

**Heere, Roland** Metro Testing & Engineering Ltd., Burnaby, BC, Canada

**Hundal, Inderbir** BC Hydro, Burnaby, BC, Canada

**Wiebe, Darren** Norpac Construction Inc., Kamloops, BC, Canada

## Hangstabilisierung mit **Stahlfasertrockenspritzbeton**

### **Wasserkraft im Westen Kanadas**

Die kanadische Provinz British Columbia ( BC) grenzt an den Pazifik. Ein beträchtlicher Anteil der ca. 900.000 km<sup>2</sup> großen Provinz umfasst Gebirge und Hochland. Damit ist sie für die Gewinnung von Wasserkraft prädestiniert. Der mit Abstand größte Elektrizitätsversorger der Provinz ist die 1961 gegründete BC Hydro. Das staatliche Unternehmen betreibt gegenwärtig 33 Wasserkraftwerke, und versorgt etwa 4 Millionen Abnehmer.

Ungefähr 95 % von BC Hydro's gegenwärtig installierter Leistung von 11 Gigawatt entfallen auf Wasserkraftwerke. Diese Kapazität erhöht sich 2025 um ein weiteres Gigawatt, wenn das 2024 fertiggestellte Kraftwerk „Site C“ nahe Fort St. John erstmals mit voller Leistung laufen wird. Die restlichen 5 % Kapazität werden durch Wind-, Erdgas-, und lokale Dieselmotorkraftwerke erzeugt, über die BC Hydro neben den Wasserkraftwerken verfügt.

Die Mehrzahl der Kraftwerke befindet sich in abgelegenen Gegenden, die weit von den großen Verbraucherzentren Vancouver und Victoria entfernt sind. Insgesamt 18.300 km Überland-Hochspannungsleitungen für 69 bis 500 kV Wechselstrom verbinden Kraftwerke mit den Verbraucherzentren. Dazu gesellten sich Exoten, wie beispielsweise die inzwischen stillgelegte Unterwasserleitung für 280 kV Gleichspannung und eine Unterwasserleitung für 525 kV Wechselspannung zwischen dem Festland mit der im Pazifik liegenden Insel Vancouver Island.

Die Mehrzahl der Großkraftwerke sind Speicherkraftwerke mit Stauseen von teils

enormer Pufferkapazität. Der flächenmäßig größte Stausee ist Williston Lake, mit einer Wasseroberfläche von ungefähr 1.760 km<sup>2</sup> ( zum Vergleich: Bodensee – 536 km<sup>2</sup>). BC Hydro's höchstes Stauwerk ist der 240 m hohe Mica-Damm. Das Kraftwerk mit der größten installierten Leistung ist Gordon M. Shrum am W.A.C. Bennett-Damm, mit einer Kapazität von 2.900 Megawatt.

Die Gebirge, in denen sich viele der Kraftwerke befinden, sind entweder tektonisch aktiv, oder entspannen sich noch von der Auflast der Gletscher aus der letzten Eiszeit. Demzufolge sind Stau- und Kraftwerke vielen geologischen Herausforderungen ausgesetzt. Konstruktion, Bauausführung, Betrieb und Instandhaltung müssen sich erheblich stärker als anderswo auf instabile Baugründe und Hänge einstellen.

### **BC Hydro und Spritzbeton**

BC Hydro hat bereits kurz nach seiner Gründung auf Spritzbeton zurückgegriffen, um Hänge und Bauwerke zu stabilisieren oder zu reparieren. Quellen verweisen auf BC Hydro's Spritzbetonpionier, Johann Eilau, der zumindest seit 1965 Spritzbeton für Hangsicherungen und Reparaturen an Betonbauwerken verwendet hat. Ursprünglich beschränkte sich BC Hydro auf den Einsatz von einfachen Trockenspritzbetonen. Diese wurden im Laufe der Zeit durch Verwenden von Stahlfasern und Microsilika verbessert. Spätestens in den 1980'er Jahren setzte BC Hydro auch Nassspritzbeton ein, wenn lokale Mischwerke zur Verfügung standen, die diesen in geeigneter Qualität und Quantität herstellen und rechtzeitig und in akzeptabler Qualität anliefern konnten.

Die ursprünglichen Trockenspritzbetone erreichten 28-Tage-Druckfestigkeiten von ungefähr 30 bis 40 MPa. Modernere Nassspritzbetone hingegen erreichen im Alter von 28 Tagen mindestens 40 MPa, und häufig auch bis zu 60 MPa. Archivierte Dokumente verweisen auf eine Trockenspritzmischung aus den 1980'er Jahren, welche neben der Körnung aus 416 kg/ m<sup>3</sup> Zement, 50 kg/ m<sup>3</sup> Microsilika und 60 kg/ m<sup>3</sup> Stahlfasern bestand. Zum Vergleich: eine Nassspritzmischung aus dem Jahr 1990 enthielt 400 kg/ m<sup>3</sup> Zement, 50 kg/ m<sup>3</sup> Microsilika, und hatte einen Wasser/ Bindemittelwert von 0.38. Nach weiteren Verbesserungen sind gegenwärtige Nassspritzbetone in etwa wie folgt zusammengesetzt:

- 380 kg/ m<sup>3</sup> Zement
- 50 kg/ m<sup>3</sup> Flugasche
- 50 - 60 kg/ m<sup>3</sup> Microsilika
- 7 kg/ m<sup>3</sup> Synthetische Fasern oder 50 kg/ m<sup>3</sup> Stahlfasern ( >1.000 MPa Zugfestigkeit)
- 400 kg/ m<sup>3</sup> Grobkorn ( ≤ 12 mm)
- 1200 kg/ m<sup>3</sup> Sand ( ≤ 5 mm)
- 170 l Wasser ( W/ B-Wert ~ 0.36)
- Fließmittel und Luftporenbildner
- 3 - 5 % Luftporengehalt nach dem Einbau.

Derartige Spritzbetonmischungen sind so konzipiert, dass sie bei korrekter Herstellung und fachgerechtem Einbau zuverlässig die technischen Anforderungen und die in den jeweiligen Ausschreibungen festgelegten Parameter erreichen. Wichtige Anforderungen sind dabei:

- 2,5 - 5,5 % Luftporengehalt zur Frostsicherheit ( gilt nur für Nassspritzbetone)
- Mindestdruckfestigkeiten von 30 MPa ( 7 Tage) und 40 MPa ( 28 Tage)
- maximale Wasseraufnahme von 8 %
- maximales Porenvolumen von 17 % ( 7 Tage)
- Mindestbiegezugfestigkeit von 4 MPa ( 7 Tage)
- Mindestbiegezugfestigkeiten von 2,0 MPa und 1,2 MPa nach dem Riss, bei

Mittendurchbiegungen von jeweils 0,5 mm und 2,0 mm ( 7 Tage)

- 100 mm Auftragsdicke.

Für die Grenzwerte der Wasseraufnahme und des Porenvolumens gelten die CSA A23.2-11C oder die ASTM C642. Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgt gemäß ASTM C1609 an Prismen mit den Maßen 100 mm x 100 mm x 350 mm, die aus den Prüfkisten herausgesägt werden.

Weiterhin ist dafür Sorge zu tragen, dass der Untergrund vor dem Spritzbetoneinbau so vorbereitet wird, dass keine losen und haftmindernden Materialien zurückbleiben. Unmittelbar nach dem Spritzbetoneinbau muss die Nachbehandlung beginnen, die mindestens 4 Tage oder bis zum Erreichen einer Druckfestigkeit von 20 MPa andauern muss.

### **Hangsicherung für das Stauwerk Revelstoke, Abschnitt „Marble Shear Block“**

Die Staumauer Revelstoke und das unmittelbar stromab gelegene Kraftwerk befinden sich 5 km nördlich der Kleinstadt Revelstoke am Columbiafluss. Die 175 m hohe Betonstaumauer dieses Wasserkraftwerkes wurde 1984 fertiggestellt. Das zugehörige Kraftwerk Revelstoke war bis zur Fertigstellung des Kraftwerkes „Site C“ BC Hydro's modernstes Großkraftwerk. Revelstoke hat 5 Blöcke mit einer Gesamtleistung von 2.480 MW. Die jährliche Produktion beträgt ungefähr 7800 GWh. Eine Erweiterung des Kraftwerkes um einen zusätzlichen Block ist vorgesehen.

Das örtliche Klima ist rau, mit Sommertemperaturen bis zu + 40°C und Wintertemperaturen teils unter - 30°C. In einer typischen Wintersaison fällt in der Region ca. 4 m Schnee.

Staumauer und Kraftwerk befinden sich in der seismischen Störungszone des Columbia Flusses. Das örtliche Gestein ist metamorph und stark zerklüftet. Mineralogisch besteht das örtliche Gestein im „Marble Shear Block“ vorwiegend aus Gneiss, Quarzit und Glimmer.

Abb. 1 zeigt die Staumauer und das Krafthaus vom Unterlauf des Flusses gesehen.



Abb. 1 Talseite von Damm und Krafthaus

Infolge eines Hangrutsches im Jahr 2022 am „Marble Shear Block“ wurden circa 350 m<sup>3</sup> Fels auf den Parkplatz unterhalb der Staumauer „deponiert“. Auch nach diesem Hangrutsch beurteilten die Geologen den Hang als weiterhin instabil. Eine graphitische Scherzone erlaubt dem darüberliegenden Gestein, sich mit ca. 1 - 2 mm pro Jahr in Richtung Fluss zu verschieben. Die gefährdeten Bereiche des Gebirges wurde in den letzten Jahrzehnten mehrfach mit Felsankern stabilisiert und mit Entwässerungsbohrungen sowie mit einem Entwässerungsstollen versehen. Ergänzend dazu hat BC Hydro eine Vielzahl von Messsonden zur Überwachung von Verschiebungen, Neigungen und Druckänderungen installiert. Zusätzlich sind geodätische Markierungen angebracht worden, um die Gebirgsbewegungen auch durch wiederholte geodätische Messungen dokumentieren zu können. Abb. 2 zeigt eine Luftaufnahme der Anlage.



Abb. 2 Luftaufnahme von Damm und Hangabrutsch

In den Abb. 3 und 4 wird der Zustand vor Ort kurz nach dem Ereignis offensichtlich.



Abb. 3 Hang nach dem Felssturz

Es wurde erforderlich, einen Hangabschnitt von ungefähr 20 - 30 m Höhe und ca. 100 m Länge zu bearbeitende. Es galt, die folgenden Aufgaben zu lösen:

- Entfernen von abgelöstem Spritzbeton aus den 1980'er Jahren
- Entfernen von losem Gestein
- Installieren von Felsankern ( bis zu 18 m lang)
- Auftragen einer meist 15 – 17,5 cm dicken Stahlfaserspritzbetonschicht ( mit z.T. wesentlich dickeren Schichten zur Unterfütterung von örtlichen Überhängen
- Auftragen einer Trockenspritzbeton-Deckschicht ohne Fasern (aber teilweise mit Mattenbewehrung) in besonders beanspruchten Zonen.

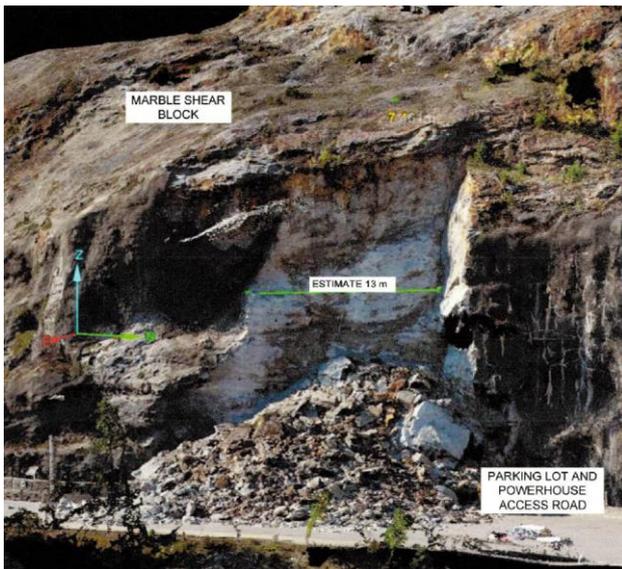


Abb. 4 Felssturz

## Ausgeschriebene Verankerungs- und Spritzbetonarbeiten

Die ausgeschriebenen Arbeitsaufgaben umfassten die folgenden Schritte:

- Entfernen von abgelöstem Spritzbeton
- Entfernen von allen haftmindernden Materialien einschliesslich Bewuchs
- Einmessen und Markieren der Stellen, an denen Felsanker planmäßig eingebaut werden sollen
- Auswählen und Markieren der Stellen, für die der Geologe zusätzliche Felsanker vorschreibt
- Markieren des Hangabschnittes, der mit Spritzbeton gesichert werden muss
- Bohren der Anker- und Dränagelöcher
- Installieren der Anker und Dränagerohre
- Auftragen einer Lage Stahlfaser-spritzbeton
- Installieren der punktuell zusätzlich notwendigen Anker und Stahlbewehrung
- Auftragen einer Decklage von Spritzbeton ohne Fasern in einigen hochbeanspruchten Zonen
- Installieren von Sicherungsnetzen.

Die technische Leistungsbeschreibung für den Spritzbeton entspricht im Wesentlichen den Anforderungen, die der Abschnitt „BC Hydro und Spritzbeton“ bereits zusammenfasst hat. Das ausführende Unternehmen wählte ein standardisiertes Trockenspritzmischgut eines

renommierten Herstellers aus. Der Abschnitt „Spritzbetonmischung“ enthält weitere Informationen zur Mischung.

BC Hydro forderte unter anderem die folgenden Leistungen für Anker und Dränage:

### Felsanker

- Länge der Felsanker zwischen 12 und 18 m je nach örtlichen Erfordernissen
- Aus galvanisiertem Ankerstahl
- Nominaler Ankerdurchmesser 43 mm
- Haftlänge 4,5 m und
- Regulärer Ankerabstand ca. 5 m.

### Spritzbetonanker

- Länge der Spritzbetonanker 1,5 m
- Mit galvanisierten Gewindestäben
- Mit einem nominalen Durchmesser von 25 mm
- Raster für Ankerabstand 1,7 m.

### Dränagerohre

- Im Rasterabstand von 1,7 m zwischen Felsankern und Spritzbetonankern.

Zur Veranschaulichung des Rasterabstandes der Felsanker dient Abb. 5.

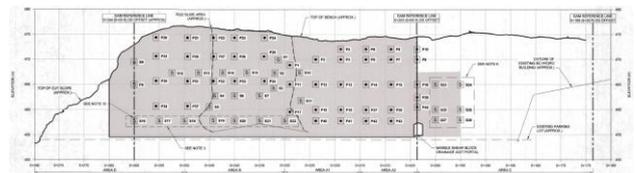


Abb. 5 Ankerraster und Areal für den Spritzbetonauftrag

## Spritzbetonmischung

Die Trockenmischung *Microsil Shotcrete T60* vom Hersteller Basalite ist so konzipiert, dass der fertige Spritzbeton einen nominalen Stahfasergehalt von  $60 \text{ kg/m}^3$  hat. Als Bindemittel dienten lediglich regulärer Portlandkalksteinzement (Type GUL nach kanadischer Norm) und Microsilika. Der Hersteller garantierte bei ordnungsgemäßer Verarbeitung und Nachbehandlung die folgenden Kennwerte der Trockenmischung:

- Druckfestigkeit nach 1 Tag  $\geq 20 \text{ MPa}$
- Druckfestigkeit nach 7 Tagen  $\geq 35 \text{ MPa}$
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen  $\geq 50 \text{ MPa}$

- Biegezugfestigkeit ( ASTM C1609) nach 28 Tagen  $\geq 6,8$  MPa
- Duktilität: ( ASTM C1609) Toughness Performance Level III - IV
- Wasseraufnahme  $\leq 4,3$  % und Porosität  $\leq 9,9$  %, jeweils nach 28 Tagen ( ASTM C642).

BC Hydro's davon leicht abweichende Leistungsanforderungen waren:

- Druckfestigkeit nach 3 Tagen  $\geq 20$  MPa
- Druckfestigkeit nach 7 Tagen  $\geq 30$  MPa
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen  $\geq 40$  MPa
- Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen 4,0 MPa
- 7-Tage-Biegezugfestigkeiten ( ASTM C1609) im gerissenen Zustand  $\geq 2,0$  MPa bei 0,5 mm Mittendurchbiegung und  $\geq 1,2$  MPa bei 2,0 mm Mittendurchbiegung. Das entspricht einem Toughness Performance Level III.
- Wasseraufnahme  $\leq 8$  % und Porosität  $\leq 17$  % nach jeweils 7 Tagen ( ASTM C642).

## Spritzbetoneinbau

Nach der Installation der Felsanker, der Spritzbetonanker und der Dränagerohre ging das ausführende Unternehmen wie folgt vor:

- Den Spritzbeton in einem Schneckenförderer mit Sprinkleranlage auf ca. 3 % Feuchtegehalt bringen.
- Das angefeuchtete Mischgut mittels Aliva AL-252 durch ca. 60 m lange Schlauchleitung zur Düse führen.
- Die maximale Förderleistung lag theoretisch bei 11 m<sup>3</sup> pro Stunde, praktisch wurde jedoch mit deutlich geringeren Leistungen ( ca. 2 m<sup>3</sup>/ h) gefahren, um einen sorgfältigen Auftrag zu gewährleisten
- Der Düsenführer trug den Spritzbeton händisch auf. Der Großteil des Spritzbetons musste von Hebebühnen aus aufgetragen werden.
- Während der Spritzbeton noch plastisch war, wurde die aufgetragene Schichtdicke mittels mechanischer Fühlerstifte ertastet.
- Täglich wurde eine Prüfkiste gespritzt.

- Die Spritzbeton-Mannschaft umfasste 6 Mitglieder:
  - zwei Personen auf der Arbeitsbühne,
  - ein Maschinenführer,
  - ein Fahrer für das Hebezeug,
  - zwei Helfer.
- Die Nachbehandlung erfolgte durch nasse Vliesmatten, welche bei niedrigen Temperaturen wiederum mit Isoliermatten abgedeckt wurden.

Abb. 6 und 7 zeigen den Spritzbetoneinbau.



Abb. 6 Spritzbetoneinbau von der Hebebühne



Abb. 7 Spritzbetoneinbau

## Gütekontrolle

Die Gütekontrolle des ausführenden Unternehmens beinhaltete:

- Tauglichkeitsnachweise der Spritzbeton - Ausgangsstoffe
- Vorversuche
- Kontinuierliche Bauüberwachung

- Laborprüfungen der täglich produzierten Prüfkörper
- Prüfung von Stichproben, die durch Kernbohrung aus dem eingebauten Spritzbeton entnommen wurden.

Insgesamt prüfte das Labor 28 Spritzbetonproben auf die wichtigsten vertraglich vereinbarten Leistungen. Dabei ergab sich Folgendes:

- Die durchschnittliche 28-Tage-Druckfestigkeit betrug 48,5 MPa, mit einer Standardabweichung von 4,5 MPa. Das gemessene Minimum von 41 MPa lag über dem minimalen Sollwert.
- Die durchschnittliche Biegezugfestigkeit betrug 5,2 MPa, mit einer Standardabweichung von 1,1 MPa. Das gemessene Minimum von 3,9 MPa lag bei 93 % des minimalen Sollwertes.
- Die durchschnittliche Beigezugfestigkeit nach dem ersten Riss und 0,5 mm Mittendurchbiegung betrug 3,0 MPa, mit einer Standardabweichung von 0,6 MPa. Das gemessene Minimum von 2,3 MPa lag bei 115 % des minimalen Sollwertes.
- Die durchschnittliche Beigezugfestigkeit nach dem ersten Riss und 2,0 mm Mittendurchbiegung betrug 2,3 MPa, mit einer Standardabweichung von 0,5 MPa. Das gemessene Minimum von 1,5 MPa lag bei 125 % des minimalen Sollwertes.
- Die durchschnittlichen Werte für Absorption und Porosität lagen unter den Maximalen Sollwerten. Die 5%-Vertrauensintervalle lagen jeweils bei ungefähr 112 % der erforderlichen maximalen Sollwerte. Die maximalen gemessenen Werte erreichten ca. 114 % der maximalen Sollwerte.

Generell wird verlangt, dass durchschnittliche Prüfergebnisse die ausgeschriebenen Ziele erreichen. Einzelergebnisse sind gewöhnlich statthaft, wenn sie mindestens 85 % des ausgeschriebenen Minimums, oder maximal 115 % des ausgeschriebenen Maximums erreichen. Damit liegen die erreichten Ergebnisse für Absorption und Porosität ebenfalls innerhalb vertretbarer Grenzen.

## Herausforderungen

Das teils stark zerklüftete Gestein hat stellenweise nur geringe Festigkeit. Aufgrund der tiefgehenden Zerklüftung ist es jedoch praktisch nicht möglich, es bis zu kompetentem Gestein zu entfernen. Daher müssen Abtragetiefen teilweise relativ willkürlich gewählt werden, wie in der folgenden Abb. 8 ersichtlich wird.



Abb. 8 Zerklüftetes Gestein unter altem Spritzbeton. Links: Schutzabdeckung eines Messinstrumentes

Die Arbeiten erstreckten sich über den Sommer und Herbst 2024 und damit über ein breites Temperaturband. Das verursachte eine weite Streuung vor allem der Spritzbetoneigenschaften, die bis zu einem nominalen Alter von 7 Tagen bestimmt werden mussten. Weiterhin ergaben sich aus der großen Distanz zwischen Baustelle und Prüflabor von ca. 500 km Schwierigkeiten, die Prüfkörper rechtzeitig zum Labor zu bringen. Demzufolge wurden mehrere der frühen Prüfungen verspätet durchgeführt.

Ein Felsüberhang erforderte eine massive Spritzbetonunterfütterung. Nach dem Auftrag der ersten Schicht Faserspritzbeton installierte der Auftragnehmer mehrere Lagen von mit Stahldrahtmatten bewehrtem Spritzbeton, um eine Gesamtdicke von stellenweise bis zu ca. 1 m zu erreichen. Die oberste Deckschicht war durchgängig mit einer Stahldrahtmatte bewehrt, die oberhalb des Überhanges verankert ist. Siehe dazu Abbildungen 9 - 11.



Abb. 9 Überhang

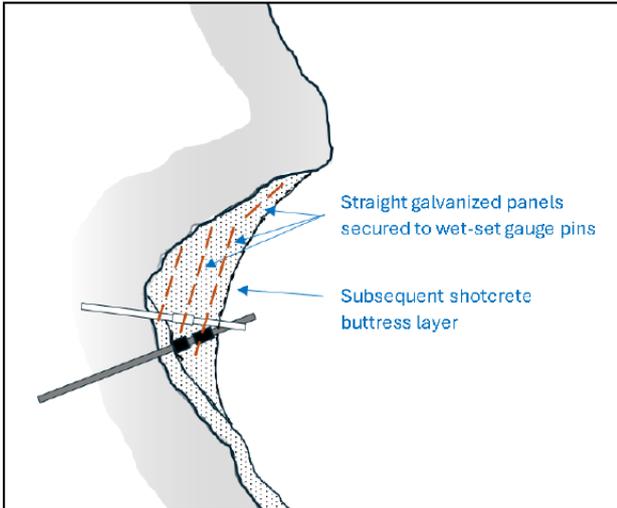


Abb. 10 Mehrlagige Unterfütterung

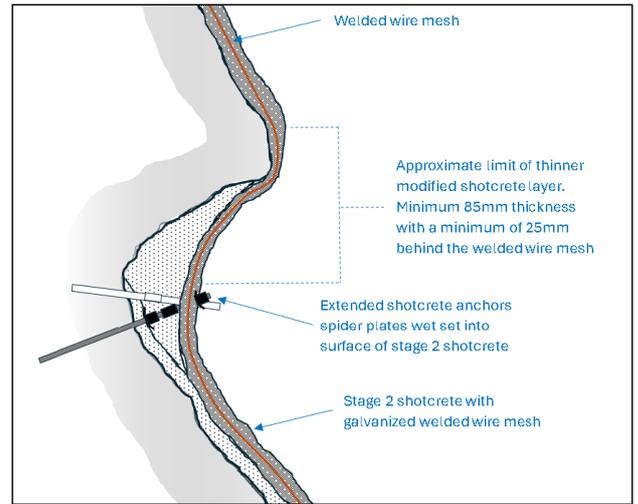


Abb. 11 Gesamtaufbau der Unterfütterung

Letztendlich konnten die Arbeiten mit Beginn der ersten Nachfröste erfolgreich abgeschlossen werden. Die langjährige Erfahrung zeigt, dass Spritzbeton bei der Hangsicherung meist dauerhafter ist, als das darunterliegende Gestein. Durch die zum Teil sehr dick aufgetragene Spritzbetonschicht ist nun zu hoffen, dass Frost-Tauwechsel seltener als zuvor das darunterliegende Gestein erreichen und es somit weniger schnell als zuvor verwittert.