntersuchungen

Die Einzelresultate der Laboruntersuchungen sind im Kapitel 4 einsehbar. Nach Baustoffen gegliedert ergeben sich bezüglich Druckfestigkeit folgende Mittelwerte:

<i>Baustoff</i>	<i>Druckfestigkeit (N/mm²) Mittelwert \pm Standardabweichung</i>
Mauerstein	195.10 \pm 77.64
Mörtel	6.37 \pm 1.08

- Die Mauersteine zeigen eine hohe durchschnittliche Druckfestigkeit von 195.1 N/mm², ein durchschnittliches E-Modul von etwa 40.5 kN/mm², und eine Kapillarporosität von 1.8 Vol.%. Die grosse Streuung der Druckfestigkeiten liegt mit dem Bröckelzerfall an der Sichtfläche im Zusammenhang, d.h. die kleinsten Werte werden im Mauermantel beobachtet. Mikroskopisch betrachtet bestehen die Mauersteine aus mikritischem Kalk.
- Der ursprüngliche Mauermörtel besteht aus einer leicht mageren Mischung mit hydraulischem Kalk und Kalkhydrat als Bindemittel. Die durchschnittliche Druckfestigkeit beträgt 6.5 N/mm², ist jedoch lediglich für den intakten Mauerkern repräsentativ. Die Kapillarporosität ist eher hoch und liegt bei 27.3 Vol.%.

Einstufung der Mauerwerksfestigkeit (f_{yk}) gemäss SIA 266/2



Die Einstufung der Normaldruckfestigkeit des Naturstein-Mauerwerks gemäss Figur 5 der genannten Norm ist als orientierende Schätzung zu betrachten. Gewissheit kann nur durch experimentelle Bestimmung erlangt werden. Die Schätzung berücksichtigt den aktuellen Zustand des Mauerwerks.

Verbandsart	Bauteile	f_{yk} (N/mm ²)
Bruchstein-Schichtenmauerwerk	Mauermantel (0-35 cm Tiefe)	3
Bruchsteinmauerwerk	Mauerkern (ab 35 cm Tiefe)	6 bei intaktem Mörtel 3 bei mürbem Mörtel

Zusammenfassende Beurteilung

Die Ergebnisse der Zustandsuntersuchung stimmen mit den Angaben im Bericht des Ingenieurbüros Flückiger und Bosshard AG überein. Der Zustand des Natursteinbauwerks ist insgesamt, wegen den Schäden im Mauermantel (vorkommen von schadhaften Mauersteinen, Mauermörtel mürbe) als schlecht zu bezeichnen. Der Mauerkern ist in jedem Fall noch vorwiegend intakt. Der aktuelle, angeschlagene Zustand des Mantels kann somit noch akzeptiert werden, solange eine Instandsetzung innerhalb der nächsten 3 Jahre stattfindet.

3. Zur Instandsetzung



Das Ausmass und die genaue Lage der instand zu setzenden Schäden wird durch das bearbeitende Ingenieurbüro definiert.

Die Mauer wird als erstes gerodet und danach mit Hochdruckwasser gereinigt. Der Druck sollte so eingestellt werden, dass keine weiteren Schäden entstehen. Im Allgemeinen eignet sich ein Druck von etwa 80 bar.

Danach werden die hohltönenden Mauersteine bis ca. 10-15 cm Tiefe mit einem Spitzhammer ausgespitzt. Die entstandenen Hohlstellen werden dann mit Spritzmörtel (beispielsweise Fixit Spc 524) verfüllt. Nach dem Ansteifen wird der Mörtel mit der Kelle grob in Form gebracht und die Fugen werden ebenfalls eingekratzt. Nach dem weiteren Abbinden wird die Oberfläche steinmetzmässig überarbeitet und die aufgekratzten Fugen mit einem geeigneten Fugenmörtel verfüllt.

Die schadhaften Fugen werden bis in die Tiefe der doppelten Breite (bei Vorkommen von mürbem Mauermörtel bis max. 10 cm Tiefe) ausgeräumt und mit einem frostbeständigen Mörtel (Körnung 0-4 mm, frostbeständig, Enddruckfestigkeit ca. 10 N/mm²) gestopft.

Die losen Bereiche sollen mit Nadeln (Typ Ripinox, Länge 1.5 m, Ø min 16 mm) gesichert werden. Die Mauerkrone muss lokal ebenfalls neu gerichtet werden.

Materialtechnik am Bau AG

Dr. Fabio Donadini

4. Untersuchungsprotokolle

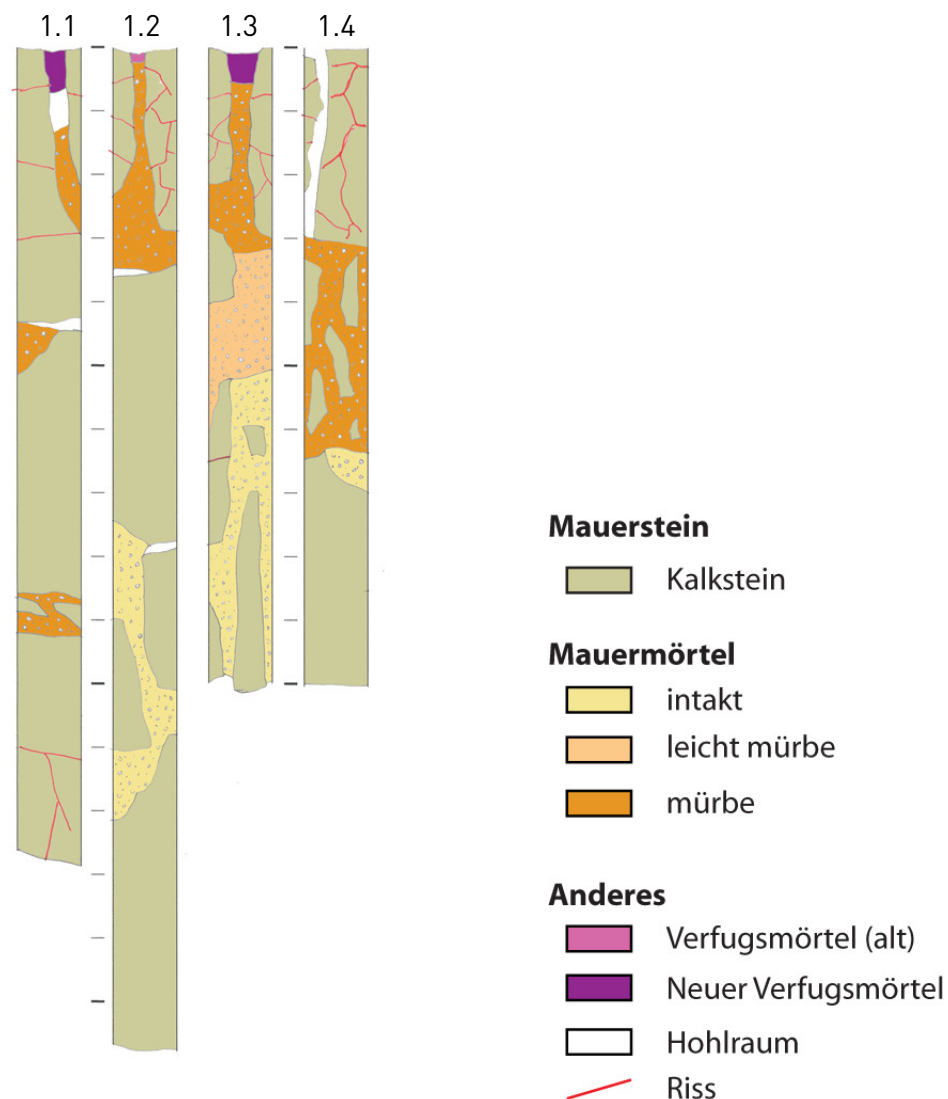
Bohrkernliste und Position der Bohrkerne



Nr.	Ø (mm)	Länge (cm)	Bauteil	Material
1.1	100	130	Stützmauer rechts der Brücke (ca. 50 cm ab Basis)	Naturstein, Mauermörtel
1.2	100	155	Stützmauer rechts der Brücke (ca. 200 cm ab Basis)	Naturstein, Mauermörtel
1.3	100	100	Stützmauer links der Brücke (ca. 50 cm ab Basis)	Naturstein, Mauermörtel
1.4	100	100	Stützmauer links der Brücke (ca. 120 cm ab Basis)	Naturstein, Mauermörtel

Aufzeichnung der Bohrkerne

1 Strich = 10 cm





Photographische Dokumentation

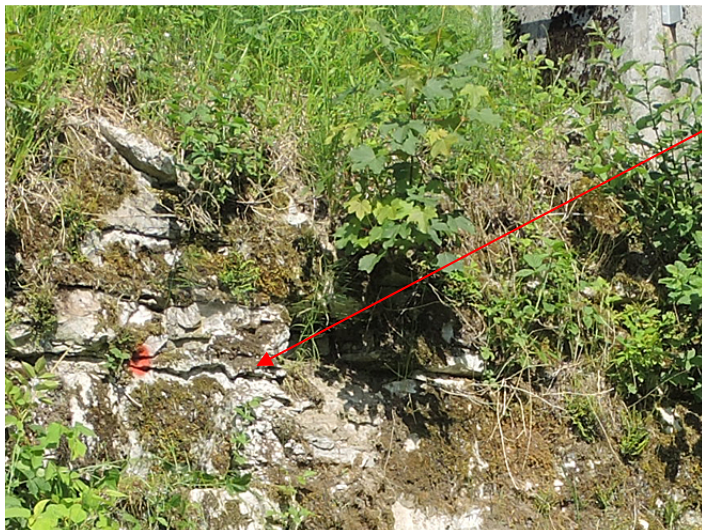


Photo 1

Mauerkronenversatz beim Mast 25



Photo 2

Fugen meist gerissen, oder offen und mit vielen Pflanzen bewachsen



Photo 3

Lage der Bohrkern 1.1 und 1.2

Photographische Dokumentation

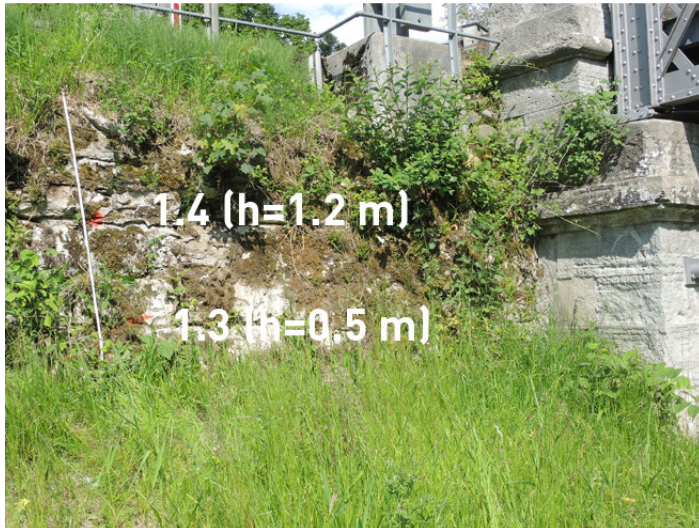


Photo 4

Lage der Bohrkern 1.3 und 1.4

K201 Druckfestigkeit Bohrkernproben

Prüfung Naturstein gemäss EN 1926

Probe	Entnahmetiefe cm	Druckfestigkeit N/mm ²	Rohdichte kg/m ³
Kalkstein			
1.1.1	40	130.03	2593
1.1.2	110	157.00	2678
1.2.1	40	111.47	2650
1.2.4	130	290.87	2632
1.4.1	5	286.13	2472
Mittelwert		195.10 ± 77.64	2605 ± 72
Mörtel			
1.2.2	100	7.47	
1.2.3	75	6.27	
1.2.5	110	4.91	
1.3.1	60	5.51	1840
1.3.2	70	7.69	1806
Mittelwert		6.37 ± 1.08	1823

Auftraggeber: SZU AG

Objekt: Stützmauer Sihlwald, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 13.396-13.502

Bericht-Nr.:19097/1 | 11.07.2019



K207 / K208 E-Modul statisch / dynamisch

Prüfung Naturstein gemäss EN 141580 / EN 14146



Probe	Entnahmetiefe cm	E-Modul (statisch) kN/mm ²	E-Modul (dynamisch) kN/mm ²
Kalkstein			
1.1.1	70	35.9	45.4
1.2.1	50	-	23.2
1.4.1	90	45.7	52.9
Mittelwert		40.8	40.5

P301 Poren-Sättigungskennwerte

Prüfkondition: A5/AV

Probe	Kapillarporosität [Vol.%]	Gesamtporosität [Vol.%]	Hohlraumgehalt [Vol.%]	Trockenrohdichte [kg/m ³]	S-Wert [-]
Kalkstein					
1.4.1	1.85	1.87	0.02	2680	0.99
Mörtel					
1.2.1	29.80	30.00	0.20	1849	0.99
1.3.1	25.58	26.97	1.39	1938	0.95
1.4.2	24.77	24.84	0.07	1995	1.00
Mittelwert	26.72	27.27	0.55	1927	0.98

M102 Mikroskopische Beobachtungen



Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material und Beobach- tungstiefe	Beobachtungen
1.3 / 1	Mauerstein, Mauermörtel 85 cm	<u>Mauermörtel:</u> Bindemittel: Hydraulischer Kalk mit Kalkhydrat Zuschlag: karbonatisch, silikatisch, kantig bis gerundet, 0.2- 12 mm Mischung: leicht mager Gefüge: kompakt Kapillarporosität: hoch Makroporen: etliche Luftporen mit Ø bis 2 mm Gefügeschäden: vereinzelte Mikrorisse <u>Mauerstein</u> Gesteinsart: Kalkstein Zusammensetzung: rein karbonatisch Kornform / Korngrösse: matrix mikritisch, Fossilien bis 0.2 mm Gefüge: kompakt Kapillarporosität: sehr niedrig Makroporen: keine Gefügeschäden: keine



Bericht

Nr.:19097/2

Auftraggeber: Sihltal Zürich Uetliberg Bahn AG | Wolframplatz 21 | 8045 Zürich

Auftrag: Materialtechnische Untersuchung der Stützmauer

Objekt: Stützmauer Carbura, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 16.095-16.385

Baustoffe: Naturstein, Mörtel

Probenmaterial: 4 Bohrkerne

Inhalt:

1. Auftragsbeschreibung



2. Ergebnisse und Kommentar



3. Zur Instandsetzung



4. Untersuchungsprotokolle



1. Auftragsbeschreibung



Allgemeines

Im nachfolgenden Bericht wird die Stützmauer Carbura (Linie Zürich - Sihlbrugg, km 16.095-16.385) in Sihlbrugg aus materialtechnischer Sicht beurteilt. Im Zentrum steht Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls der Baustoffe, deren Zustand, sowie die Bestimmung der Mauergeometrie. Diese Angaben werden für die statische Analyse (Berechnung durch das Ingenieurbüro Gruner-Wepf AG) benötigt. Die detaillierte visuelle Aufnahme der Schäden an der Sichtfläche erfolgt durch das bearbeitende Ingenieurbüro.

Die Aussagen des Berichts stützen sich auf Beobachtungen vor Ort, auf Sondierungen mittels Kernbohrungen (4 Bohrkerne, Entnahme durch Firma Transbohr GmbH aus Gretzenbach) und auf labortechnische Untersuchungen an den entnommenen Bohrkernen. Die Bohrungen und die Aufnahmen erfolgten im Juni 2019.

Bestehende Dokumentation

Zur Stützmauer liegt ein Bericht des Ingenieurbüros Flückiger und Bossahrd (2018) vor. Die Untersuchung zeigte einen beschädigten bis lokal schlechten Zustand (Klasse 3 und 4). Die Stärke beträgt 1 bis 2 m am Fuss bzw. 0.55 bis 1.65 m im Mauerkronenbereich.

2. Ergebnisse und Kommentar



Allgemeines

Bei dieser Stützmauer liegen keine Originalpläne vor. Es handelt sich um eine etwa 300 m lange Stützmauer mit einer Maximalhöhe von etwa 4 m und einem Anzug von ca. 1:10.

Bei der Kurzaufnahme wurden die Mauersteine bis ca. 2.5 m Höhe abgeklopft.

Beobachtungen vor Ort

Konstruktion

Als Mauersteine wurden mikritische Kalksteine verwendet. Es handelt sich um grob gerichtete, bossierte Mauersteine mit einem mittleren Format von ca. 50 x 30 cm. Die Fugen sind somit unregelmässig und zeigen eine variierende Stärke zwischen 3 und 8 cm. Sie bestehen aus einem grauen Mörtel und sind glatt gestrichen. Es handelt sich um erneuerte Fugen (Laut Stempel fand die Ausführung 1991 statt).

Zustand

Am Bauwerk sind lokal zwei leichte Verformungen festzustellen (rechts des Bachdurchlasses sowie beim Mast 99). Beim Bachdurchlass ist des Weiteren an der Stirnwand ein Eckriss entstanden, welcher zu lokalen Ausbrüchen führen könnte (Photo 1). Etliche Mauersteine (insgesamt ca. 150 Stk.) sind stark ausgewittert (dumpfer Klang bei der Abklopfprüfung) oder zeigen starken Bröckelzerfall. Des Weiteren kommen viele Bereiche mit leicht hohltönenden Mauersteinen vor, welche auf einen schlechten Verbund zwischen den Mauersteinen hindeuten.

Die erneuerten Fugen sind im Allgemeinen intakt.

Visueller Zustand der Bohrlöcher und der Bohrkerne



Die Positionen der Bohrungen (\varnothing 100 mm) sowie die Zeichnungen der Bohrkerne sind im Kapitel 4 angegeben. Die Bohrkerne wurden in unterschiedlichen Höhen entnommen, um die Mauergeometrie ermitteln zu können.

Konstruktion und Geometrie des Bauwerks

Die Mauersteine an der Sichtfläche sind grob behauen und zeigen eine Stärke zwischen 30 und 40 cm. Die Fugenbreite liegt in der Regel zwischen 3 und 6 cm. Der Mauermantel kann somit als leicht schichtiges Bruchsteinmauerwerk eingestuft werden.

Der Mauerkern besteht aus Bruchstücken unterschiedlichen Formates mit viel Mauermörtel und grossen Mauersteinen. Er wird ebenfalls als Bruchsteinmauerwerk eingestuft.

Die Mauerstärke ist etwas breiter an der Mauerbasis (180 cm) als in der Mitte und an der Oberkante (130 bis 150 cm).

Zustand

Die Mauersteine im Mantelbereich (0 bis 40 cm Tiefe) zeigen aufgrund des Bröckelzerfalles etliche Risse. Diejenigen im Mauerkern dagegen sind im Allgemeinen intakt. Hinter den erneuerten Fugen kommen Hohlstellen und mürber Mörtel (bis max. 50 cm Tiefe) vor. Ab 50 cm Tiefe ist der Mauermörtel leicht mürbe.

Laboruntersuchungen

Die Einzelresultate der Laboruntersuchungen sind im Kapitel 4 einsehbar. Nach Baustoffen gegliedert ergeben sich bezüglich Druckfestigkeit folgende Mittelwerte:

<i>Baustoff</i>	<i>Druckfestigkeit (N/mm²) Mittelwert \pm Standardabweichung</i>
Mauerstein	236.2
Mörtel	3.14 \pm 2.38

- Die Mauersteine zeigen eine hohe durchschnittliche Druckfestigkeit von 236.2 N/mm², ein E-Modul von 47.4 kN/mm² (statisch) bzw. 56.9 kN/mm² (dynamisch), und eine Kapillarporosität von 3.6 Vol.%. Mikroskopisch betrachtet bestehen die Mauersteine aus mikritischem Kalk. Als Schäden kommen lokal Mikrorisse (Breite < 0.1 mm) vor.
- Der ursprüngliche Mauermörtel besteht aus einer leicht mageren Mischung mit Kalkhydrat und Luftkalk als Bindemittel. Die durchschnittliche Druckfestigkeit beträgt 3.1 N/mm² und zeigt eine grosse Standardabweichung von 2.4 N/mm². Die Werte sind als optimistisch zu betrachten, weil ausschliesslich leicht mürber Mörtel gemessen werden konnte. Die Kapillarporosität ist normal und liegt bei 22.8 Vol.%. Als Schaden kommt eine ausgeprägte Auslaugung vor.

Einstufung der Mauerwerksfestigkeit (f_{yk}) gemäss SIA 266/2



Die Einstufung der Normdruckfestigkeit des Naturstein-Mauerwerks gemäss Figur 5 der genannten Norm ist als orientierende Schätzung zu betrachten. Gewissheit kann nur durch experimentelle Bestimmung erlangt werden. Die Schätzung berücksichtigt den aktuellen Zustand des Mauerwerks.

Verbandsart	Bauteile	f_{yk} (N/mm ²)
Bruchsteinmauerwerk (leicht schichtig)	Mauermantel (0-35 cm Tiefe)	4 (Bei den verformten Bereichen 2)
Bruchsteinmauerwerk	Mauerkern (ab 35 cm Tiefe)	3

Zusammenfassende Beurteilung

Der Zustand des Natursteinbauwerks ist insgesamt als schlecht zu bezeichnen. Grund dafür sind die verbreiteten Schäden an der Sichtfläche (Leichte Verformungen und Eckrisse, sowie Vorkommen von Hohlstellen hinter den geflickten Fugen, von mürbem Mörtel, und von vielen bröckelnden Mauersteinen). Der Zustand des Mauerkerns ist etwas besser als derjenige des Mauermantels, weil die Mauersteine im Allgemeinen noch intakt sind. Der Mauermörtel ist jedoch leicht ausgewittert.

Die Beurteilung des Ingenieurbüros Flückiger und Bosshard wird somit nur zum Teil bestätigt.

Grund für die Schäden an den Fugen ist die kontinuierliche Durchfeuchtung. Die Erneuerung der Fugen ohne Erstellung von Entlastungsöffnungen hat in diesem Fall sehr wahrscheinlich zu einer grösseren Staunässe geführt.



3. Zur Instandsetzung

Das Ausmass und die genaue Lage der instand zu setzenden Schäden werden durch anhand der detaillierten Aufnahme des bearbeitenden Ingenieurbüros bestimmt.

Die schadhaften Steine sollen bis ca. 15 cm Tiefe abgespitzt werden und mit Spritzmörtel (beispielsweise Fixit Spc 524) instandgesetzt werden. Nach dem Ansteifen wird der Mörtel mit der Kelle grob in Form gebracht und die Fugen werden ebenfalls eingekratzt. Nach dem weiteren Abbinden wird die Oberfläche steinmetzmässig überarbeitet und die aufgekratzten Fugen mit einem geeigneten Fugenmörtel verfüllt.

Die Fugen sind im Allgemeinen in einem guten Zustand. Eine Instandsetzung der Fugen ist somit nur an den Stellen nötig, bei welchen die Mauersteine abgespitzt werden müssen.

Es würde sich lohnen, eine systematische Vernadelung der losen und der verformten Bereiche mit Chromstahl-Stangen (Typ Ripinox, Länge ca. 200 cm, \varnothing_{\min} 16 mm) auszuführen. Somit soll der Verbund zwischen Mauermantel und Mauerkerne wiederhergestellt werden. Ansonsten müssten die losen Bereiche detailliert kartiert und mit weiteren Bohrkernen untersucht werden. Der Eckriss bei der Stirnwand des Durchlasses soll ebenfalls mit Nadeln gesichert werden.

Des Weiteren sollen an der Mauerbasis alle 2 m Entlastungsöffnungen gebohrt werden, um die stauende Nässe minimieren zu können.

Materialtechnik am Bau AG

Dr. Fabio Donadini

4. Untersuchungsprotokolle

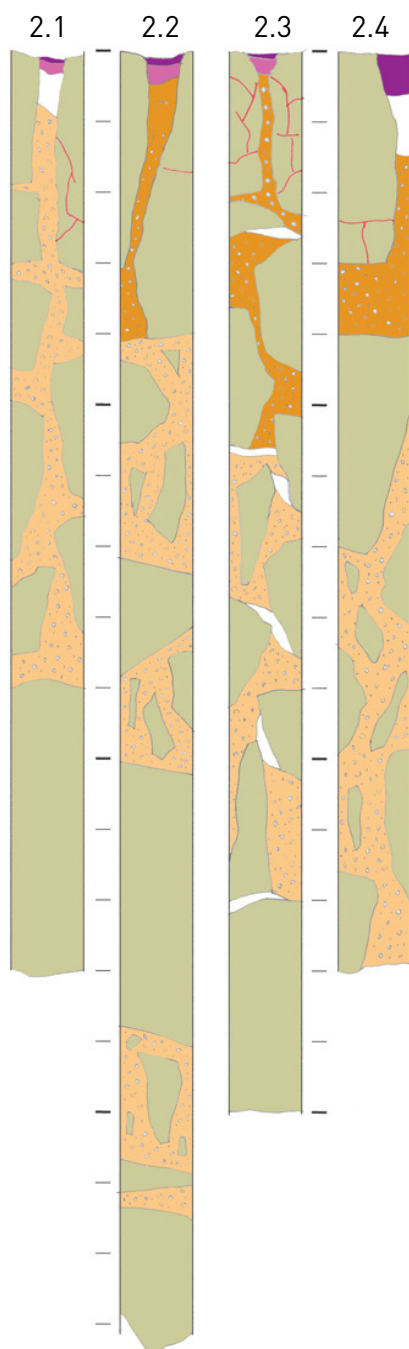
Bohrkernliste und Position der Bohrkerne



Nr.	Ø (mm)	Länge (cm)	Lage	Material
2.1	100	130	130 cm ab Mauerbasis, ~ 15 m Rechts von Mast 104	Naturstein, Mauermörtel
2.2	100	180	50 cm ab Mauerbasis, ~ 20 m Links von Mast 102	Naturstein, Mauermörtel
2.3	100	250	250 cm ab Mauerbasis, ~ 10 m Rechts von Mast 100, im verformten Bereich	Naturstein, Mauermörtel
2.4	100	170	170 cm ab Mauerbasis, ~ 10 m Links von Mast 97	Naturstein, Mauermörtel

Aufzeichnung der Bohrkerne

1 Strich = 10 cm



Mauerstein

 Kalkstein

Mauermörtel

 intakt

 leicht mürbe

 mürbe

Anderes

 Verfumsmörtel (alt)

 Neuer Verfumsmörtel

 Hohlraum

 Riss

Photographische Dokumentation



Photo 1

Eckriss bei der Stirnwand des Bachdurchlasses

K201 Druckfestigkeit Bohrkernproben

Prüfung Naturstein gemäss EN 1926

Probe	Entnahmetiefe cm	Druckfestigkeit N/mm ²	Rohdichte kg/m ³
Kalkstein			
2.1.1	130	231.54	2645
2.2.1	30	250.41	2654
2.4.1	47	226.66	2659
Mittelwert		236.20	2653
Mörtel			
2.1.2	90	1.29	
2.2.2	70	1.54	
2.2.3	70	1.53	
2.2.4	90	0.58	
2.2.5	150	1.57	
2.3.1	80	7.22	
2.3.2	110	5.02	
2.4.2	87	6.76	1732
2.4.3	120	2.72	
Mittelwert		3.14 ± 2.38	

Auftraggeber: SZU AG

Objekt: SM Carbura, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 16.095-16.385

Bericht-Nr.:19097/2 | 11.07.2019

K207 / K208 E-Modul statisch / dynamisch

Prüfung Naturstein gemäss EN 141580 / EN 14146



Probe	Entnahmetiefe cm	E-Modul (statisch) kN/mm ²	E-Modul (dynamisch) kN/mm ²
Kalkstein, Stützmauer Carbura			
2.1.1	110	52.7	54.9
2.2.1	100		65.1
2.3.1	140	42.2	50.5
Mittelwert		47.4	56.9

P301 Poren-Sättigungskennwerte

Prüfkondition: A5/AV

Probe	Kapillarporosität [Vol.%]	Gesamtporosität [Vol.%]	Hohlraumgehalt [Vol.%]	Trockenrohdichte [kg/m ³]	S-Wert [-]
Kalkstein					
2.2.1	3.61	3.77	0.16	2598	0.96
Mörtel					
2.3.1	23.02	23.87	0.85	2070	0.96
2.4.1	22.56	23.87	1.31	2047	0.94
Mittelwert	22.79	23.87	1.08	2059	0.95

M102 Mikroskopische Beobachtungen



Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material und Beobach- tungstiefe	Beobachtungen
2.2 / 1	Mauerstein, Mauermörtel 100 cm	<p><u>Mauermörtel:</u> Bindemittel: Hydraulischer Kalk mit Kalkhydrat Zuschlag: karbonatisch, silikatisch, kantig bis gerundet, 0.2- 12 mm Mischung: leicht mager Gefüge: kompakt Kapillarporosität: hoch Makroporen: etliche Poren mit Ø bis 2 mm Gefügeschäden: vereinzelte Mikrorisse, lokal leichte Auslaugung</p> <p><u>Mauerstein</u> Gesteinsart: Kalkstein Zusammensetzung: rein karbonatisch Kornform / Korngrösse: matrix mikritisch, Fossilien bis 0.2 mm Gefüge: kompakt Kapillarporosität: sehr niedrig Makroporen: keine Gefügeschäden: keine</p>
2.3 / 1	Mauerstein, Mauermörtel 110 cm	<p><u>Mauermörtel:</u> Bindemittel: Hydraulischer Kalk mit Kalkhydrat Zuschlag: karbonatisch, silikatisch, kantig bis gerundet, 0.2- 12 mm Mischung: leicht mager Gefüge: etwa locker infolge Auslaugung Kapillarporosität: hoch Makroporen: etliche Luftporen, Grösse bis ca. 5 mm Gefügeschäden: vereinzelte Mikrorisse, Auslaugung</p> <p><u>Mauerstein</u> Gesteinsart: Kalkstein Zusammensetzung: rein karbonatisch Kornform / Korngrösse: matrix mikritisch, Fossilien bis 0.2 mm Gefüge: kompakt Kapillarporosität: sehr niedrig Makroporen: keine Gefügeschäden: einzelner Mikroriss (Breite < 0.1 mm)</p>



Bericht

Nr.:19097/3

Auftraggeber:	Sihltal Zürich Uetliberg Bahn AG Wolframplatz 21 8045 Zürich
Auftrag:	Materialtechnische Untersuchung der Stützmauer
Objekt:	Bachdurchlass Unter Hebisenbach, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 15.848
Baustoffe:	Naturstein, Mörtel
Probenmaterial:	2 Bohrkerne

Inhalt:

1. Auftragsbeschreibung



2. Ergebnisse und Kommentar



3. Zur Instandsetzung



4. Untersuchungsprotokolle



1. Auftragsbeschreibung



Im nachfolgenden Bericht wird der Bachdurchlass Unter Hebisenbach (Linie Zürich - Sihlbrugg, km 15.848) in Sihlbrugg aus materialtechnischer Sicht beurteilt. Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der Geometrie des Mauerwerks und der Mauerwerksfestigkeit des Gewölbes, welche für die statische Analyse (Ingenieurbüro Gruner-Wepf AG) benötigt werden. Die detaillierte visuelle Aufnahme wird durch das bearbeitende Ingenieurbüro gemacht. In diesem Bericht wird lediglich der Zustand der angebohrten Baustoffe detailliert beschrieben.

Die Aussagen des Berichts stützen sich auf Beobachtungen vor Ort, auf Sondierungen mittels Kernbohrungen (2 Bohrkerne, Entnahme durch Firma Transbohr GmbH aus Gretzenbach) und auf labortechnische Untersuchungen an den entnommenen Bohrkernen. Die Bohrungen und die Aufnahmen erfolgten im Mai 2019.

2. Ergebnisse und Kommentar



Allgemeines

Der Bachdurchlass wurde wahrscheinlich zur Zeit des Streckenbaus errichtet. Es handelt sich um einen etwa 17 m langen Durchlass mit einer Höhe von etwa 2 m und eine Breite von ca. 1.5 m. Die Bachsohle ist gemauert und weist einen v-Schnitt mit einer Maximaltiefe von 55 cm auf. Es sind keine Originalpläne mehr vorhanden. Es wurde lediglich das Mauerwerk unterhalb der Schienen aufgenommen (d.h. bis zum Gefällewechsel der Bachsohle).

Beobachtungen vor Ort (Plan 1)

Konstruktion

Als Mauersteine wurden mikritische Kalksteine verwendet. Bei der Stirnwand handelt es sich um grob gerichtete, bossierte Mauersteine mit kleinem bis mittlerem Format. Die Fugen wurden total erneuert mit einem hellen Zementmörtel ohne Fugenstrich. Sie sind unregelmässig und zeigen eine variierende Stärke zwischen 3 und 10 cm.

Im Widerlager und Gewölbebereich sind die Mauersteine eher genau behauen und zeigen ein regelmässiges Format von ca. 50 x 30 cm. Die Fugen weisen somit eine regelmässige Stärke von ca. 3 cm auf.

Zustand

Es sind weder Verformungen noch Setzungen festzustellen. Die meisten Schäden kommen an der Stirnwand vor (Plan 1). Hier sind 9 Mauersteine ausgewittert (dumpfer Klang bei der Abklopfprüfung) und im Bereich links des Baches ist der Verbund zwischen den Mauersteinen schlecht. Die erneuten Fugen sind im Allgemeinen dicht und intakt.

Im Widerlager und im Gewölbe kommen wenige Schäden in Form von Rissen und hohlklingenden Steinen am Kontakt mit der Stirnwand vor (max. Rissbreite ca. 2 mm). Eine weitere, stark ausgewitterte Fuge tritt etwa 4.5 m ab Eingang auf Seite Zürich auf.

Visueller Zustand der Bohrlöcher und der Bohrkerne



Die Positionen der Bohrungen (\varnothing 100 mm) sowie die Bohrkerne sind im Kapitel 4 dargestellt. Die Bohrkerne wurden in unterschiedlichen Höhen entnommen, um die Mauergeometrie ermitteln zu können.

Konstruktion und Geometrie des Bauwerks

Die Mauersteine an der Sichtfläche sind behauen und zeigen eine Stärke von etwa 30 cm im Widerlager und etwa 50 cm im Gewölbe. Die Fugenbreite liegt in der Regel bei 3- 4 cm. Der Mauermantel kann somit als Bruchstein-Schichtenmauerwerk eingestuft werden.

Der Mauerkerne existiert lediglich im Widerlagerbereich und besteht aus Bruchstücken unterschiedlichen Formates mit viel Mauermörtel. Er wird somit als Bruchsteinmauerwerk eingestuft.

Das Widerlager weist eine Stärke von 80 cm auf, das Gewölbe eine Stärke von etwa 60 cm.

Zustand

Die angebohrten Mauersteine sind intakt. Der Mauermörtel der Bohrung im Gewölbe ist intakt, derjenige der Bohrung im Widerlager mürbe.

Laboruntersuchungen

Die Einzelresultate der Laboruntersuchungen sind im Kapitel 4 einsehbar. Nach Baustoffen gegliedert ergeben sich bezüglich Druckfestigkeit folgende Mittelwerte:

<i>Baustoff</i>	<i>Druckfestigkeit (N/mm²) Mittelwert \pm Standardabweichung</i>
Mauerstein	210.6
Mörtel	5.7

- Die Mauersteine zeigen eine hohe durchschnittliche Druckfestigkeit von 210.6 N/mm² und eine Kapillarporosität von 3.0 Vol.%. Das E-Modul liegt bei ca. 41.5 kN/mm². Mikroskopisch betrachtet bestehen die Mauersteine aus mikritischem Kalk und sind intakt.
- Der ursprüngliche Mauermörtel besteht aus einer mageren Mischung mit Luftkalk und Schlacken als Bindemittel. Die durchschnittliche Druckfestigkeit beträgt 5.7 N/mm². Die Kapillarporosität ist sehr variabel und liegt im Durchschnitt bei 29.5 Vol.%. Als Schaden kommt eine verbreitete Auslaugung (Widerlagermörtel) vor.

Einstufung der Mauerwerksfestigkeit (f_{yk}) gemäss SIA 266/2



Die Einstufung der Normdruckfestigkeit des Naturstein-Mauerwerks gemäss Figur 5 der genannten Norm ist als orientierende Schätzung zu betrachten. Gewissheit kann nur durch experimentelle Bestimmung erlangt werden. Die Schätzung berücksichtigt den aktuellen Zustand des Mauerwerks.

Verbandsart	Bauteile	f_{yk} (N/mm ²)
Bruchstein-Schichtenmauerwerk	Mauermantel (Widerlager: 0-30 cm Tiefe; Gewölbe: 0-50 cm Tiefe)	8
Bruchsteinmauerwerk	Mauerkern (ab 30 bzw. 50 cm Tiefe)	5

Zusammenfassende Beurteilung

Der Zustand des Natursteinbauwerks ist insgesamt als akzeptabel (Klasse 2) zu bezeichnen. Grund dafür sind die Schäden an der Sichtfläche der Stirnwand und das Vorkommen von mürbem Mauermörtel im Widerlager. Risse zwischen Gewölbe und Stirnwand kommen bei Natursteinbrücken häufig vor und sind in der Regel auf thermisch und hygrisch ausgelöste Spannungen zurückzuführen. Diese Risse stellen dann ein grösseres Problem dar, wenn die Stirnwände immer weiter auseinandergehen, was im vorliegenden Fall nicht passiert ist.

Ursache für die beobachteten Schäden ist die kontinuierliche Durchfeuchtung von oben, welche durch eine fehlende oder defekte Abdichtung bedingt wird. Die Erneuerung der Abdichtung z.B. in Zusammenhang mit dem Einbau eines dichten Betontrogs ist somit stark zu empfehlen. Mit der Verhinderung der Durchfeuchtung werden die festgestellten Schäden zum Stillstand gebracht und so kann das Bauwerk noch für eine lange Zeit (> 50 Jahre) weiterverwendet werden.

3. Zur Instandsetzung



Im Vordergrund steht die Instandsetzung der schadhaften Mauersteine (ca. 9 Stk. an der Stirnwand und 9 Stk. entlang des Risses). Diese sollen bis ca. 15 cm Tiefe abgespitzt werden und mit Spritzmörtel (z.B. mit Fixit 524 spc) instandgesetzt werden. Die ausgewitterten Fugen sollen ebenfalls fachgerecht instandgesetzt werden (z.B. mit Fixit 562, Natursteinmörtel mit Trass, 0-3 mm).

Des Weiteren soll der lose Bereich mit Chromstahl-Stangen (Typ Ripinox, Länge zu definieren, \varnothing_{\min} 16 mm, Raster ca. 1.5 x 1.5 m) gesichert werden. Der Verbund zwischen Stirnwandquader und Gewölbe kann ebenfalls mit Chromstahl-Stangen (Typ Ripinox, Länge ca. 150 cm, \varnothing_{\min} 16 mm, 1 Stange alle 4 Stirnwandquader) wiederhergestellt werden.

Soll keine Abdichtung eingebaut werden, dann sollen an der Widerlagerbasis alle 2 m Entlastungsöffnungen gebohrt werden, um die stauende Nässe minimieren zu können.

Materialtechnik am Bau AG

Dr. Fabio Donadini



4. Untersuchungsprotokolle

Plan 1 (Aufnahme der Stirnwand)

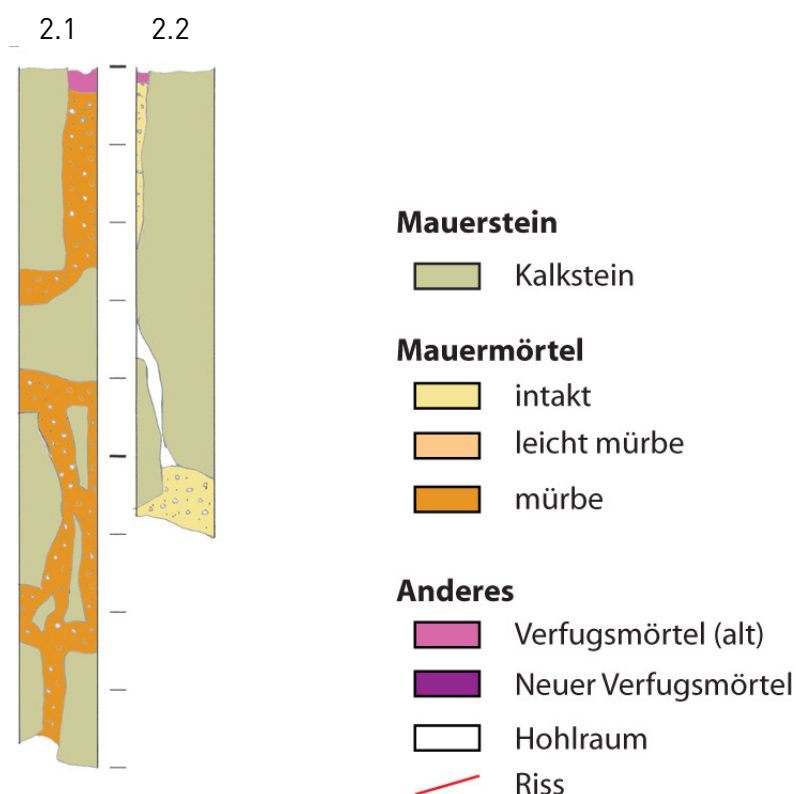


Bohrkernliste und Position der Bohrkerne

Nr.	Ø (mm)	Länge (cm)	Bauteil	Material
3.1	100	80	Widerlager	Naturstein, Mauermörtel
3.2	100	60	Gewölbe	Naturstein, Mauermörtel

Aufzeichnung der Bohrkerne

1 Strich = 10 cm



Photographische Dokumentation

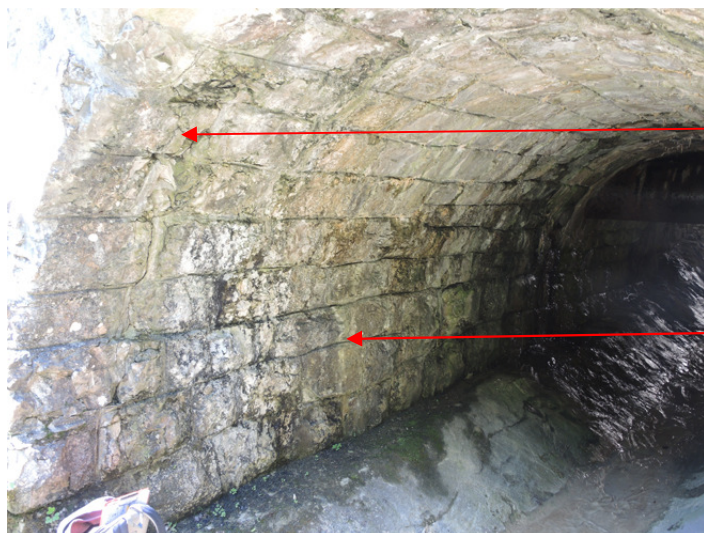


Photo 1

Riss am Kontakt mit der Stirnwand. Entlang des Risses sind die Mauersteine lokal hohl.

Lage von Bohrkern 3.1



Photo 2

Lage von Bohrkern 3.2

Lage der stark ausgewitterten Fuge

Auftraggeber: SZU AG

Objekt: BDu Unter Hebisenbach, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 15.848

Bericht-Nr.:19097/3 | 11.07.2019



K201 Druckfestigkeit Bohrkernproben

Prüfung Naturstein gemäss EN 1926



Probe	Entnahmetiefe cm	Druckfestigkeit N/mm ²	Rohdichte kg/m ³
Kalkstein			
3.1.3	16	201.79	2618
3.1.4	35	279.86	2629
3.2.1	30	150.07	2610
Mittelwert		210.57	2619
Mörtel			
3.1.1	50	7.09	
3.1.2	13	4.23	
3.2.2	60	5.67	
Mittelwert		5.66	

K207 / K208 E-Modul statisch / dynamisch

Prüfung Naturstein gemäss EN 141580 / EN 14146

Probe	Entnahmetiefe cm	E-Modul (statisch) kN/mm ²	E-Modul (dynamisch) kN/mm ²
Kalkstein, Bachdurchlass			
3.1.1	35		63.3
3.1.2	60		16.4
3.2.1	16	41.1	44.8
Mittelwert			41.5

P301 Poren-Sättigungskennwerte

Prüfkondition: A5/AV

Probe	Kapillarporosität [Vol. %]	Gesamtporosität [Vol. %]	Hohlraumgehalt [Vol. %]	Trockenrohichte [kg/m ³]	S-Wert [-]
Kalkstein					
3.1.2	1.41	1.45	0.04	2674	0.98
3.2.1	4.55	4.67	0.12	2583	0.97
Mittelwert	2.98	3.06	0.08	2628	0.97
Mörtel					
3.1.1	41.08	41.28	0.20	1735	1.00
3.1.2	17.89	18.55	0.65	1933	0.96
Mittelwert	29.49	29.91	0.42	1834	0.98

Auftraggeber: SZU AG

Objekt: BDu Unter Hebisenbach, Linie Zürich - Sihlbrugg, km 15.848

Bericht-Nr.:19097/3 | 11.07.2019

M102 Mikroskopische Beobachtungen



Bohrkern Nr. / Probe Nr.	Material und Beobach- tungstiefe	Beobachtungen
3.1 / 1	Mauerstein, Mauermörtel 5 cm	<u>Mauermörtel:</u> Bindemittel: Kalkhydrat mit schlackenzementartigem Bindemittel Zuschlag: karbonatisch, silikatisch, kantig bis gerundet, 0.2- 12 mm Mischung: leicht mager Gefüge: leicht aufgelockert infolge Auslaugung Kapillarporosität: hoch Makroporen: etliche Poren (Länge bis 10 mm) Gefügeschäden: Auslaugung <u>Mauerstein</u> Gesteinsart: Kalkstein Zusammensetzung: rein karbonatisch Kornform / Korngrösse: matrix mikritisch, Fossilien bis 0.2 mm Gefüge: kompakt Kapillarporosität: sehr niedrig Makroporen: keine Gefügeschäden: keine