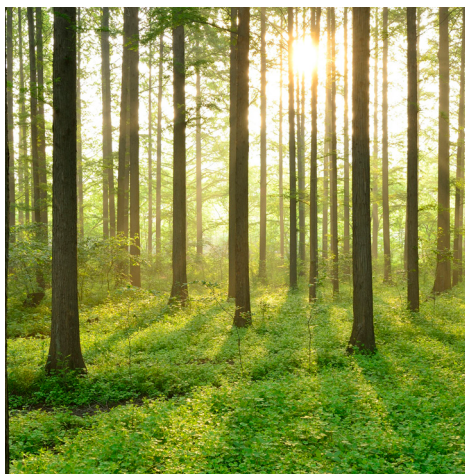


# BESTÄNDIGHET HOS INJEKTERINGSSKÄRMAR UNDER SVENSKA DAMMAR

RAPPORT 2020:646





# **Beständighet hos injekteringsskärmar under svenska dammar**

MARTIN ROSENQVIST



## Förord

**Att öka kunskapsläget kring åldring och nedbrytning av injekteringsskärmar har identifierats som ett viktigt område då det kan påverka dammsäkerheten. I den här rapporten beskrivs innebörden av åldring och nedbrytning av befintliga injekteringsskärmar under svenska dammar.**

Rapporten har skrivits av Martin Rosenqvist, ÅF. Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Carl-Oscar Nilsson (Uniper), Christian Bernstone (Vattenfall), Mats Persson (Vattenfall) och Fredrik Johansson (KTH/AECOM). Rapportens omslagsbild har fotograferats av Nils Granberg, Tyréns.

Projektet har genomförts inom det dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar.

Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

## Sammanfattning

**I denna studie har innebörden av åldring och nedbrytning av befintliga injekteringsskärmar under svenska dammar beskrivits. Beskrivningen omfattar redogörelser för historiskt utförande av injekteringsskärmar, rådande nedbrytningsprocesser, samt hur nedbrytningen påverkar dammarnas säkerhet.**

Det övergripande syftet med att sammanställa föreliggande rapport har varit att öka kunskapsläget kring förekommande åldrings- och nedbrytningsscenarier för befintliga injekteringsskärmar. Den huvudsakliga anledningen är att det finns en koppling mellan dammarnas säkerhet och injekteringens funktion och tillstånd. Hur stark denna koppling är varierar med typen av damm, injekteringens utformning, bergets beskaffenhet, samt övriga lokala förhållanden.

Det har inte gått att fastställa tidpunkten när injektering av berggrunden inför ett dammbygge blev vanligt förekommande. Injektering av berget utfördes dock vid behov redan under 1920-talet. Först mot slutet av 1930-talet verkar injektering ha blivit ett naturligt inslag vid dammbyggen och utförts systematiskt. I takt med att allt högre dammar byggdes under de följande decennierna utvecklades tekniken för injekteringens utförande. Framförallt ökade djupet på injekteringen över tid.

Eftersom cementbaserade material inte är kemiskt stabila i kontakt med vatten sker det en successiv nedbrytning av injekteringens cementbruk över tid. Injekteringens nedbrytning bedöms även kunna orsakas av mekaniska påfrestningar i berget till följd av exempelvis varierande vattennivåer i magasinet.

Angående betydelsen av injekteringens funktion för dammarnas säkerhet har det framkommit att störst risker kan sammankopplas med nedbrytning av den ytligt belägna injekteringen, den så kallade ytinjekteringen. För jord- och stenfyllningsdammarna kan nedbrytning av injekteringen leda till urspolning av sprickfyllnadsmaterial i berget, vilket i sin tur kan resultera i urspolning av tätjord och därmed initiera fortskridande skador på tåtkärnan genom inre erosion.

Gällande betongdammarna kan nedbrytning av injekteringen leda till att upptrycket ökar och att dammens säkerhet mot glidning försämrats. Risken är särskilt stor för dammar där det finns ytligt liggande horisontella sprickplan i berget vid läget för dammen, särskilt om dammen har en förhållandevis liten egentygnd. Med ett väl fungerande dränage kan säkerhetsmarginalerna för betongdammen förbättras.

Vilket behov det finns för övervakning av injekteringens funktion och tillstånd vid en specifik dammanläggning behöver bedömas från fall till fall. Detsamma gäller behovet av reparationsinjektering. Vid injektering är det viktigt att hantera de risker som uppstår för att inte reducera dammens säkerhet. För att detta ska möjliggöras kommer ett fortsatt utvecklingsarbete att behöva bedrivas.

## Summary

**In the present study, specific problems were described regarding aging and degradation of foundation grouting beneath Swedish dams. The descriptions have included brief exposés on the historic design of foundation grouting, existing degradation processes, and how the degradation affects the safety of the dams.**

The overall purpose of compiling this report has been to increase knowledge about existing aging and degradation scenarios for the foundation grouting. The main reason is that there is a link between the safety of the dams and the function and condition of the grout. The strength of this link varies with the type of dam, the grout design, the nature of the bedrock, and other local conditions.

It has not been possible to determine the moment when foundation grouting prior to dam construction became common. However, foundation grouting was carried out when needed already during the 1920s. It was not until the end of the 1930s that grouting became common during dam construction and thus carried out systematically. As dams with increasing heights were built over the following decades, the technology for foundation grouting was continuously improved.

Because cement-based materials are not chemically stable in contact with water, gradual degradation of the cement grout occurs over time. Degradation of the grout is also believed to be caused by, for example, mechanical stresses in the bedrock due to varying water levels in the reservoir.

Regarding the importance of the function of foundation grouting for the safety of the dams, the greatest risks seems to be linked to degradation of blanket grouting. Regarding embankment dams, degradation of the grout can lead to erosion of the crack-filling materials in the bedrock, which in turn can result in erosion of the impervious core and thus initiate progressive damage due to internal erosion.

Regarding concrete dams, degradation of the grout may lead to an increase in the uplift pressure causing reduced safety against sliding. The risk is particularly great for dams where there are superficial horizontal fractures in the bedrock at the dam site, especially if the dam has a relatively small mass. With well-functioning drainage, the safety of the concrete dam can be improved.

The need for monitoring of the function and condition of the foundation grouting beneath dams has to be assessed on a case-by-case basis. The same applies when assessing the need for repair grouting. When grouting, it is important to manage the risks that arise in order not to reduce the safety of the dam. For this to be possible, further development work has to be conducted.

# Innehåll

|          |                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>                                   | <b>8</b>  |
| 1.1      | Bakgrund och problemställning                      | 8         |
| 1.2      | Syfte och innehåll                                 | 8         |
| 1.3      | Avgränsningar                                      | 9         |
| 1.4      | Källmaterial                                       | 9         |
| <b>2</b> | <b>Injektering av berg inför dammbyggen</b>        | <b>10</b> |
| 2.1      | Geologiska förhållanden i Sverige                  | 10        |
| 2.2      | Injekterings betydelse för dammens säkerhet        | 10        |
| 2.2.1    | Betongdammar                                       | 11        |
| 2.2.2    | Jord- och stenfyllningsdammar                      | 12        |
| <b>3</b> | <b>Injektering av berg i historiskt perspektiv</b> | <b>14</b> |
| 3.1      | Historik                                           | 14        |
| 3.2      | Injekteringsarrangemang                            | 16        |
| 3.2.1    | Djupinjektering                                    | 16        |
| 3.2.2    | Ytinjektering                                      | 19        |
| 3.2.3    | Kontaktinjektering                                 | 20        |
| 3.2.4    | Klack-injektering                                  | 22        |
| 3.3      | Injekteringstekniker                               | 23        |
| 3.3.1    | Injektering till fullt djup i en operation         | 23        |
| 3.3.2    | Injektering i våningar (etapper)                   | 24        |
| 3.4      | Cementbruk                                         | 25        |
| 3.4.1    | Cement                                             | 26        |
| 3.4.2    | Tillsatsmaterial                                   | 27        |
| 3.4.3    | Tillsatsmedel                                      | 28        |
| 3.4.4    | Vattencementtal                                    | 28        |
| 3.5      | Praktiskt utförande av injekteringsarbeten         | 29        |
| 3.5.1    | Förberedande bergarbeten                           | 30        |
| 3.5.2    | Förundersökningar                                  | 31        |
| 3.5.3    | Injektering                                        | 32        |
| 3.5.4    | Kontroll                                           | 39        |
| <b>4</b> | <b>Injekterings funktion och beständighet</b>      | <b>41</b> |
| 4.1      | Cementbrukets egenskaper                           | 41        |
| 4.1.1    | Färska egenskaper                                  | 41        |
| 4.1.2    | Hårda egenskaper                                   | 42        |
| 4.2      | Nedbrytningsprocesser                              | 43        |
| 4.2.1    | Fysikalisk nedbrytning                             | 44        |
| 4.2.2    | Kemisk nedbrytning                                 | 46        |
| 4.2.3    | Mekanisk nedbrytning                               | 51        |
| 4.2.4    | Synergieffekter                                    | 53        |

|          |                                          |           |
|----------|------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>Övervakning och undersökning</b>      | <b>54</b> |
| 5.1      | Övervakning av injekteringens funktion   | 54        |
| 5.2      | Undersökning av injekteringens tillstånd | 55        |
| <b>6</b> | <b>Reparationsinjektering</b>            | <b>57</b> |
| 6.1      | Val av avhjälpande åtgärder              | 57        |
| 6.2      | Risker vid reparationsinjektering        | 57        |
| 6.3      | Hantering av risker                      | 59        |
| 6.4      | Genomförande av reparationsinjektering   | 60        |
|          | 6.4.1 Injekteringsmedel                  | 60        |
|          | 6.4.2 Tillvägagångssätt                  | 62        |
| <b>7</b> | <b>Diskussion</b>                        | <b>64</b> |
| <b>8</b> | <b>Slutsatser</b>                        | <b>67</b> |
| <b>9</b> | <b>Referenser</b>                        | <b>68</b> |

# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND OCH PROBLEMSTÄLLNING

Majoriteten av de stora svenska kraftverksdammarna av jord och betong är grundlagda på berg. Inför de flesta större dammbyggen injekterades det underliggande berget med cementbruk för att tätta och fylla ut sprickor och håligheter. Ett lyckat injekteringsarbete leder vanligtvis till att läckageflöden under dammen reduceras, att porttrycken i berget sänks, samt att risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial och/eller tätjord minskar. Det finns därför en koppling mellan dammens säkerhet och injekteringens funktion respektive tillstånd. Hur stark kopplingen är varierar med typen av damm, dammens utformning, samt de lokala förutsättningarna.

Historiskt har de huvudsakliga motiven till injektering vid svenska dammbyggen varit att tätta och förstärka bergmassan under den blivande dammbyggnaden. En bergmassa definieras av Johansson (2006) som ett intakt berg, vilket genomkorsas av sprickplan. De karaktäristiska egenskaperna för sprickplanen påverkar i sin tur bergmassans hållfasthet, styvhet och vattengenomsläpplighet. I Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet (2012) anges det att tillfredställande täthet i regel uppnås genom injektering. En förutsättning är dock att eventuellt starkt uppsprucket berg rensas bort innan injekteringsarbetet utförs.

Många av de stora dammarna byggdes vid tiden för den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden, vilken i huvudsak pågick mellan åren 1945 och 1975. I takt med att dammanläggningarna åldras ökar risken för beständighetsrelaterade problem. Då injekteringen kan ha betydelse för dammarnas säkerhet är det i dag av intresse för landets dammägare att öka förståelsen kring orsaker och effekter av injekteringens nedbrytning. Detsamma gäller för hur injekteringens funktion över tid kan övervakas, undersökas och vid behov återställas.

I dagsläget är det inte möjligt att avgöra vilken teknisk livslängd som injekteringen kan tillskrivas. Vad som däremot står klart är att effekterna av olika nedbrytningsprocesser kan leda till att injekteringens funktion försämras över tid. Scenariot kan i sin tur resultera i att dammens säkerhetsmarginaler reduceras. Förmågan att i tid hantera problem med avseende på åldrande injektering utgör därför en viktig del av dammägarnas systematiska dammsäkerhetsarbete. Genom förmågan att i tid vidta rätt åtgärder kan god och enhetlig dammsäkerhet upprätthållas över tid. Denna förmåga är i sin tur beroende på kunskap kring injekteringens åldring.

## 1.2 SYFTE OCH INNEHÅLL

Det huvudsakliga syftet med denna rapport är att öka kunskapen och förståelsen kring förekommande åldrings- och nedbrytningsscenarier för cementinjektering i berggrunden under vattenkraftens betong- och jorrdammar. En genomlysning av problembilden uppnås genom att sammanställa och utvärdera information kring injekteringens utformning och praktiska utförande i byggskedet, förekommande nedbrytningsprocesser, samt tillhörande risker med hänsyn till dammars säkerhet. Tillgängliga metoder för övervakning, undersökning och rehabilitering av injekteringsskärmar behandlas övergripande.

### 1.3 AVGRÄNSNINGAR

I föreliggande rapport avhandlas endast injektering av undergrunden till dammar som grundlagts på berg. Beskrivning och diskussion av andra injekteringsmedel än cementbaserade bruk berörs endast översiktligt då författaren ej har påträffat dokumentation som styrker att sådana medel användes för injektering av berggrunden i samband med den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden. Alternativa medel beskrivs dock kortfattat med avseende på reparationsinjektering.

Beskrivning av injekteringsarbetets praktiska genomförande, samt injekteringens funktion och beständighet sammanställs på övergripande nivå då berörda ämnesområden är alltför omfattande för att tillåta hög detaljrikedom. Detsamma gäller beskrivningar av den svenska berggrunden, samt olika typer av dammar utöver uppdelningen i betong- respektive jord- och stenfyllningsdamm. Vidare utförs det inte någon djupare värdering av injekteringens konstruktiva betydelse för dammarnas säkerhet utöver kortfattade beskrivningar av de felmoder där injekteringsskärmens funktion ingår.

### 1.4 KÄLLMATERIAL

En stor utmaning vid sammanställningen av denna rapport har varit tillgången på sådant källmaterial som beskriver design och praktiskt utförande av injekteringsarbetet i samband med byggskedet. Inte sällan utgör redovisningen av en utförd injektering i bästa fall en eller två meningar i beskrivningen av ett dammbygge.

Sökandet efter relevant källmaterial har alltså utgjort en betydande del av arbetet vid sammanställningen av denna rapport. Källmaterialet som utgör stommen för rapport har bland annat inhämtats från äldre facklitteratur, tekniska anvisningar, tidskrifter, konferenser och forskningsrapporter. Delar av källmaterialet finns tillgängligt i offentliga bibliotek. Andra delar finns i företagsinterna arkiv.

## 2 Injektering av berg inför dammbyggen

Injektering i samband med väg- och vattenbyggnadsarbeten innebär vanligtvis att ett pumpningsbart material under övertryck pressas in i ett annat material för att ändra dess fysikaliska egenskaper. Inför ett dammbygge är det berggrunden som kräver injektering. Framförallt är det sprickor och slag i berget som behöver försees med ett tätt och erosionsstabil material. Traditionellt sett har cementbruk använts.

### 2.1 GEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN I SVERIGE

Den svenska berggrunden består vanligtvis av bergarterna granit och gnejs, även om stora variationer förekommer lokalt. Detta gäller framförallt längs fjällkedjan där andra bergarter dominerar. Både graniter och gnejser är hårda bergarter med goda egenskaper vad gäller hållfasthet och täthet. Trots detta förekommer det partier med dåligt berg i form av zoner med kraftigt uppsprucket berg. Dessa zoner består av sprickigt, krossat och i vissa fall vittrat leromvandlat berg.

Sprickor i bergmassan uppstår vanligtvis av spänningsutlösningar i berggrunden. Förekomsten av dessa sprickor och sprickplan leder till att bergets vattengenomsläpplighet ökar samtidigt som bärigheten försämras. Bergmassans permeabilitet avtar normalt med djupet, då sprickornas apertur (öppning) vanligtvis är störst i det ytligt belägna berget. För bättre beskrivning av de geologiska förhållandena i Sverige hänvisas till Berglund och Lindblom (2019) som redogör för dessa ur ett vattenkraftsperspektiv med fokus på de vattenförande tunnlarna.

Den svenska berggrunden är i huvudsak fri från större geologiska defekter och har därför endast i få fall orsakat stora svårigheter i samband med dammbyggen. Trots detta har det varit praxis att injektera berggrunden inför dammbyggen. En vanligt förekommande arbetsgång var att loss hålla och avlägsna det vittrade berget i ytan. Eventuellt kvarvarande trasigt berg, inklusive befintliga sprickor och slag i den underliggande bergmassan injekterades därefter med cementbruk.

Enligt Vattenfalls anvisningar (1968) är tätning och förstärkning de två vanligaste motiven till att injektera berggrunden. Berget tätas vanligtvis utmed dammlinjen, dels för att reducera portrycken under dammen och dels för att hindra erosion av sprickfyllnadsmaterial. I en berggrund som består av permeabla bergarter kan tätningen även leda till signifikant reducerat läckage från magasinet.

Förstärkning av bergmassan kan också åstadkommas genom injektering. Avsikten är att minimera risken för deformationer i berggrunden, vilka kan uppstå till följd av påförandet av damm- och vattenlast. De exakta skälen till injektering av berggrunden skiljer sig vanligtvis åt beroende på de lokala förhållandena, samt om det är en betongdamm eller en jorddamm (jord/stenfyllningsdamm) som ska byggas.

### 2.2 INJEKTERINGENS BETYDELSE FÖR DAMMENS SÄKERHET

Brister i injekteringen kan över tid leda till omständigheter där dammens säkerhet försämras på ett sätt som slutligen riskerar att utvecklas till ett dammhaveri. Det finns därför ett samband mellan dammens säkerhet och injekteringens funktion

respektive tillstånd. I kommande avsnitt beskrivs tänkbara felmoder med koppling till injektering av berggrunden. En grov uppdelning görs mellan betongdammar respektive jord- och stenfyllningsdammar, vilka behandlas separat.

### 2.2.1 Betongdammar

Beträffande betongdammar är det vanligaste skälet till injektering av berggrunden att sänka portrycken i berget och reducera vattnets lyftande kraft på dammen. Att injektera berget förbättrar dammens stabilitet med hänsyn till risken för stjälpning och glidning. Enligt RIDAS (2017) ska en injekteringsskärm dock endast betraktas som extra säkerhet. I klartext betyder det att tryckreduceringen som kan erhållas genom injektering inte bör tillgodoräknas vid beräkning av dammens stabilitet.

Hur stor betydelse injekteringen faktiskt kan ha för dammens säkerhetsmarginaler varierar med dammens utformning, bergets beskaffenhet och de antaganden som gjordes i samband med dammens dimensionering. Dessa förutsättningar är alltid unika och skiljer sig åt från damm till damm. Generella skillnader med avseende på injekterings betydelse kan dock förutsättas finnas mellan massivdammar med stor egentyngd och lamelldammar med liten egentyngd.

Massiva gravitationsdammar har generellt dimensionerats för ett linjärt avtagande upptryck räknat från dammens uppströmssida. Den lyftande kraften är produkten av upptrycket multiplicerat med dammens area i kontaktzonen mot berget. Arealen för motsvarande kontaktzon under lamelldammar är mindre, varför även vattnets lyftande kraft blir mindre. Ogynnsamma förhållanden i berget under dammen kan då leda till att lamelldammens säkerhetsmarginaler reduceras i större utsträckning än massivdammens marginaler. Den huvudsakliga anledningen till detta är lamelldammens mindre egentyngd. Effekten av ogynnsamma förhållanden kan dock lindras genom väl fungerande dränering av berget under dammen.

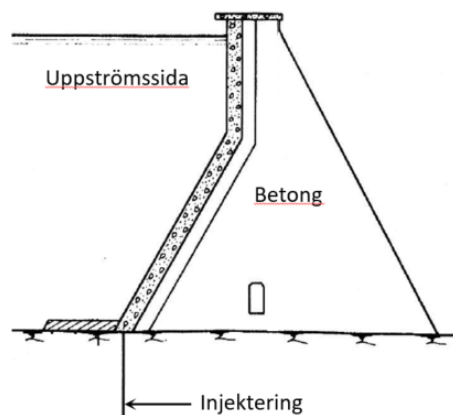
Ett annat skäl till injektering av berggrunden är att förbättra bergets bärighet, samt att minska risken för deformationer som skulle kunna leda till rörelser i dammen. I tillgängligt källmaterial har det inte framkommit att reduktion av vattenförluster från magasinet skulle ha varit ett huvudsakligt skäl till injektering av berget.

För betongdammar kan följande felmoder bli aktuella vid avsaknad av injektering eller nedbrytning av befintlig injektering:

- Otillräcklig täthet i berggrunden:
  - × Ökande portryck i berggrunden kan orsakas av tilltagande läckage under dammen (se vidare i "otillräcklig global stabilitet").
  - × Högre flödes hastigheter i sprickor kan leda till erosion av sprickfyllnadsmaterial (se vidare i "otillräcklig bärighet i bergmassan").
- Otillräcklig global stabilitet:
  - × Stjälpning av dammen kan orsakas av höga portryck i berget.
  - × Glidning av dammen kan initieras av höga portryck i ytligt belägna sprickor och sprickplan (om sådana finns) med ofördelaktig utbredning och lutning i berget.

- Otillräcklig bärighet i bergmassan:
  - × Deformationer i berget och efterföljande sättningar i dammen kan orsakas av erosion eller kompression av sprickfyllnadsmaterial.
  - × Försämrade bärighet i bergmassan kan orsakas av varierande laster, exempelvis reglering av vattennivån i magasinet.

I berggrunden under betongdammar har den tätande injekteringen ofta placerats så nära dammens uppströmssida som möjligt. Kombinerat med dränering strax nedströms injekteringen sänks portrycken i berget under dammens resterande delar, vilket förbättrar dammens stabilitet. I Figur 1 visas ett exempel på hur injekteringen kunde placeras under en betongdamm.



Figur 1. Under betongdammar placeras injekteringen vanligtvis nära dammens uppströmssida. Dränering av berget anordnas direkt nedströms injekteringen. Modifierad illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

### 2.2.2 Jord- och stenfyllningsdammar

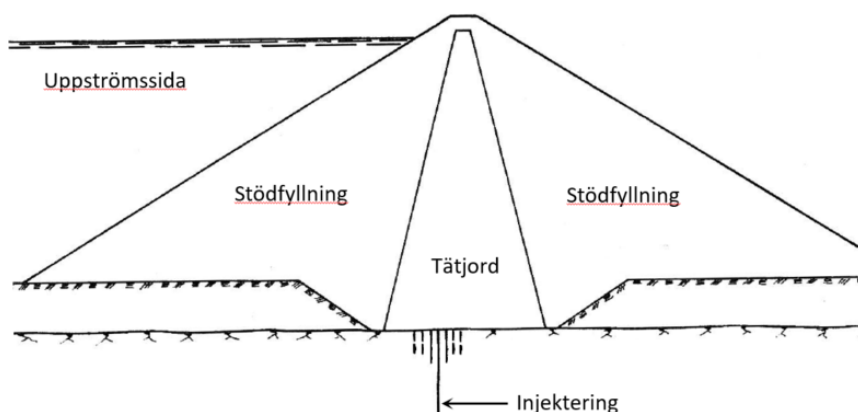
Beträffande jord- och stenfyllningsdammar är de vanligaste skälen till injektering av berggrunden att sänka portrycken och minska läckagevattnets flödes hastighet under dammen. Härmed förbättras dammens stabilitet samtidigt som risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial eller tätjord reduceras. Ytterligare ett skäl till injektering är att förbättra bergets bärighet och minska risken för deformationer som kan leda till sättningar i dammen. I likhet med betongdammarna är det ett mindre vanligt skäl i Sverige att injektera berget under fyllningsdammar för att reducera vattenförluster från magasinet.

För jord- och stenfyllningsdammar kan följande felmoder bli aktuella vid avsaknad av injektering eller nedbrytning av befintlig injektering:

- Otillräcklig täthet i berggrunden:
  - × Ökande portryck i berggrunden kan orsakas av tilltagande läckage under dammen (se vidare i "otillräcklig global stabilitet").
  - × Högre flödes hastigheter i ytligt belägna sprickor kan leda till erosion av fyllnadsmaterial och i förlängningen urspolning av tätjord eller filtermaterial (kontaktersion).

- × Högre flödes hastigheter i djupt belägna sprickor och sprickplan kan också leda till erosion av fyllnadsmaterial (se vidare i "otillräcklig bärighet i bergmassan").
- Otillräcklig global stabilitet:
  - × Glidning av dammen kan initieras av höga portryck i ytligt belägna sprickor och sprickplan (om sådana finns) med ofördelaktig utbredning och lutning i berget.
  - × Utglidning av dammens stödfyllning kan initieras av att förhöjda portryck i berggrunden höjer portrycken i stödfyllningen.
- Otillräcklig bärighet i bergmassan:
  - × Deformationer i berggrunden och efterföljande sättningar i dammen kan orsakas av erosion eller kompression av sprickfyllnadsmaterial.
  - × Försämrade bärighet i bergmassan kan orsakas av varierande laster, exempelvis reglering av vattennivån i magasinet.

I berggrunden under jord- och stenfyllningsdammar har den tätande injekteringen vanligtvis placerats under tätkärnans centrala parti. En placering nära tätkärnans uppströmskant ansågs särskilt riskfylld på grund av den stora tryckgradient som skulle uppstå i tätjorden strax ovanför berget. I Figur 2 visas ett exempel på hur injekteringen kunde placeras under en jord- eller fyllningsdamm.



Figur 2. Under jord- och stenfyllningsdammar placeras injekteringen vanligtvis nära tätkärnans centrala parti med syftet att undvika alltför stor hydrauliska gradient i tätjordens uppströmskant. Modifierad illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

### 3 Injektering av berg i historiskt perspektiv

I följande avsnitt ges en kort inblick i injekterings historia och hur injektering av berg har använts under den svenska vattenkraftsutbyggnaden. För att återge den svenska utvecklingen har framförallt anvisningar och handböcker sammanställda av Vattenfall använts. Dessa skrifter framarbetades allteftersom nya erfarenheter insamlades från pågående och fullbordade dammbyggen. Vattenfall var ansvarig för den svenska statens kraftverksbyggen medan Vattenbyggnadsbyrån (VBB) projekterade många av de privata aktörernas vattenkraftverk. I den mån det har varit möjligt har skillnader och likheter mellan Vattenfall och VBB lyfts fram. Artiklar i Teknisk Tidskrift och bevarade arbetsbeskrivningar från specifika kraftverksutbyggnader har använts för att beskriva VBB:s anvisningar.

#### 3.1 HISTORIK

Järnvägsutbyggnaden under 1800-talet var en pådrivande kraft för utvecklingen av nya tekniker för undergrundens förstärkning. En av dessa tekniker var injektering. De allt större påkänningarna i marken till följd av ökande järnvägstrafik skapade ett behov av att dels kunna förstärka marken i förväg och dels kunna återställa eller förbättra markens bärighet ifall skador uppstod till följd av belastningen.

Internationellt finns det bevarad dokumentation från injekteringsarbeten så långt tillbaka i tiden som från början av 1800-talet. I dessa fall användes injektering som metod för att reparera skador i sluss- och murverkskonstruktioner. I vattenkrafts-sammanhang har det framförallt varit strävan att bygga dammar på platser med permeabel berggrund som har drivit på utvecklingen av injekteringstekniker. På platser där berggrunden bestod av otäta bergarter såsom sand- eller kalksten var det en förutsättning att medelst injektering kunna förhindra omfattande läckage under dammen. Enligt Weaver och Bruce (2007) har injektering utförts för att reducera läckage under olika sorters dammar i USA sedan 1890-talet.

Injektering av berggrunden utfördes för första gången i systematisk skala under bygget av Hoover Dam (1931–1936). Enligt Hiltzik (2010) utfördes injekteringen under så stark tidspress att inte alla påträffade sprickor, kaviteter och andra svagheter i berggrunden blev ordentligt utfyllda med cementbruk.

Resultatet av det forcerade arbetet avslöjades under magasinupptagningen när ett större antal läckvägar förbi dammen konstaterades. Läckaget ledde till att det snart uppmättes oroväckande höga portryck under dammen. Rogers (2005) anger att det mödosamma och kostsamma arbetet att tätta de många läckvägarna inleddes 1938 och avslutades först 1947. Injekterings uppenbara betydelse för bergets täthet ledde till en allmän acceptans av injekterings betydelse för dammars säkerhet.

När injektering av berggrunden utfördes för första gången vid ett dammbygge i Sverige har inte gått att fastställa. I bevarade redogörelser från kraftverksbyggen under 1900-talets inledande decennier beskrivs sällan grundläggningsarbetena i vidare ordalag än att dammarna grundlades på berg eller jord. Beskrivningar av undergrundens beskaffenhet eller utförda förstärkningsarbeten är sällsynta.

Ett undantag är redogörelsen av Serrander m.fl. (1923) gällande Forshuvudforsens kraftverksbygge åren 1919–1921. Vid läget för dammen och kraftverket uppges det att berggrunden var starkt söndersprucken varför stora volymer av bergets ytlager fick avlägsnas. En ränna nedsprängdes i berget längs dammens uppströmssida för att dammens tätklack skulle kunna gjutas mot tätt berg. Trots uppsprucket berg omnämns ej någon injektering av berget i redogörelsen.

I en artikel publicerad i Teknisk Tidskrift redogör överingenjör Axel Ekwall (1928) för Vattenfalls utbyggnad av serievalvsdammarna i Suorva 1921–1923. Av artikeln framgår det att berget på sina ställen var av *"avsevärt mycket sämre"* kvalitet än vad de utförda undersökningarna hade indikerat. För att grundlägga dammen på fast och tätt berg hade det antagits att det skulle krävas en i medeltal 2 m djup tätklack av betong längs valvens uppströmssida. Under bygget framkom det att berget på vissa ställen var så dåligt att tätklacken fick nedföras till ett djup av nästan 10 m. Huruvida injektering av berget var ett alternativ till fördjupningen av tätklacken framgår ej av artikeln. Det kan antas att fördjupningen fördröjde arbetet.

I slutet av 1920-talet redogör både Ekwall (1928) och Samsioe (1929) för befintliga problem gällande betongens beständighet och hur betongdammarna framledes bör byggas. Ekwall var verksam vid Vattenfall medan Samsioe arbetade vid Vattenbyggnadsbyrån (VBB). Ingen av författarna nämner dammarnas grundläggning. Vad som istället lyfts fram är att cementinjektering under 1920-talet har blivit en vedertagen metod för att rehabilitera otäta och läckande betongdammarna. Denna beskrivning bekräftas sedan av Westerberg (1926) i en redogörelse för Vattenfalls erfarenheter av cementinjektering i betong- och murverkskonstruktioner.

Att cementinjektering nyttjades i allt större omfattning för att tätta läckande betongkonstruktioner ledde troligen till att injektering även kom att ses som ett alternativ för tätning av uppsprucket berg. I samband med Krångfors kraftverksbygge, vilket genomfördes åren 1926–1928, skulle berget injekteras ifall det inte var tillräckligt tätt och att en fördjupning av dammens tätklack inte skulle avhjälpa problemet.

Utrustningarna som användes för injektering under 1920-talet var för det mesta av enkel konstruktion. Först i början av 1930-talet introducerades det på den svenska marknaden utrustning specifikt anpassad för injektering. I Teknisk Tidskrift (häfte 10 år 1934) gjordes det exempelvis reklam för en särskild pump för injektering vid höga tryck. Det framhölls att pumpen redan hade använts vid Vattenfalls arbeten i Trollhättan. I takt med ett ökande behov av injektering hade det Svenska Diamantbergborrnings Aktiebolaget (idag del av Atlas Copco) specialiserat sig på cementinjektering och de utförde arbeten såväl inrikes som utrikes under 1930-talet.

I samband med ett föredrag vid Svenska Vattenkraftföreningens årsmöte 1933 lyfte Westerberg (1933) fram att cementinjektering är den reparationsmetod som står till buds vid skador i *"grunden eller i konstruktionens inre partier"*. Motiveringen var att skadans läge medför att det inte går att komma åt att reparera på något annat sätt till rimlig kostnad. I nästa föredrag visade Matton (1933) en sammanställning över utförda injekteringsarbeten i Sverige respektive utomlands. Uppdragen utförda i Sverige hade gällt injektering i skadade betongkonstruktioner medan uppdragen utomlands till största delen gällde injektering av berggrunden eller kontaktzonen

mellan berg och betong. I den efterföljande diskussionen påpekades det att även berget under läckande betongdammar borde injekteras om det är vattenförande.

Parallellt med utvecklingen av injekteringstekniken gjordes betydande framsteg inom geoteknikområdet. I slutet av 1940-talet hade den tekniska utvecklingen, underbyggd av praktiska erfarenheter, kommit så långt att det i Sverige fanns långt gångna planer på att bygga fyllningsdammar med höjder över 100 meter.

Givet det rådande kunskapsläget bedömdes det att dessa dammar skulle kunna uppföras med tillfredsställande säkerhet. Två viktiga förutsättningar för att nå erforderad säkerhet var att erhålla god bärlighet och god täthet i undergrunden. Dessa förutsättningar bedömdes uppfyllas genom ett väl planerat och väl utfört injekteringsarbete. Injektering av berggrunden är sedan 1940-talet ett naturligt inslag i samband med dammbyggen i Sverige. Vanligtvis injekterades berget tills en täthet motsvarande 1 Lugeon erhöles (se vidare i avsnitt 3.5.2).

## 3.2 INJEKTERINGSARRANGEMANG

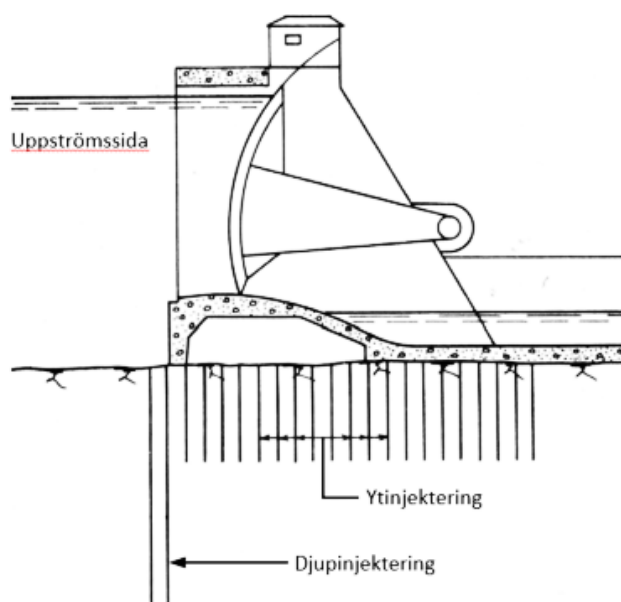
Injektering av underliggande berggrund leder till att en kombinerad tätnings- och förstärkningszon åstadkoms under dammbyggnaden. En vanligt förekommande benämning på denna zon är injekteringsskärm. Injekteringsskärmens konstruktiva utformning anpassas vanligtvis efter bergets beskaffenhet. Beroende på de lokala förhållandena i berget kan olika typer av injekteringsarrangemang komma ifråga. De vanligast typerna av injekteringsarrangemang är djupinjektering, ytinjektering och kontaktinjektering. Vid Vattenfall tillämpades en fjärde typ av injekteringsarrangemang som kallades klack-injektering.

### 3.2.1 Djupinjektering

I vattenkraftssammanhang innebär djupinjektering att berget injekteras längs en smal men djup zon i syfte att åstadkomma en tätande ridå längs med dammen (Figur 3). Ridåinjektering är en annan vanligt förekommande benämning på djupinjektering. Vid djupinjektering är det framförallt berggrundens vattengenomsläpplighet som reduceras.

I samband med den första kraftverksutbyggnaden i Krångfors, under åren 1926–1928, nedsprängdes en grav till tät och fast berg för grundläggning av dammens tätklack. I material- och arbetsbeskrivningen skrev VBB att berget skulle injekteras med cementbruk ifall det inte var tillräckligt tät och att en fördjupning inte skulle avhjälpa problemet. Cementbruket skulle injekteras under tryck i borrhål "*neddriva till lämpligt djup under tätningsklackens botten*". Någon närmare beskrivning av hur arbetena skulle utföras gavs ej. Utifrån skrivningen kan det tolkas som att injektering utfördes efter behov och inte systematiskt. Beskrivningen sammanställdes av Schmidt och Samsioe F (1926).

Motsvarande skrivningar påträffas i material- och arbetsbeskrivningar till ett flertal kraftverksbyggen projekterade av VBB under början av 1930-talet. Ett exempel ges av Schmidt och Jonson (1930) angående Munkfors kraftverksbygge.



Figur 3. Injektering längs en smal men djup zon för att skapa en tät ridå kallas djupinjektering. Injektering av bergets övre delar kallas vanligtvis ytinjektering. Modifierad illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

Ett av de största dammbyggnadsprojekten under 1930-talet var uppförandet av regleringsdammen i Krångede. Enligt Hallhagen (1939) grundlades den 220 m långa betongdammen på gott berg bestående av syenitisk granit. Dammen och kraftverket byggdes mellan åren 1933 och 1936. För att hindra förekomsten av stora upptryck under dammen på grund av horisontella sprickor och rännor i berget tätades detta omsorgsfullt genom injektering under tätklacken. Därefter borrades dräneringshål som mynnade i öppningarna mellan monoliterna.

I slutet av 1939 publicerade Furuskog (1939) en artikel i Teknisk Tidskrift där han anger att *"berggrunden under tätningsdiktet tätats genom cementinjektering"* vid några nyligen färdigställda vattenkraftverk. I artikeln nämns dammarna i Hissmofors, Kinna, Långhag, Skogsforsen och Skymnäs. Någon närmare beskrivning av injekteringsarbetenas utförande gavs ej.

Vad som kan utläsas av ovan refererade dammbyggen är att Vattenbyggnadsbyrån troligtvis började föreskriva systematisk djupinjektering vid dammbyggen från och med slutet av 1930-talet. Beträffande Vattenfalls dammbyggen har det varit svårare att hitta redogörande texter med avseende på dammbyggnadernas grundläggning.

Lalin (1942) anger dock att injektering av cementbruk huvudsakligen används för *"tätning av berggrunder"*. Skrivningen återfinns i 1942 års upplaga av Vattenfalls handbok för betongkontroll. Det är således rimligt att förutsätta att VBB och Vattenfall bedömde behovet av djupinjektering på ett liknande sätt.

En specifik skiljelinje för övergången från behovsstyrd till systematisk injektering utmed dammarnas tätlinje kommer troligtvis inte gå att finna. Vad som däremot kan förutsättas är att behovet av tätning av berggrunden växte i takt med att allt högre dammar planerades. Med början under slutet av 1930-talet har troligtvis systematisk djupinjektering utförts under de flesta höga dammar i Sverige.

Systematisk djupinjektering innebar normalt att berget injekterades i en eller flera rader med regelbundet placerade borrhål i dammens längdriktning, det vill säga vinkelrätt mot läckagevattnets flödesriktning (Figur 4). Injekteringen bildade en vertikalt tätande ridå i berget, därav benämningen ridåinjektering. Injekteringsarbetet utfördes antingen i en operation till fullt djup eller i flera våningar (omgångar) nedifrån eller uppifrån (se avsnitt 3.3).



Figur 4. Borrning och montage av manschetter med regelbundet avstånd. Foto Uniper.

Inför bygget av stenfyllningsdammen vid Harsprångets kraftverk, åren 1946–1951, skulle berggrunden injekteras i minst två rader under lertätningen uppströms den centralt placerade tätskärmen av armerad betong. Westerberg och Wittrock (1949) uppger att injekteringshålen i den uppströms belägna raden borrades till ett djup av 8 m medan hålen i den andra raden borrades till 3 m. Följaktligen injekterades berget till ett största djup motsvarande en sjättedel ( $\frac{1}{6}$ ) av dammens höjd av 50 m.

Vid det efterföljande kraftverksbygget i Stora Lule älv, vilket inleddes år 1951 vid Ligga by, skulle berget också injekteras i två rader utmed den tätande kärnan av moränjord. Enligt Flodin och Hagrup (1954) nedborrades injekteringshålen i den uppströms belägna raden till ett djup av 4 m. Hålen i raden nedströms borrades ned till 8 m djup. Djupen räknades från en färdigsprängd och rensad yta av fast berg. Injekteringsdjupet motsvarade en fjärdedel ( $\frac{1}{4}$ ) av dammens höjd av 35 m.

I mitten av 1960-talet påbörjade Vattenfall arbetet att sammanställa dittills erhållna praktiska erfarenheter gällande injektering av berg i samband med dammbyggen. Erfarenheterna publicerades år 1968 i form av anvisningar för cementinjektering i berg. I Vattenfalls anvisningar (1968) rekommenderades det att djupinjektering skulle utföras till ett djup av en fjärdedel ( $\frac{1}{4}$ ) till hälften ( $\frac{1}{2}$ ) av dammens höjd. Anvisningarna reviderades i mitten av 1980-talet när de arbetades in i en ny publikation om erfarenheter från byggen av jord- och stenfyllningsdammar.

I Vattenfalls anvisningar (1988) stod det att djupinjektering vanligen hade utförts i 2–3 rader till ett djup av 6–10 m och i minst en rad till ett djup som motsvarade en tredjedel ( $\frac{1}{3}$ ) av dammens höjd, dock som lägst 6–10 m. Om berget bedömdes otätt på detta djup skulle injekteringen fortsätta till ett djup motsvarande maximalt två tredjedelar ( $\frac{2}{3}$ ) av dammens höjd. Erfarenheter gjorde gällande att normalt svenskt berg brukade bli tätt med ett hålavstånd om 1–2 m. I finsprickigt berg krävdes det ofta att hålavståndet minskades ned till 0,5 m för att uppnå fullgod täthet.

Den utveckling som kan skönjas vid Vattenfalls dammbyggen är att injekteringsdjupet relativt dammens största höjd ökade över tid. En liknande utveckling kan noteras för de dammanläggningar som projekterades av Vattenbyggnadsbyrån. Exempelvis kan riktlinjerna inför Bålforsens kraftverksutbyggnad (1954–1958) jämföras med riktlinjerna för Rätans kraftverksutbyggnad (1964–1968).

Gällande Bålforsen stod det i byggnadsbeskrivningen att berget under tätklacken i dammens uppströmsdel skulle injekteras till ett djup av 5–10 m *”där så erfordras”*. Då dammens största höjd är 32 m motsvarade detta ett relativt injekteringsdjup mellan en sjättedel ( $\frac{1}{6}$ ) och en tredjedel ( $\frac{1}{3}$ ) av dammens höjd. Angående Rätan skulle berget injekteras till ett djup av 6–15 m, vilket motsvarade ett injekteringsdjup mellan en femtedel ( $\frac{1}{5}$ ) och hälften ( $\frac{1}{2}$ ) av dammens största höjd av 30 m.

Enligt RIDAS (2017) bör injekteringsens omfattning styras av bergets beskaffenhet. För betongdammar bör djupinjektering utföras med ett relativt djup motsvarande halva ( $\frac{1}{2}$ ) dammhöjden. Motsvarande rekommendation för jord- och stenfyllningsdammar är enligt RIDAS (2012) att djupinjektering bör utföras till minst en tredjedel ( $\frac{1}{3}$ ) och maximalt två tredjedelar ( $\frac{2}{3}$ ) av dammens höjd.

Innan djupinjektering utfördes var det inte ovanligt att bergytan först förseglades. Avsikten var att skapa ett mottryck som förbättrade cementbrukets förmåga att tränga in i ytliga bergssprickor. Förseglingen av bergytan kunde åstadkommas genom ytinjektering (avsnitt 3.2.2) alternativt täckning med betongplatta eller sprutbetong. Beträffande jord- och stenfyllningsdammar utformades plattan vanligtvis så att den sträckte sig från uppströms till nedströms filter.

### 3.2.2 Ytinjektering

Med ytinjektering avses att ytligt och särskilt sprickigt berg injekteras (Figur 3). Under jord- och stenfyllningsdammar utförs injektering huvudsakligen för att hindra läckande vatten från att strömma längs berget och erodera tätjord och filtermaterial underifrån. Ytinjektering reducerar också risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial i berget till följd av genomsipprande vatten.

Ytinjektering kan även utföras med syftet att förbättra den spruckna bergmassans bärighet ifall det är för kostsamt att avlägsna bergmassorna. Genom ytinjektering förbättras bergets styvhet samtidigt som vattengenomsläppligheten reduceras. Andra vanligt förekommande benämningar på ytinjektering är konsolideringsinjektering och utbredd injektering.

Det var vanligt ytinjektering antingen utfördes i form av en rad med regelbundet placerade hål i dammens längdriktning eller i form av ett rutnät (Figur 5). Djupet på injekteringshålen styrdes mestadels av bergets beskaffenhet. Enligt Vattenfalls

anvisningar (1988) var det vanligt att ytinjektering utfördes till ett djup av 2–3 m med ett inbördes avstånd om 1–2 m mellan hålen. I områden med särskilt mycket sprickor kunde borrhålsavståndet vara så litet som 0,5 m. Under tät kärnan i jord- och stenfyllningsdammar utfördes ytinjektering vanligen med en bredd av drygt 10 m, dock minst hela tät kärnans bredd. Ytinjektering kompletterades alltid med djupinjektering i form av en eller flera rader.



Figur 5. Placering av manschetter i rutnät inför utförande av ytinjektering. Foto Uniper.

I RIDAS (2012) rekommenderas det att ytinjektering under jord- och stenfyllningsdammar utförs till ett djup om minst 6 m. Injektering bör utföras i minst två rader med avståndet 2–4 m och ett borrhålsavstånd om 3–4 m. Jämfört med den tidigare rekommendationen i Vattenfalls anvisningar (1988) är dessa borrhålsavstånd stora.

### 3.2.3 Kontaktinjektering

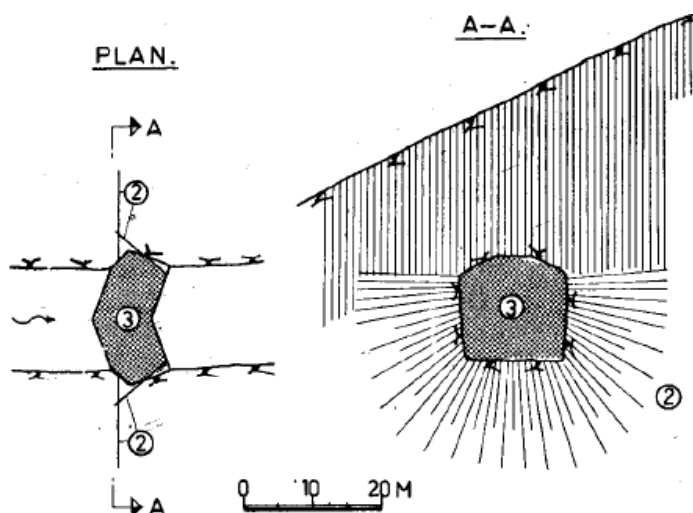
I vattenkraftssammanhang förknippas kontaktinjektering vanligtvis med tätning av sprickor, spalter och hålrum som kan uppstå i kontaktzonen mellan berg och betong. Kontaktinjektering utförs för att säkerställa god vidhäftning mellan berg och betong eller för att hindra vattenläckning i kontaktzonen.

När sprickigt berg påträffades i samband med bergrensning vid läget för en jord- eller stenfyllningsdamm förseglades berget vanligtvis med en betongplatta innan djup- och ytinjektering utfördes (Figur 6). Berget kunde även förseglas med sprutbetong, framförallt under den senare delen av vattenkraftsutbyggnaden. Kontaktinjektering utfördes till sist för att fylla ut kvarvarande sprickor i kontaktzonen. I dagsläget rekommenderar RIDAS (2012) och Bureau of Reclamation (2012) att uppsprucket berg förseglas med betong.



Figur 6. Kontaktinjektering av utrymmet mellan berg och betongutfyllnad. Foto Uniper.

Kontaktinjektering utfördes även när andra slags betongkonstruktioner gjöts mot berg. Två exempel är betonginklädda tilloppstuber respektive sugrör. Ytterligare ett exempel på konstruktioner som kontaktinjekterades är tätpluggar, vilka gjöts för att försegla omloppstunnlar som användes för älvvattnets förbiledning under tiden för dammbygget. Det var inte ovanligt att tätpluggen placerades i nivå med djupinjekteringen, varför också injektering av kontaktzonen mellan pluggen och berget krävdes för att uppnå erforderlig täthet. I Nilsson (1967) visas ett exempel på injekteringsarrangemang runt en tätplugg i en omloppstunnel.



Figur 7. Plan- och vertikalsektion av en tätplugg i betong (3) i en omloppstunnel under en stenfyllningsdamm. Pluggen placerades i nivå med dammens djupinjektering. Kompletterande injektering (2) av berget utfördes från omloppstunneln. Slutligen injekterades kontaktzonen berg/betong. Illustration från Nilsson (1967).

Kontaktinjektering tillämpades också när gropar och skrevor i berget hade fyllts ut med betong. Detsamma gällde när bergets lutning var så pass brant att utjämnings-sprängning i kombination med betonggjutningar hade utförts. Kontaktinjektering kunde även utföras om rörelser hade noterats i berggrunden och det uppstod en risk att sprickor kunde ha bildats i kontaktzonen mellan berg och betong.

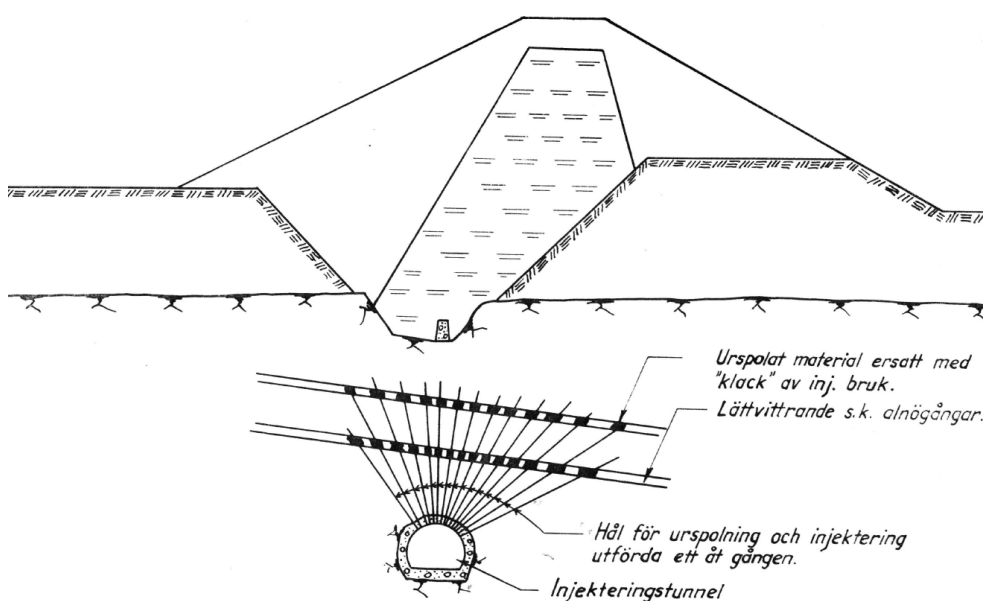
Kontaktinjektering utfördes med hål som inte behövde vara nämnvärt längre än att de korsade kontaktzonen. I likhet med ytinjektering borrades hålen ofta i ett rutnät med ett inbördes avstånd av 1–2 m. Ibland borrades hålen djupare för att kontakt- och ytinjektering skulle kunna utföras i en och samma operation.

### 3.2.4 Klack-injektering

Med klack-injektering avses förstärkning av en berggrund som är genomskuren av stora materialfyllda sprickor. Vattenfall använde klack-injektering för att förbättra bärigheten i delar av berggrunden under kraftverksdammen i Bergeforsen. Nilsson (1954) uppger att så kallade Alnögångar påträffades i berggrunden i samband med kraftverksbygget på 1950-talet. Ursprunget till dessa Alnögångar är vulkanutbrott som inträffade i området för miljontals år sedan.

Utbrotten resulterade i ett system med sprickor fyllda med magma som vittrar vid kontakt med luft eller vatten. Sprickorna visade sig vara upp till 0,5 m i mäktighet. Vid fullständigt sönderfall förlorar magman det mesta av sin hållfasthet och kan mest liknas med lerig morän. För att möjliggöra injektering av Alnögångarna sprängdes en inspektionstunnel ut i berget (Figur 8).

Enligt beskrivning i Vattenfalls anvisningar (1968) borrades grova hål genom vilka speciellt utformade spolmunstycken fördes in och spolade ut vittrat material. Tomrummet fylldes sedan med ett tjockt cementbruk av hög hållfasthet. Varje hål som fylldes med bruket blev en "klack" i berget, därav benämningen klack-injektering.



Figur 8. Klack-injektering utfördes av Vattenfall i enstaka fall. Illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

### 3.3 INJEKTERINGSTEKNIKER

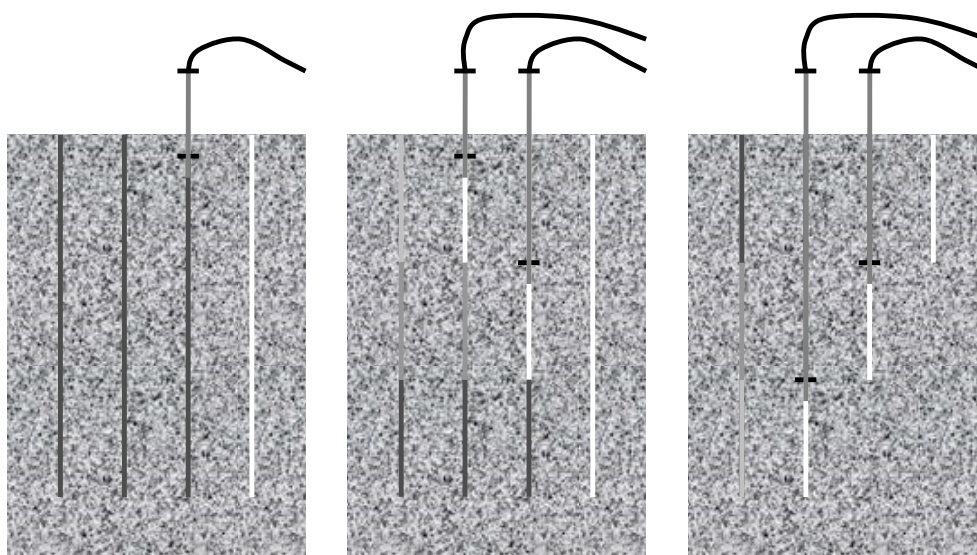
Det vanligaste tillvägagångssättet vid injektering i berg är att cementbruk pressas in i berget under övertryck för att fylla ut förekommande sprickor och håligheter. En ofta använd benämning på detta tillvägagångssätt är permeationsinjektering. Förutsättningen för injektering är att sprickorna och håligheterna i berget är så pass stora att injekteringen kan utföras med avsett bruk inom rimlig tidsrymd.

Olika tekniker för borrhålens injektering kan tillämpas baserat på bergets lokala beskaffenhet. De vanligaste teknikerna under svenska förhållanden har varit att injektera till fullt djup i en operation eller att injektera i våningar ned/uppifrån.

#### 3.3.1 Injektering till fullt djup i en operation

I berg av god beskaffenhet kan ofta hela borrhålens längd injekteras i en operation. Hålet borrar först till avsett djup och därefter monteras en så kallad manschett vid hållets mynning innan injekteringen påbörjas (Figur 9). Av Vattenfalls anvisningar (1968) framgår det att två förutsättningar bör uppfyllas för att injektering till fullt djup ska ge tillräckligt gott resultat. Den första förutsättningen är att berget inte är alltför otätt. Den andra förutsättningen är att de förekommande sprickorna är av ungefär samma storleksordning.

I händelse av sprickigt berg och stor spridning i sprickvidderna kommer tätningen att bli ofullständig om injekteringen utförs till fullt djup i en operation. I huvudsak beror detta på att cementbruket inte kan anpassas så att det fyller ut grova sprickor samtidigt som det tränger in i fina sprickor. Även om ett högre injekteringstryck skulle förbättra resultatet begränsas trycket av vad ytberget tål utan att lyftas.



Figur 9. Schematisk skiss över injektering till fullt djup i en operation (till vänster), våningsinjektering nedifrån och upp (mitten), samt våningsinjektering uppifrån och ned (till höger). Foto från Rosenqvist (2011).

I enstaka fall utfördes injekteringsarbetet likväl i en operation genom att ett tjockt bruk användes för att fylla ut de grova sprickorna. Borrhålet spolades därefter ur innan det under högre tryck injekterades med ett tunt bruk för att fylla ut de fina sprickorna. Svårigheten med förfarandet låg i att spola ur hålet vid rätt tidpunkt. Skedde det för tidigt spolades det tjocka bruket ut från de grova sprickorna. Skedde det för sent var det svårt att spola hålet rent och blottlägga de fina sprickorna längs borrhållsväggen. Vid sprickigt berg med stor spridning i sprickvidderna har istället våningsinjektering vanligtvis tillämpats.

### 3.3.2 Injektering i våningar (etapper)

Våningsinjektering innebär att berget injekteras i etapper. Injekteringen påbörjas antingen vid bergets yta eller vid det största tänkta injekteringsdjupet. Våningsinjektering är särskilt lämpligt att tillgripa vid berg av varierande beskaffenhet. Nivåinjektering är en annan förekommande benämning på våningsinjektering.

Enligt Vattenfalls anvisningar (1968) är det nödvändigt att injektera berget i flera etapper när höga krav ställs på bergets täthet eller bärighet. Genom vattenförlustmätningar innan injekteringen kan berget karaktäriseras med avseende på bland annat dess vattengenomsläpplighet, vilken styrs av mängden sprickor och deras mäktighet. Våningsindelningen anpassas efter resultaten så att genomsläppliga respektive täta partier injekteras var för sig. Bergets beskaffenhet i kombination med våningsdjupet styr därefter valet av cementbruk och injekteringstryck.

I följande stycken beskrivs tillvägagångssätt, samt för- och nackdelar med injektering i våningar nedifrån och upp respektive uppifrån och ned.

#### Injektering i våningar nedifrån och upp

Bortsett från injektering till fullt djup i en operation är injektering i våningar nedifrån och upp det mest kostnadseffektiva alternativet. Av Vattenfalls anvisningar (1988) framgår det att den avgörande förutsättningen för injektering i våningar nedifrån och upp är att berget saknar större förbindelser i vertikalled. Detta kan förklaras av att cementbruket annars pressas uppåt i berget och riskerar försvåra injekteringen av övriga våningar.

Vid injektering i våningar nedifrån och upp inleds arbetet med att hålen borrar till fullt djup. Därefter utförs vattenförlustmätning. De olika våningarna stängs sedan av med manschetter på förutbestämda nivåer. Manschetterna står för tätning mot borrhålets väggar. Till sist injekteras berget med det bruk och det tryck som valts utifrån bergets beskaffenhet vid nivån för aktuell våning. Därefter flyttas manschetterna upp till nästa våning och processen upprepas (Figur 9).

I Vattenfalls anvisningar (1968) beskrivs de praktiska problem som kan uppstå vid injektering i våningar nedifrån och upp. Stora problem kan uppstå om berget är så pass skadat att det lätt uppstår ras i borrhålen. Nedrasat berg försvårar nämligen nedförandet och uppdragandet av manschetterna. I värsta fall kan manschetten fastna i hålet och ett nytt hål behöva borrar. Dessa problem kan förhållandevis enkelt övervinnas genom injektering i våningar uppifrån och ned.

### Injektering i våningar uppifrån och ned

I Vattenfalls anvisningar (1968) står det att injektering i våningar uppifrån och ned är den säkraste och mest effektiva tekniken för injektering av sprickigt och dåligt berg. Indelningen i våningar avgörs vanligtvis utifrån undersökningsborrningar och vattenförlustmätningar. Cementbruk och injekteringstryck väljs efter dessa resultat. Vid injektering i våningar uppifrån och ned kan borrningen enkelt avbrytas ifall en dålig zon påträffas, vilken kräver särskild hantering.

Ett vanligt tillvägagångssätt vid injektering uppifrån och ned är att hålet borrar till ett förutbestämt djup varefter injekteringen utförs. Vanliga våningshöjder är 3 m nära bergytan och 6 m eller därutöver på större djup. Därefter injekteras hålet. Efter viss tid spolås hålet rent eller borrar upp på nytt innan arbetet med nästa våning tar vid. På detta sätt sker borrning och injektering växelvis (Figur 9).

En fördel med injektering i våningar uppifrån och ned är att berget stabiliseras i takt med att arbetet når allt större djup. Risken för att bergmassor ska rasa ned i hålet och försvåra borrning eller montage av manschetter elimineras nästan helt och hållet till följd av att ovanförliggande våningar redan injekterats. En annan fördel med tekniken är om manschetterna hela tiden monteras nära bergets yta. Det normalt sett mer sprickiga ytberget genomgår därmed upprepade injekteringar med allt högre tryck och tunnare bruk.

En nackdel med injektering i våningar uppifrån och ned är att genomförandet är jämförelsevis mer tids- och resurskrävande än de andra teknikerna. Ytterligare en nackdel är att borrningen riskerar att störa hårdnandet av det nyligen injekterade cementbruket. Vilka egenskaper det hårdnade bruket får beror dels på hur det sammansätts och dels på omständigheterna under och efter injekteringen.

### **3.4 CEMENTBRUK**

Förekommande krav på cementbruk för tätning och/eller förstärkning av berget i samband med dammbyggen är att bruket ska ha god förmåga att tränga in i och fylla ut sprickor och håligheter samtidigt som det förväntas ha god beständighet. Eriksson och Stille (2005) anger även att bruket ska ha god förmåga att sprida sig i sprickorna. Cementbruk har traditionellt sammansatts av cement och vatten, även om kemiska tillsatsmedel och stabiliserande respektive utfyllande tillsatser har kommit till användning vid behov.

Cementbrukets egenskaper styrs av ett flertal olika parametrar. Några exempel på dessa parametrar är cementsort, största kornstorlek, tillsatser och vattencementtal. Hansson (1994) anger att en gammal tumregel vid injekteringsarbeten innebär att sprickor finare än tre gånger cementets maximala kornstorlek inte går att injektera. Som en följd av att många äldre cementsorter maldes med kornstorlekar upp till 0,1 mm krävdes det ofta sprickvidder mellan 0,3 och 0,5 mm för att erhålla god inträngning i bergsprickorna.

Eriksson och Stille (2005) lyfter fram att cementbrukets egenskaper också påverkas av naturliga variationer i materialet, samt yttre omständigheter såsom temperatur, cementets ålder, injekteringstryck och blandningsutrustningens typ och skick. I följande avsnitt beskrivs i korta ordalag den historiska sammansättningen och

proportioneringen av cementbruk med avseende på cement, tillsatsmedel, tillsatsmaterial och vattencementtal.

#### 3.4.1 Cement

Cement är som bekant ett hydrauliskt bindemedel vilket hårdnar i kontakt med vatten och bildar en hållfast massa. Reaktionen sker i luft såväl som vatten. Den hårda massan kallas vanligtvis cementpasta. Under den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden användes det huvudsakligen tre cementsorter vid injektering. Till dessa sorter räknas snabbt hårdnande cement, standardcement och slaggcement. Särskilt framtagna cementsorter för injekteringsändamål saknades vid tiden.

En fjärde cementsort som bör nämnas i ett vattenkraftssammanhang är långsamt hårdnande cement (LH-cement). Cementsorten stod för större delen av cementförbrukningen vid landets kraftverksbyggen mellan 1950 och 1980. LH-cement lämpade sig inte särskilt väl för injektering eftersom cementet var grovmalet. Mellan 1932 och 1979 varierade malningsgraden mellan 180 och 280 m<sup>2</sup>/kg.

Nedan beskrivs i korta ordalag de tre mest använda cementsorterna för injektering i berg vid dammbyggen. En utförligare beskrivning av de cementsorter som fanns tillgängliga under den svenska vattenkraftsutbyggnaden finns i Rosenqvist (2018).

Snabbt hårdnande cement var ett portlandcement som maldes till betydligt högre finhet jämfört med standardcement. Snabbcement var därför särskilt lämpligt för injektering eftersom det hade bättre inträngningsförmåga tack vare dess mindre maximala kornstorlek. I Vattenfalls handbok för betongkontroll framhöll Lalin (1942) att endast mycket finkorniga cementsorter användes vid injektering och helst i kombination med det mineraliska materialet kiselgur (se avsnitt 3.4.2).

Under stora delar av tiden för vattenkraftsutbyggnaden ställdes det ett krav i de nationella cementbestämmelserna att snabbcementets bindetid skulle ligga inom intervallet 45 minuter och 6 timmar. I praktiken låg cementets bindetid ofta nära det nedre gränsvärdet. Hållfasthetstillväxten för snabbcement var generellt sett snabb och bruket uppnådde hög hållfasthet på kort tid.

Vid injektering med bruk baserat på snabbcement förekom det att brukets bindetid förlängdes med hjälp av retarderande tillsatsmedel. Detta var fallet sommartid när injekteringen behövde utföras vid varm väderlek. Tack vare tillsatsen erhöles ett cementbruk med god inträngningsförmåga och lång bindetid.

Snabbcement framställdes vid cementfabrikerna i Hällekis, Limhamn, Skövde och Öland. Mot slutet av vattenkraftsutbyggnaden hade tillverkningen koncentrerats till fabrikerna i Limhamn och Skövde eftersom de lämpligaste råvarorna fanns där. Till vilken malningsgrad snabbcementen maldes har ej gått att fastställa. Snabbt hårdnande cement Skövde framställs år 2019 med malningsgraden 550 m<sup>2</sup>/kg.

Standardcement var ett rent portlandcement som användes till de flesta typer av byggnadsarbeten. Under vattenkraftsutbyggnaden ställdes kravet i de nationella cementbestämmelserna att cementets bindetid skulle ligga inom intervallet 1 till 6 timmar. På grund av att standardcement var ett förhållandevis grovmalet cement användes det mestadels vid injektering när det inte ställdes särskilt höga krav på

brukets inträngningsförmåga. Standardcement framställdes vid samtliga i landet verksamma cementfabriker. Malningsgraden för standardcementet låg troligtvis inom intervallet 250 till 400 m<sup>2</sup>/kg, vilket ska jämföras med anläggningscement som år 2017 hade en malningsgrad mellan 310 och 330 m<sup>2</sup>/kg.

Slaggcement är ett portlandcement som sammalts med granulerad masugnsslagg. I Sverige framställdes det ett slaggcement under varumärket Vulkacement mellan åren 1954 och 1972. Slaggcementet användes för injektering i berg i samband med ett flertal dammbyggen. Cementets slagghalt varierade mellan 25 och 50 %, där det lägre värdet gällde vintertid och det högre värdet sommartid. Slaggen levererades från Domnarvet till cementfabriken för sammalning. Vulkacement framställdes vid cementfabriken i Köping och under en kortare period i Stora Vika.

Enligt de nationella cementbestämmelserna ställdes samma krav på bindetid och hållfasthetstillväxt för slaggcement som det gjordes för standardcement. Trots att slaggcementet maldes något finare än standardcementet förblev bindetiden lång. Den långa bindetiden i kombination med god inträngningsförmåga för bruket medförde att slaggcement ansågs lämpligt att använda vid injektering.

#### 3.4.2 Tillsatsmaterial

Olika sorters finmalda material tillsattes emellanåt i cementbruket för att ändra dess egenskaper. Vid dammbyggen var det främsta syftet att förbättra brukets förmåga att fylla ut håligheter och sprickor eller att minska risken för separation (se avsnitt 4.1.1). I Vattenfalls handbok för betongkontroll uppger Lalin (1942) att det dittills hade varit vanligt att tillsätta kiselgur i cementbruket för att reducera risken för separation. För beskrivning av kiselgur hänvisas till Rosenqvist (2018).

I Vattenfalls anvisningar (1968) framgår det att tillsatsmaterial även nyttjades för att minska cementförbrukningen. Dessa tillsatsmaterial kunde bestå av finsand, filler eller vanlig lera. Tillsatsmaterialen fungerade dock inte enbart som ett utfyllnadsmaterial, utan bidrog även till en reduktion av cementbrukets benägenhet till krympning (se avsnitt 4.1.2).

En annan anledning till att använda tillsatsmaterial var att öka brukets förmåga att tätta vattenförande sprickor. I Vattenfalls anvisningar (1968) rekommenderades det att blanda in bentonitlera i bruket för att öka dess förmåga att motstå urspolning. Bentonitleran sväller dessutom vid vattenupptagning, vilket ökar cementbrukets möjligheter att täppa igen och tätta vattnets läckvägar i berget. Tillsats om endast någon eller några procent av cementets vikt bedömdes vara tillräckligt för att förbättra brukets stabilitet och minska dess benägenhet till separation.

Ytterligare två exempel på tillsatsmaterial som nämndes i Vattenfalls anvisningar (1968) var sågspån och pappersmassa. Syftet med användning av dessa material var att täppa igen läckvägar så att vattenflödet minskade och det tätande bruket kunde hårdna utan att spolats bort. Inblandning av tillsatsmaterialen försämrade brukets pumpbarhet och inträngningsförmåga, varför de inte användes i normala fall. Mot slutet av vattenkraftsutbyggnaden ökade istället inblandningen av kemiska tillsatsmedel för att ändra brukets egenskaper.

### 3.4.3 Tillsatsmedel

Inblandning av kemiska tillsatsmedel är en annan vanligt förekommande metod för att modifiera ett cementbruks egenskaper. Tillsatsmedel används ofta för att ändra brukets bindetid eller konsistens i syfte att gör det mer lättflytande under begränsad tid. Av Vattenfalls anvisningar (1968) framgår det att tillsatsmedel som användes i injekteringssammanhang var av typen accelererande, retarderande eller konsistensförbättrande. Det framhölls dock att under normala förhållanden skulle tillräckligt goda injekteringsresultat uppnås utan tillsats av kemiska tillsatsmedel.

Accelererande tillsatsmedel används när det är önskvärt att cementbruket snabbt ska hårdna och erhålla hög hållfasthet. Injektering vid kall väderlek är ett annat tillfälle då en accelerator används för att undvika fördröjt hårdnande av bruket.

Kalciumklorid ( $\text{CaCl}_2$ ) var under lång tid den mest använda acceleratoren då den är billig och dessutom effektiv redan vid måttlig dosering. Under den senare delen av vattenkraftsutbyggnaden uppmärksammades det att tillsättning av kalciumklorid kunde orsaka korrosion på betongens armeringsjärn, varför en övergång till andra typer av tillsatsmedel inleddes. Det kan dock inte uteslutas att kalciumklorid även fortsättningsvis användes vid injektering i berg.

Retarderande tillsatsmedel används när cementbrukets bindetid behöver förlängas utan att långtidsegenskaperna ändras. Framförallt användes retarderande medel vid varm väderlek eller när situationen krävde att bruket skulle vara injekterbart under längre tid än normalt. Retarderande tillsatsmedel som användes vid tiden för den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden framställdes ofta av lignin.

Konsistensförbättrande tillsatsmedel avser vanligtvis sådana medel som förbättrar cementbrukets stabilitet eller minskar behovet av vatten. I det förra fallet reduceras risken för separation i bruket och i det senare fallet förbättras brukets kvalitet och beständighet genom att vattencementtalet kan sänkas. Dessa medel kallas ofta för flyttillsats eller vattenreducerare till följd av att de förbättrar brukets reologi (flytegenskaper). Fagerlund (1992) varnar dock för att vissa konsistensförbättrande tillsatsmedel kan leda till förlängd bindetid i bruket, vilket betyder att de också tillför retarderande effekter.

### 3.4.4 Vattencementtal

Proportionen mellan vatten och cement, det vill säga vattencementtalet (vct), har stor betydelse för cementbrukets egenskaper i färskt respektive hårdnat tillstånd. Vattencementtalet påverkar i brukets färsk tillstånd främst dess arbetbarhet och stabilitet. Med arbetbarheten avses framförallt cementbrukets flytegenskaper och inträngningsförmåga. Dessa egenskaper påverkar i sin tur brukets pumpbarhet och potential att fylla ut förekommande sprickor och håligheter. Med stabilitet avses brukets tendens till separation, vilket påverkar benägenheten hos cementkornen att sedimentera och konsolidera.

I cementbrukets hårda tillstånd påverkar vattencementtalet framförallt egenskaper såsom hållfasthet, täthet och beständighet. Generellt resulterar låga vct i bruk med hög täthet och god beständighet medan höga vct leder till motsatsen. Till följd av att höga vct underlättar cementbrukets inträngning i fina sprickor uppstår därför

ett motsatsförhållande när god inträngningsförmåga sker på bekostnad av god täthet och beständighet.

Ovanstående motsatsförhållande har hanterats genom att använda cementbruk med olika vct. Vid injektering i berg var det vanligt att arbetet inleddes med ett lättflytande bruk (högt vct) för att fylla de finaste sprickorna. Sedan sänktes vct successivt så att injekteringen i slutfasen utfördes med ett tjockt bruk. Genom detta förfarande pressades det tunna bruket längre in i de fina sprickorna samtidigt som de grövre sprickorna fylldes med tjockt bruk.

I Vattenfalls anvisningar (1968) anges det att cementbrukets vct varierades med hänsyn till bergssprickornas genomsläpplighet. Detta medförde att brukets vct kunde vara upp till "5 à 10" i tunna blandningar och ned till "0,3 à 0,5" i tjocka blandningar. Enligt Lalin (1942) var utgångspunkten ett vattencementtal runt 1,0 vid proportionering av bruk för injekteringsändamål under 1930- och 1940-talet.

För att sätta ovan omnämnda värden i ett perspektiv visade Powers m.fl. (1954) att vid vct överstigande cirka 0,7 bildas det ett sammanhängande system av kapillärporer i cementpastan. Höga vct möjliggör därför vattentransport genom bruket. Först vid vct lägre än 0,7 uppnås sådan täthet att inga eller endast få genomgående läckvägar finns kvar. Teoretiskt kan bruk med vct lägre än 0,7 betraktas som täta. Erfarenheter har dock visat att det krävs vct nedåt 0,5–0,6 för att denna effekt ska erhållas i praktiken.

Under blandningen av ett cementbruk fylls utrymmet mellan cementkornen med vatten. I takt med att hydratationen initieras och sedan fortgår, det vill säga den kemiska reaktionen mellan cement och vatten, fylls utrymmet med hydrationsprodukter som bildas när vattnet kemiskt binds till cementet. De volymmässigt mest betydelsefulla hydrationsprodukterna som bildas i ett cementbruk är kalciumhydroxid (CH) och kalciumsilikathydrater (C-S-H).

Vid vct omkring 0,4 kommer allt utrymme mellan cementkornen teoretiskt sett att fyllas med hydrationsprodukter vid fullständig hydratation. Detta innebär grovt förenklat att vid vct högre än 0,4 kommer det att finnas kvar vattenfyllda porer i bruket, medan det vid vct lägre än 0,4 kommer att finnas kvar ohydratiserade cementkorn. Betraktat ur ett täthets- och beständighetsperspektiv är därför cementbruk med låga vct att föredra.

Vilket tidigare har påpekats resulterar låga vct i ett trögflytande bruk som är svårt att injektera. Svårigheterna med sämre flyt- och inträngningsegenskaper kan dock mildras efter tillsättning av tillsatsmedel. Hansson (1994) anger att ett cementbruk med vct 0,6 kan erhålla liknande egenskaper som ett bruk med vct 1,0 under förutsättning att flyttillsatsmedel (vattenreducerande medel) används. Utöver cementbrukets sammansättning och proportionering har även det praktiska utförandet stor betydelse för injekteringsresultat.

### 3.5 PRAKTISKT UTFÖRANDE AV INJEKTERINGSARBETEN

Arbetsgången i samband med injektering i berg inleddes vanligtvis med noggrann rensning av bergets yta. Därefter utfördes kartering av bergytan, undersökningsborrningar, vattenförlustmätningar, samt eventuell förslutning av bergytan. Efter

injekteringens genomförande utfördes kontroll av injekteringens resultat genom förnyad vattenförlustmätning. Vid behov injekterades berget på nytt tills dess att tillfredsställande resultat uppnåddes.

### 3.5.1 Förberedande bergarbeten

Innan geologisk kartering och vattenförlustmätning kunde utföras behövde friskt berg friläggas. Arbetet inleddes genom att ovanpåliggande jordlager schaktades bort. I efterföljande steg rensades bergytan från lösa och söndervittrade massor. Dessa resurskrävande och tidsödande arbetsmoment utfördes i huvudsak inte för att underlätta injekteringen, utan för att den blivande betong- eller jorddammen skulle kunna grundläggas på berg av god kvalitet.

Vid byggen av jord- och stenfyllningsdammar var det särskilt viktigt att tätjorden kunde läggas ut och anslutas till en yta av god kvalitet. Bergavjämning och betonggjutning var två metoder för att åstadkomma en lämplig yta för att säkerställa god anslutning och därmed täthet mellan jord och berg.

När en yta av någorlunda friskt och sprickfritt berg hade frilagts övergick arbetet till att jämna av bergets yta (Figur 10). Detta gällde framförallt när det var en jord- eller stenfyllningsdamm som skulle byggas. Enligt Vattenfalls anvisningar (1958) för utförande och kontroll av jorddammar skulle berget jämnas av så att ingen yta fick större lutning än 1:1. Vertikala avsatser fick förekomma så länge de var lägre än 0,5 m. I Vattenfalls anvisningar (1988) framgår det att undantag från 1958 års krav gjordes ifall sprängningsarbeten eller betonggjutningar skulle bli alltför omfattande. I exceptionella fall tilläts lutningar upp till 3:1.



Figur 10. Bortmejsling av ett utstickande bergparti för att jämna av bergytan. Foto Uniper.

När rensnings- och avjämningsarbetena hade avslutats inleddes rengöringen av bergets yta. Större sprickor spolades och blåstes rena från fyllnadsmaterial som bestod av lera, silt eller sand. Sprickorna fylldes med tjockt cementbruk. I de fina

sprickorna borstades ett tunt bruk (cementvälling) in. I sämre bergpartier fylldes gropar och skrevor med betong. När betongen hade hårdnat utfördes kontaktinjektering för att täppa igen potentiella läckningsvägar mellan berg och betong.

Vid särskilt trasiga partier med omfattande sprickbildning täcktes berget ofta med betong. I de flesta fallen gjöts en betongplatta med syftet att förstärka berget och utgöra mothåll vid djup- och ytinjektering. I Vattenfalls anvisningar (1988) står det att betongplattan vanligtvis utformades med en bredd av minst 5 m och en tjocklek mellan 0,3 och 0,5 m. I en del fall täcktes berget istället med ett lager sprutbetong.

Där det bedömdes nödvändigt kunde betongplattan göras lika bred som tätkärnan och möjligen även angränsande finfilter. Betongplattan armerades och förankrades i berget. Enligt Vattenfalls anvisningar (1968) rekommenderades det att förankring skulle ske medelst bergbultar, exempelvis ett Ø25-armeringsjärn per kvadratmeter platta. Samtidigt som dessa arbeten pågick undersöktes bergets beskaffenhet noggrant för att kunna fastställa hur det fortsatta arbetet skulle bedrivas.

### 3.5.2 Förundersökningar

I Vattenfalls anvisningar (1968) framhölls det att ingående kännedom om bergets beskaffenhet är en avgörande förutsättning för att kunna åstadkomma en tekniskt och ekonomiskt fördelaktig utformning av injekteringen. De arbetsmoment som utfördes för att kartlägga och bedöma bergets beskaffenhet benämndes vanligen förundersökningar. Två särskilt viktiga undersökningar var geologisk kartering och vattenförlustmätning.

#### Geologisk kartering

Förundersökningarna inleddes ofta med kartering av det frilagda berget. Genom att låta en geologiskt sakkunnig person studera befintliga sprickor, svaghetszoner och sprickfyllnadsmaterial erhöles en översiktlig bild av bergets karaktär. Denna kartering låg sedan till grund för den mer ingående geologiska undersökningen som vanligtvis utfördes medelst kärnborrning. Borrade undersökningshål i den geologiska undersökningen skulle i möjligaste mån placeras i linje med den planerade djupinjekteringen.

Undersökningshålen borrades ofta till minst det djup som antogs komma ifråga för injekteringen. I Vattenfalls anvisningar (1988) står det att dessa hål dessutom skulle borraras till minst halva dammhöjden. Genom att studera de upptagna borrhålen erhöles avgörande information om förekomst, riktning och utbredning av sprickor, svaghetszoner och jordfyllda slag på olika nivåer i berget. Vid kärnborrning i gott berg användes i allmänhet en borrhålsdiameter mellan 45 och 75 mm. I löst berg och svaghetszoner kunde borrhålsdiameterar upp till 150 mm förekomma.

Omfattningen av borrhänsarbetena bestämdes dels av bergets beskaffenhet och dels av dammens storlek. I Vattenfalls anvisningar (1968) rekommenderades det att vid större dammanläggningar skulle kärnborrhålen placeras med ett inbördes avstånd om 30–50 meter. För kompletterande information fick hammarborrning utföras mellan kärnborrhålen.

I Vattenfalls anvisningar (1988) rekommenderades det att vid särskilt stora projekt (höga dammar med stor magasinvolym) borde berget också undersökas från en utsprängd inspektionstunnel. Tunneln skulle placeras i dammens längdriktning strax nedströms läget för den planerade tåtkärnan. Inspektionstunneln kunde sedan även användas för injektering i berget.

#### Vattenförlustmätning

Borrhålen i den geologiska undersökningen användes också för kartläggning av bergets vattengenomsläpplighet. Medelst systematisk vatteninpressning på olika nivåer i hålen erhöles ytterligare information om bergets beskaffenhet. Genom att placera manschetter (tätning mot borrhålsväggen) vid olika djup i berget kunde vattengenomsläppligheten på dessa nivåer bestämmas.

Enligt Vattenfalls anvisningar (1968) skulle uppmätt vattenförlust redovisas med enheten Lugeon (Lu). En Lugeon definieras som en vattenförlust om 0,1 liter per minut och meter borrhål vid ett övertryck om 100 kPa. Enligt Eriksson och Stille (2005) motsvarar en Lugeon en hydraulisk konduktivitet av  $1,6 \cdot 10^{-7}$  m/s.

I Vattenfalls anvisningar (1968) står det att en hydraulisk konduktivitet av  $10^{-7}$  m/s är jämförbar med kraven som ställs på tätjorden i jord- och stenfyllningsdammar. Det bör därför vara rimligt att anta att kravet på bergets täthet valdes för att det skulle sammanfalla med kravet på tätjordens täthet. Traditionellt i Sverige har berget betraktats som "tätt" vid en vattenförlust om just 0,1 liter per minut och meter borrhål vid ett övertryck om 100 kPa, vilket motsvarar en Lugeon.

Genom att upprepa vattenförlustmätningen vid olika tryck kunde kompletterande information om bergets karaktär och eventuella sprickfyllnadsmaterials erosionskänslighet insamlas. Vattenförlustmätningar kunde även ge en uppfattning om vilka tryck berget tålde utan att lyftas och brytas sönder.

I Vattenfalls anvisningar (1988) återges vanligt förekommande begränsningar av trycket vid vattenförlustmätning. I hål ned till 4 m djup under ytan begränsades vattentrycket (utöver grundvattentrycket) till högst 200 kPa. I djupare hål fick trycket ökas med ytterligare 50 kPa för varje meter som den övre manschetten placerades under ytan. Ytterst var det bergets beskaffenhet som avgjorde vilka tryck som kunde ansättas vid vattenförlustmätning.

#### 3.5.3 Injektering

Detaljutförandet vid injektering i berg anpassades vanligtvis efter bergets lokala beskaffenhet och dammkonstruktionens planerade utformning. Under blivande jord- och stenfyllningsdammar utfördes djupinjektering och ytinjektering innan jordmassorna började läggas ut. För betongkonstruktioner var det istället vanligt att gjutningarna fullbordades innan djupinjekteringen utfördes. Det var däremot av praktiska skäl lämpligt att utföra ytinjektering innan betongarbetena inleddes. Injektering utfördes ofta med målet att en täthet i berget om 1 Lu skulle uppnås. Innan injekteringsarbetet kunde påbörjas behövde hål borrar och rensas.

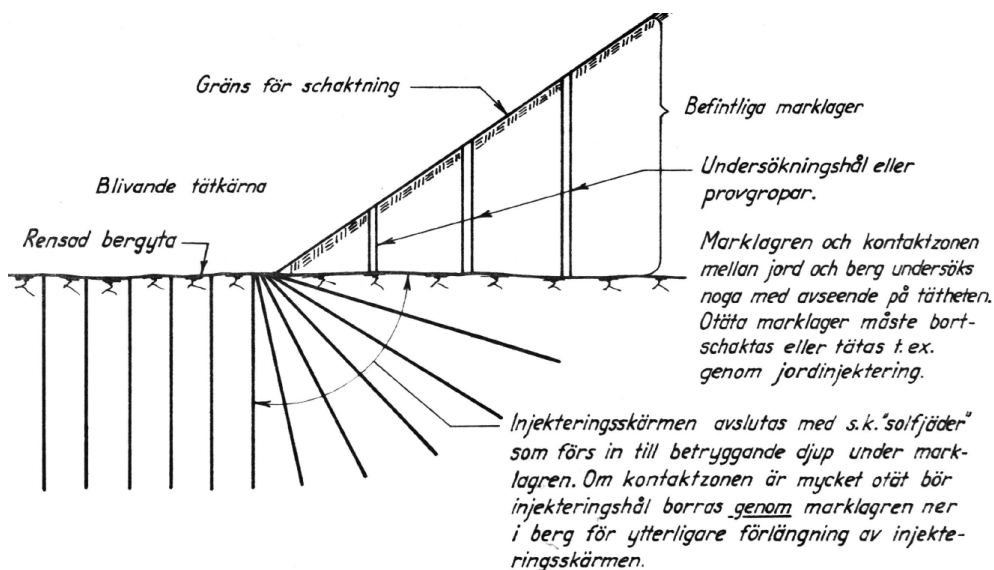
#### Borrning och rensning

Med utgångspunkt i de genomförda förundersökningarna fastställdes borrhålens position, djup och riktning. Viktigt var att hålen i så stor utsträckning som möjligt korsade förekommande sprickor och slag för att underlätta brukets spridning och därmed maximera nyttan av injekteringen. Detta krävde ibland snedställning av borrhålet (Figur 11). Borrhålens storlek valdes ofta inom intervallet 34 till 56 mm.



Figur 11. Bergborrning vid ett dammbygge. Observera snedställning av borrhålet. Foto Uniper.

Ett flertal jord- och stenfyllningsdammar har grundlagts på berg utmed en del av dammen och på befintliga jordlager utmed resterande del. Övergångszonen, där tätjordens grundläggning går från berg till jord, kräver särskild uppmärksamhet för att uppnå god täthet i berget, i befintliga jordlager och i kontaktzonen mellan berg och jord. I Vattenfalls anvisningar (1968) påtalas det att injekteringen inte får avslutas abrupt eftersom det ökar risken för erosion i övergångszonen till följd av ogynnsamma strömningskoncentrationer. Det rekommenderades att tätskärmen skulle föras in under, och vid behov in i, befintliga jordlager (Figur 12).



Figur 12. Injekteringsskärmens avslutning (i form av en sofjäder) under en fyllningsdamm där tätjordens grundläggning övergår från berg till befintliga jordlager. Illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

Efter genomförd borrhning spolades hålen rena från borrhax och slam (Figur 13). I berg med materialfyllda sprickor sattes hålen även under tryck för att växelvis rensas med målet att tömma sprickorna på lera, silt och sand. Ofta kombinerades vatten med tryckluft för att öka spolningens effekt.

I berg med relativt grova sprickor var det normalt enkelt att nå förbindelse mellan hålen för effektiv rensning. I berg med relativt fin sprickbildning gällde istället motsatt förhållande. Förbindelse mellan hålen kunde därför sällan upprättas. Utan rensning av mellanliggande sprickor kvarstod risken för att bergpartier mellan borrhålen blev utan cementbruk. Istället var det fyllnadsmaterial som fick berget att framstå som tätt vid vattenförlustmätning. Läckage som upptäcktes i bergets yta tätades temporärt med tråkilar, trasor eller hastigt bindande cementbruk.



Figur 13. Vattentryckning i en borrhålsrad. Foto från Vattenfalls anvisningar (1988).

Renspolning av borrhålen var i allmänhet mycket tids- och resurskrävande, men bedömdes vara en viktig förutsättning för ett lyckat injekteringsarbete. Då rikliga mängder sprickfyllnadsmaterial hade spolats ur berget var det inte ovanligt att utföra vattenförlustmätning på nytt. Detta för att undersöka ifall det planerade tillvägagångssättet för injekteringsarbetet behövde revideras eller ej.

#### Tillvägagångssätt vid injektering

Injekteringsarbetet inleddes så fort de förberedande bergarbetena och nödvändiga förundersökningarna hade fullbordats. Den information som dittills hade vunnits kring bergets beskaffenhet låg till grund för valet av injekteringsarrangemang och

injekteringsteknik. Den insamlade informationen användes även för att anpassa cementbrukets sammansättning och bedöma lämpligt injekteringstryck.

Specifika tillvägagångssätt för injekteringens utförande utvecklades i takt med att de praktiska erfarenheterna av injektering växte. Vad som framförallt påverkade valet av tillvägagångssätt var bergets beskaffenhet. Exempel på förhållanden i berget med betydelse för valet var ifall berget var fin- eller grovsprickigt, samt vilken lutning från horisontalplanet som sprickorna hade.

Enligt Vattenfalls anvisningar (1988) injekterades relativt finsprickigt berg normalt sett gruppvis. Detta tillvägagångssätt innebar att alla borrhål inom ett visst område bildade en grupp och behandlades samtidigt. En grupp bestod vanligtvis av 5–10 borrhål. Både djupinjektering och ytinjektering utfördes gruppvis. Hålen i de närliggande grupperna borrades och injekterades först sedan bruket i den föregående gruppen hade hårdnat.

I berg av sämre beskaffenhet var det vanligt att borrar och injektering utfördes med successiv hålförtätning. Injektering med successiv hålförtätning innebar att hål med förhållandevis stort inbördes avstånd injekterades innan de eventuellt mellanliggande hålen behandlades (Figur 14). Genom förnyade vattenförlustmätningar bedömdes det allteftersom arbetet fortskred ifall berget hade blivit tillräckligt tätt eller om det skulle krävas förtätning av hålen.

Särskilt i berg med grova sprickor ansågs injektering med successiv hålförtätning vara ett lämpligt tillvägagångssätt. Förtätning av hålen kunde ibland utföras både två och tre gånger innan tillräckligt hög täthet uppnåddes. Detta tillvägagångssätt tillämpades emellanåt av besparingsskäl eftersom endast så många hål behövde borrar och injekteras som krävdes för att nå erforderlig täthet. Risken vid detta tillvägagångssätt var att mellanliggande sprickor utan förbindelse med de injekterade hålen missades.

I likhet med så många andra praktiska arbeten medför också injektering i berg att ett planerat tillvägagångssätt ofta får justeras ifall svårigheter och ej förutsägbara händelser uppstår under arbetets gång. Vid dammbyggen var det inte ovanligt att tillvägagångssättet ändrades till följd av att bergets verkliga beskaffenhet skiljde sig från de antaganden som hade baserats på de genomförda förundersökningarna. Exempel på orsaker till reviderat tillvägagångssätt kunde vara att ogynnsamma sprickor eller krosszoner påträffades i bergpartier som inte hade ingått i de genomförda förundersökningarna och därför inte fångats upp.



**Figur 14.** Vid injektering där avståndet mellan manschetterna varierar kan tyda på att injekteringsarbetet utfördes medelst successiv hålförtätning. Foto Uniper.

Ändringar i arbetets tillvägagångssätt kunde exempelvis leda till att injekteringens omfattning växte, att injekteringstekniken ändrades, att injekteringshålen borrades djupare eller tätare, att nya bruksblandningar togs fram eller att injekteringstrycket justerades. Till följd av att det både är tekniskt och ekonomiskt omöjligt att i förväg bestämma bergets egenskaper i detalj observerades istället berggrundens beteende under injekteringsarbetet. Tillvägagångssättet för injekteringen ändrades ofta efter behov. Stort kunnande hos utförande personal ledde till att många svårigheter övervanns utan alltför stora kostnadsökningar eller tidsfördröjningar.

### Injekteringstryck

Trycket är en viktig parameter vid injektering till följd av att brukets inträngningsförmåga i allmänhet ökar med växande tryck. Höga tryck leder till att bruket kan pressas längre in i sprickorna och på kortare tid. Höga injekteringstryck kan också medföra att fina sprickor vidgas, vilket underlättar brukets inträngning. Det bör dock påpekas att effekten av höga tryck inte enbart är av positiv art.

Eriksson och Stille (2005) anger att vidgning i en spricka kan leda till hoptryckning i en annan spricka. Följden blir att vissa sprickor gynnas medan andra missgynnas. Effekten av injekteringen blir därför svårbedömd. Vidare kan ett högt injekteringstryck leda till att nya sprickor induceras i berget eller att bergytan lyfts. Rafi (2014) skriver att även tidigare injekterade partier i berget kan påverkas. Summerat bör trycket anpassas så att god inträngning erhålls utan att berget skadas.

Vilket tidigare har påtalats kan vattenförlustmätning ge värdefull information om bergets beskaffenhet. Baserat på dessa mätningar kan injekteringstrycket väljas så att risken för skador till följd av lyftning och sönderbrytning av berget minimeras. En tabell med riktvärden för tryck som erfarenhetsmässigt kunde ansättas utan att orsaka lyftning av berget publicerades i Vattenfalls anvisningar (1968). Riktvärden redovisas för olika djup under bergets yta för både gynnsamt och ogynnsamt berg. Ogynnsamt berg avsåg svagt berg med ogynnsam skiktning. Gynnsamt berg avsåg berg av god beskaffenhet. Dessa riktvärden presenteras i Tabell 1.

**Tabell 1. Erfarenhetsmässiga riktvärden för injekteringstryck vid olika djup i berg av olika beskaffenhet. Värden i tabellen har hämtats från Vattenfalls anvisningar (1968).**

| Injekteringsdjup<br>[m] | Ogynnsamt berg<br>[kPa] | Gynnsamt berg<br>[kPa] | Tumregel<br>[kPa] |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| 0 – 3                   | 100 – 200               | 500 – 1000             | 100 – 300         |
| 3 – 6                   | 200 – 400               | 1000 – 1500            | 300 – 600         |
| 6 – 10                  | 400 – 700               | 1500 – 2500            | 600 – 1000        |
| > 10                    | > 700                   | > 2500                 | > 1000            |

I fall när lyftning av berget bedömdes som särskilt allvarligt övervakades rörelser i berget genom installation av speciella anordningar. Rörelser upp till 0,2 à 0,3 mm betraktades som normala. Vid större rörelser reducerades injekteringstrycket.

Genom att försegla en sprickig och trasig bergyta med en armerad betongplatta eller sprutbetong kunde yt- och djupinjektering utföras vid något högre tryck än vad som annars skulle ha varit möjligt. Betongplattan skapade ett mothåll som förbättrade cementbrukets förmåga att tränga in i och fylla ut sprickorna.

I enskilda fall utfördes injektering i berget först efter att betongkonstruktionerna i dammen hade gjutits. I dessa fall berodde den ändrade arbetsordningen på att det fanns ogynnsamma skiktningar i berget som ökade risken för lyftning. Den ökade belastningen som betongkonstruktionerna medförde reducerade denna risk.

### 3.5.4 Kontroll

Kontroll av injekteringsarbetets utförande och resultat är en förutsättning för att kunna säkerställa att arbetet har utförts i enlighet med framtagna ritningar och föreskrifter, samt till rätt kvalitet. I takt med att injektering i berg tillmättes allt större betydelse för dammarnas säkerhet växte också behovet av kontroll av arbetsutförandet. En del i kontrollen var att övervaka tryck och flöde vid injekteringen. Hur det kan ha gått till i praktiken framgår av Figur 15.



Figur 15. Kontroll av tryck och flöde vid injektering eller vattenförlustmätning. Foto Uniper.

Redan i de första svenska bestämmelserna för betongarbeten, vilka gavs ut av den Svenska Teknologföreningen (1910), stod det att arbeten i betong bör övervakas av kontrollant. När den första upplagan av de statliga bestämmelserna för byggnadsverk av betong och armerad betong gavs ut av Kommunikationsdepartementet (1924) skärptes bestämmelserna för kontroll av arbetet. Under början av 1940-talet utarbetade dessutom Vattenfall och Vattenbyggnadsbyrån egna anvisningar som också föreskrev noggrann kontroll av arbetsutförandet. Anvisningarna omfattade även kontroll av injekteringsarbeten. Tidpunkten för anvisningarnas framtagning sammanföll med tidpunkten när det blev vanligt att injektera berggrunden.

Kontroll av arbetsutförande och resultat kunde exempelvis omfatta att se till att:

- Bergytan förseglades på rätt sätt inför injekteringsarbetet.
- Hålplacering, djup och lutning följde upprättad borrhplan.
- Vattenförlustmätning utfördes och protokollfördes.
- Maximala tryck inte överskreds.
- Lyftning av berget inte inträffade.
- Cementbruket blandades och hanterades korrekt.
- Injektering inte utfördes vid för låga temperaturer.
- Fastställa position för kontrollhål för vattenförlustmätning.
- Berget injekterades tills godkända resultat uppnåddes.
- Injekteringsarbetet protokollfördes vid utförandet.
- Injekteringsarbetet beskrevs i rapportform.

## 4 Injekteringens funktion och beständighet

Vid injektering i berg är cementbrukets förmåga att tränga in i och utfylla sprickor, slag och håligheter avgörande för injekteringsskärmens funktion och beständighet. Brukets färskas egenskaper har stor betydelse för hur väl bruket sprider sig i berget. De färskas egenskaperna har även inverkan på de hårda egenskaperna som bruket kommer att få. Injekteringens livslängd bestäms i sin tur av vilken beständighet cementbruket har gentemot de i berget rådande fysikaliska, kemiska och mekaniska nedbrytningsprocesserna.

### 4.1 CEMENTBRUKETS EGENSKAPER

#### 4.1.1 Färskas egenskaper

De flesta cementbruk som användes vid injektering i samband med dammbyggen sammansattes endast av cement och vatten, även om tillsatsmaterial och kemiska tillsatsmedel förekom i en del sammanhang. Ett cement består som bekant av små malda korn som inte löser sig vid blandning i vatten. Cementkornen hålls istället svävande i vattnet genom deras ringa storlek i kombination med rörelser i bruket som skapas av blandnings- och omrörningsutrustningen.

Cementbrukets blandningsproportioner valdes i många fall med utgångspunkten att balansera brukets egenskaper med hänsyn till inträngningsförmåga, stabilitet och bindetid. Målsättningen var att fylla ut förekommande sprickor, slag och håligheter med ett bruk av god och jämn kvalitet.

#### Inträngningsförmåga

Cementbrukets förmåga att tränga in i fina sprickor styrs i hög grad av cementets maximala kornstorlek. Det finns dock fler parametrar med betydelse för brukets inträngningsförmåga. I en litteraturstudie sammanställd av Eriksson m.fl. (1999) står det att inträngningsförmågan också påverkas av cementsort, vattencementtal (vct), tillsatser, injekteringstryck och hur lång tid som passerat efter blandning.

Genom att variera vattencementtalet eller doseringen av flyttillsatsmedel blir det möjligt att styra brukets vätskeegenskaper. Hansson (1994) framhåller att brukets vätskeegenskaper i form av flytgräns och viskositet har stor betydelse för hur långt in i en spricka bruket kan tränga och med vilken hastighet det sker. I avsnitt 3.4.4 beskrevs det hur brukets vattencementtal justerades för att erhålla önskade vätskeegenskaper och därmed avsedd inträngning i berget.

#### Stabilitet

Med stabilitet avses cementbrukets förmåga att motstå vattenseparation. Enligt Eriksson och Stille (2005) orsakas separation av sedimentation och konsolidering. Sedimentation innebär att cementkorn utan inbördes kontakt faller nedåt till följd av gravitation. Resultatet blir att blandningsvatten anrikas vid brukets yta, vilket innebär att en del av en spricka eller hålighet fylls med vatten istället för cementbruk. Längs denna kvarvarande spalt kan vatten även fortsättningsvis flöda. Bruk med höga vct eller grovmalda cementsorter löper förhöjd risk för sedimentation.

Konsolidering innebär istället att cementkorn i kontakt med varandra pressas ihop av sin egenvikt. Resultatet blir att en del av vattnet pressas ut ur cementbruket och ansamlas vid ytan. Risken för sedimentation och konsolidering växer med ökande vattencementtal. Risken för separation ökar även med tiden som bruket är stillastående i berget innan cementkornen fixeras genom brukets hårdnande.

#### Bindetid

Med bindetid avses tidsrymden mellan blandningstillfället och tidpunkten då cement-brukets hårdnande initieras och cementkornen fixeras i sina lägen. Lång bindetid kan därför innebära att det hinner passera en del tid innan bruket börjar hårdna i sprickan eller håligheten. Det finns under denna tid en risk för att bruket späds ut eller till och med spolats bort ifall berget är vattenförande. Kort bindetid kan istället medföra att bruket börjar hårdna innan det har trängt ut i sprickor och håligheter. Följden av detta kan bli ojämn och otillfredsställande utfyllnad av berget.

Cementbrukets bindetid varierar vanligtvis med cementets malningsgrad. Grovmalda cement tenderar att ha längre bindetid än finmalda dito. Vid injektering i berg är det viktigt att även beakta bergets temperatur då låga temperaturer ofta innebär att cementets bindetid förlängs. En vanlig tumregel är att injektering bör undvikas vid temperaturer understigande +5 °C. Brukets bindetid går dock att reglera med både accelererande och retarderande tillsatsmedel.

#### 4.1.2 Hårda egenskaper

Beträffande cementbrukets hårda egenskaper är det framförallt brukets täthet som har betydelse för injekteringens funktion över tid. Förståelse för betydelsen av hög täthet erhöles redan i slutet av 1920-talet till följd av utredningarna kring orsakerna till betongens förstörelse i kraftverk och dammar byggda under tidigt 1900-tal. Förståelsen kom också till användning när injektering i berg blev vanligt.

Vid ytinjektering med syftet att öka den spruckna bergmassans bärighet tillmätts brukets hållfasthet större betydelse än normalt. I likhet det färskas bruket avgörs det hårda brukets egenskaper i stor utsträckning av blandningsproportionerna.

#### Täthet

Cementbrukets täthet styrs i hög grad av vattencementtalet. Powers m.fl. (1954) visade att vid vct överstigande cirka 0,7 bildas ett sammanhängande system av kapillärporer i cementpastan som tillåter vatten att sippra genom. Först vid vct lägre än 0,7 finns det inga eller få sammanhängande läckvägar kvar. I realiteten uppnås denna effekt först vid vct nedåt 0,6–0,5.

Hansson (1994) anger även att vid fixt vattencementtal ger finmalda cement högre täthet än grovmalda cement då kornen kommer närmare varandra. Tätheten ökar dessutom i takt med brukets hårdnande, vilket mäts i form av hydratationsgrad.

Innan tillräckligt hög hydratationsgrad har uppnåtts i cementpastan är även bruk med vct lägre än 0,7 känsliga för genomsipprande vatten. Bruk med låga vct når dock tillräckligt hög täthet vid lägre hydratationsgrader jämfört med bruk med höga vct. I likhet med brukets bindetid påverkas hydratationshastigheten av

temperaturen. Låg temperatur ger ett långsammare hårdnande än hög temperatur. Tillsatsmedel kan nyttjas för att inledningsvis accelerera hydratationshastigheten.

Cementbrukets sammanlagda förmåga att täta berget styrs dock av brukets täthet i kombination med brukets förmåga att fylla ut sprickor, slag och håligheter. Vilket tidigare har påtalats riskerar vattenseparation att ge upphov till läckvägar ovanpå bruket. Läckvägar kan även uppstå på grund av krympning till följd av cementpastans uttorkning under brukets hårdnande. Vid uttorkningskrympning blir brukets slutliga volym något mindre än det färska brukets volym.

Risken för krympning i cementbruk med höga vct är dock liten eftersom närvaro av grundvatten i berget förhindrar uttorkning. I bruk med låga vct kan däremot kemisk bindning av blandningsvattnet leda till inre uttorkning som orsakar viss krympning. Vatten som binds kemiskt till cementet i hydratationsprocessen kan inte ersättas av nytt vatten från omgivande grundvatten om bruket blir för tätt.

Effekten av cementbrukets krympning i fina sprickor har förhållandevis liten inverkan på injekteringens sammanlagda täthet. Effekten av krympning kan däremot bli märkbar vid utfyllnad av större håligheter i berget.

#### Hållfasthet

Cementbrukets hållfasthet är vanligtvis av underordnad betydelse för tätning av berget under dammkonstruktioner. Brukets hållfasthet kan dock vara av central betydelse när injekteringens syfte är att öka den spruckna bergmassans bärighet när det bedöms vara alltför dyrt och resurskrävande att avlägsna bergmassorna.

Vattencementtalet är direkt avgörande för cementbrukets hållfasthet. Vanligtvis erhålls högre hållfasthet ju lägre vattencementtalet är. Att erhålla bruk med hög hållfasthet är viktigt vid ytinjektering (avsnitt 3.2.2) och särskilt viktigt vid klackinjektering (avsnitt 3.2.4). I likhet med tätheten styrs tillväxten av hållfasthet av omgivande temperatur. Låg temperatur ger låg hållfasthetstillväxt.

## **4.2 NEDBRYTNINGSPROCESSER**

Vilket tidigare påtalats bestod de cementbruk som användes vid injektering i berg inför dammbyggen vanligtvis av cement och vatten, även om olika tillsatsmaterial och tillsatsmedel användes när brukets egenskaper behövde anpassas efter lokala förutsättningar. Över tid utsätts dock cementbruket ofrånkomligen av fysikaliska, kemiska och mekaniska påfrestningar, vilka samtliga leder till gradvis försämring av injekteringens tillstånd och funktion.

Det är idag inte möjligt att avgöra vilken teknisk livslängd som cementbruket i en specifik injekteringsskärm kan tillskrivas. Den huvudsakliga orsaken till denna oförmåga är den stora mängden av svårbedömda parametrar som bidrar till frågeställningens komplexitet.

Bristande beständighet hos injekteringsskärmar har över tid rapporterats från flera länder. I en studie publicerad av ICOLD (2000) har de vanligaste orsakerna till bristande beständighet hos injekteringen sammanställts. Dessa orsaker är:

- Felaktiga eller bristfälliga material respektive tekniker i samband med injekteringens utförande.
- Erosion och upplösning av injekteringsmedlet till följd av läckande vatten.
- Närvaro av kemiskt aggressivt vatten.
- Påkänningar och deformationer i berggrunden som leder till rörelser i bergssprickor eller uppkomsten av nya sprickor.

Cementbrukets sammansättning och proportionering, injekteringens utförande, samt förekommande påfrestningar i och på berget är alltså förutsättningar som styr injekteringens livslängd. Dessa förutsättningar kan sedan brytas ned till ett stort antal parametrar, där betydelsen av var och en är svår att kvantifiera, men som behöver bestämmas för att kunna bedöma injekteringsskärmens livslängd.

Det är av uppenbara skäl omöjligt att idag avgöra ifall injekteringen utfördes med fullgott resultat eller ifall resultatet blev otillfredsställande. Vidare är det svårt att avgöra ifall förändringar, i form av vidgning av befintliga sprickor eller tillkomst av nya sprickor, inträffat i berggrunden efter injekteringens utförande. Vad som däremot är känt idag är att det injekterade cementbruket har och även framledes kommer att utsättas för fysikaliska, kemiska och mekaniska påfrestningar, vilka samtliga leder till nedbrytning av bruket. I följande avsnitt kommer tänkbara nedbrytningsscenarier att beskrivas i korta ordalag.

#### 4.2.1 Fysikalisk nedbrytning

Vad som normalt avses med fysikalisk nedbrytning är förändringar i ett material som uppkommer till följd av exponering av solljus, värme och fukt som exempel. Fysikalisk nedbrytning av cementbruk resulterar vanligen i förändrade material-egenskaper, såsom förlust av hållfasthet och styvhet, samt försämrad täthet.

Cementbruket i en injekteringsskärm är känsligt för fysikalisk nedbrytning innan berget har täckts av dammkroppen. Om det injekterade berget ligger oskyddat för väder och vind under vintern innan betong- eller jordarbetena inleds kan bruket i bergets ytskikt utsättas för frysning och ådra sig frostsador.

Cementbruk med höga vattencementtal innehåller avsevärt mycket mer vatten än vad som binds kemiskt till cementet i de hydratationsprocesser som karaktäriserar brukets hårdnande (avsnitt 3.4.4). Det överblivna vattnet bildar porer som förblir vattenfyllda om bruket ej kan torka ut, vilket sällan bör vara fallet i berggrunden. Nederbörd på bergytan medför dessutom att brukets fukttinhåll förblir högt.

Det är rimligt att anta att frysning av marken kommer att inträffa vid något tillfälle under en normal vinter i Sverige. Ju kallare det är och ju längre frysperioden varar, desto djupare ned i marken kommer den frysta zonen att nå. Vid fasomvandlingen från vatten till is uppstår en volymexpansion om drygt 9 %. Om expansionen inte sker fritt är risken stor att spräckning inträffar i det omgivande materialet.

I mitten av 1940-talet publicerade Powers (1945) sin hypotes om att den volym-mässiga expansionen som inträffar vid vattnets fasomvandling leder till att det återstående ofrusna vattnet successivt trycks iväg. Ifall det inte finns tillräckligt med fritt utrymme (luft) i cementpastan för det undantryckta vattnet eller att avståndet till det fria utrymmet är för långt uppstår så höga tryck att pastans

hållfasthet överskrids och frostsgraden blir ett faktum. Under årens gång har ytterligare hypoteser för frostnedbrytning framlagts. Några av de viktigaste hypoteserna för frostskador beskrivs kortfattat av Rosenqvist (2016).

I händelse av att injekterat cementbruk utsattes för frysning kan det finnas en risk för att frostskador uppstod i byggskedet. Dessa skador bör i så fall karaktäriseras av sprickbildning där sprickorna kan bilda sammanhängande läckvägar genom injekteringen. Vid en del dammbyggen uppfördes det värmeskjul över berget, vilka skulle möjliggöra injektering av berget vintertid (Figur 16).

Eftersom risken för frostnedbrytning beror på tjäldjupet är det troligtvis framförallt ytinjektering som kan ha erhållit frostskador innan dammkroppen påfördes berget. Eventuella frostskador i det injekterade cementbruket antas vara mer eller mindre omöjliga att okulärt upptäcka vid inspektion av bergytan. Några rapporter om att frostskador skulle ha uppkommit i injekteringen har inte påträffats.



Figur 16. Insidan av ett värmeskjul som uppförts för att möjliggöra injektering vintertid. Genom uppvärmning hölls bergets temperatur på en nivå att injektering kunde utföras. Foto från Vattenfalls anvisningar (1968).

#### 4.2.2 Kemisk nedbrytning

Med kemisk nedbrytning avses i det här fallet reaktioner mellan cementbruket och andra substanser, vilka leder till förändringar i materialet. Precis som för fysikalisk nedbrytning kan dessa förändringar orsaka förlust av hållfasthet och styvhet, samt leda till försämrad täthet i bruket. Vanliga typer av kemisk nedbrytning är urlakning, sulfatangrepp och sura angrepp.

##### Urlakning

Cementbaserade material är kemiskt instabila i vatten eftersom flera av cementets beståndsdelar går i lösning vid långvarig kontakt med vatten. Om ett samtidigt flöde av vatten sker genom materialet transporteras beståndsdelarna iväg och ytterligare beståndsdelar går i lösning. Processen kallas kalkurlakning och är kontinuerlig. Urlakning leder över tid till att cementbruket bryts ned.

Det är upplösning av cementets beståndsdelar i form av hydratationsprodukterna kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) och kalciumsilikathydrater (C-S-H) som resulterar i brukets nedbrytning. Reaktionen mellan cement och vatten under cementpastans hårdnande sker vid pH-värden mellan 13 och 14. I det hårda bruket sjunker pH ned mot 12,5 och jämvikt uppstår mellan cementpastan och vattnet i porerna, vilket vanligtvis kallas porlösning. Om eventuellt genomsippande vatten kontinuerligt för med sig delar av porlösningen kommer pH att sjunka.

För att återställa jämvikten frigörs det hydroxidjoner ( $\text{OH}^-$ ) genom att kristaller av kalciumhydroxid (CH) går i lösning. Enligt Jain och Neithalath (2009) sker detta vid ett pH strax under 12,5. I takt med att allt mer CH går i lösning ökar brukets porositet och därmed även dess vattengenomsläpplighet. Urlakningsprocessen accelereras. Det bör tilläggas att kalcium- och hydroxidjoner på nytt kan bilda kalciumhydroxid om koncentrationen av jonerna i läckagevattnet blir tillräckligt hög så att pH stiger till 12,5 innan vattnet lämnar bruket. Sannolikheten är dock liten för att detta ska ske i sådan omfattning att de utfällda kalciumhydroxidkristallerna kan reducera flödet av genomsippande vatten.

Upplösning av kalciumhydroxid sker i enlighet med följande reaktion (1):



Vid en viss tidpunkt kommer all tillgänglig kalciumhydroxid att ha gått i lösning, vilket innebär att porlösningens pH börjar sjunka från 12,5. Det innebär att andra hydratationsprodukter blir kemiskt instabila och också går i lösning. När pH når ned mot 10 börjar även kalciumsilikathydraterna att gå i lösning (C-S-H). Någon enighet råder dock ej om vid vilket exakt pH som detta initieras. Reardon (1990) menar att det sker vid pH 8,8. Beddoe och Dorner (2005) framhåller att det sker vid pH 10,5. Utöver att nedbrytning av C-S-H ytterligare ökar brukets porositet försämrar dessutom brukets mekaniska egenskaper då hållfastheten sjunker.

Reaktionen för upplösning av kalciumsilikathydrater redovisas nedan (2):



Fortsatt urlakning av cementbruket leder till att porlösningens pH sjunker tills det når jämvikt med det genomläckande vattnets pH. Under förutsättning att vattnet

som pressas genom injekteringen har sitt ursprung i vattenmagasinet uppströms dammen bör vattnet ha ett pH runt 7. Bydén m.fl. (2003) anger att pH i svenska sjöar och älvar normalt varierar mellan 6 och 8. Enligt Allan och Castillo (2007) är det lösta mineraler från fält, skogar och vittrat berg, samt (surt) regn och naturligt löst koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) som styr vattnets kemiska sammansättning och pH.

Den kemiska sammansättningen i vattenmagasinen kan också variera över året. Drugge (2001) visade att exempelvis koncentrationen av lösta mineral i Lule älv tillfälligt sjönk strax efter vårens snösmältning. Generellt kan vattnet i de svenska älvarna betraktas som mjukt eftersom de låga koncentrationerna av framförallt kalcium och magnesium medför att vattnet har mycket god förmåga att laka ur cementets kalkbaserade beståndsdelar.

Med utgångspunkt i Powers m.fl. (1954) mätningar av olika cementbruks vattengenomsläpplighet (hydrauliska konduktivitet) antas det att vid vattencementtal lägre än 0,7 kommer cementpastan vara så pass tät att urlakning huvudsakligen sker längs ytor i direkt kontakt med vatten. Dessa ytor återfinns exempelvis där allt utrymme mellan cementbruket och berget ej fyllts ut eller där sprickor har uppkommit i efterhand i bruket.

Rosenqvist (2017a) visade att urlakning av ytan är en långsam process då mindre än de yttersta 10 mm av cementpastan i betong från en 55 år gammal damm hade urlakats efter kontakt med mjukt älvvatten. 10 mm är dock ett högt värde när det gäller injektering då många sprickor och slag har betydligt mindre sprickvidd. Å andra sidan är volymen av vattnet som kan komma i kontakt med cementbruket längs en spalt mellan bruk och berg betydligt mindre än motsvarande volym av vatten som skvalpar mot dammen i vattenmagasinet. Detta indikerar att takten som cementets kalk lakas ur och förs bort med är lägre i berget.

Parametrarna som styr hastigheten för cementbrukets urlakning är komplexa. De som bör nämnas är cementets respektive grundvattnets kemiska sammansättning, samt brukets porositet och vattengenomsläpplighet. Vattencementtal högre än 0,7 leder till sammanhängande porsystem som ökar vattengenomsläppligheten, vilket ökar volymen passerande vatten som kan laka ur och föra bort cementets kalk.

Enligt Boynton (1966) är kalciumhydroxid ett av få mineral med högre löslighet i vatten vid låg temperatur jämfört med hög dito. Lösligheten i vatten vid 0 °C är nästan 10 % högre än vid 20 °C. Dickson m.fl. (2004) har erhållit resultat som indikerar att också kalciumsilikathydraterna har liknande egenskaper.

Vid bergmekanikdagen 1986 presenterade Norstedt (1986) utförda undersökningar beträffande tätheten hos injekteringsskärmen under en damm i Norrland. Ett antal borrkärnor togs upp för att studera injekteringens tillstånd. Några iakttagelser med bäring på urlakning var att det förekom stora variationer i cementbrukets vattencementtal, samt att bruket delvis var urlakat. Med syftet att öka kunskapen om injekteringsskärmars beständighet undersökte Alemo m.fl. (1988) ett flertal cementbruks känslighet för urlakning. Vid undersökningen användes injekteringscement, standardcement och slaggcement.

Provkroppar tillverkades med de tre vattencementtalen 0,3, 0,4 och 0,5. Att inte provkroppar med högre vattencementtal användes berodde på svårigheten att

framställa homogent cementbruk utan effekter av separation. Provkropparna överströmmades sedan av älvvatten (pH 7,1) under åtta månaders tid. Vattnet samlades upp och analyserades med avseende på mängden urlakad kalk. De erhållna resultaten visade att bruk med slaggcement urlakades mindre jämfört med bruk av standardcement och injekteringscement.

Inverkan av brukets vattencementtal undersöktes också. Bruket med slaggcement urlakades cirka 50 % mer vid vattencementtal 0,5 än vid 0,3. Motsvarande värde för bruken med standard- respektive injekteringscement var 100 %. För bruket med slaggcement undersöktes även inverkan av vattenflödets storlek. Vid en fördubbling av flödet ökade urlakningen med cirka 65 %. En slutsats från undersökningen var att brukets vattencementtal hade större betydelse för urlakningens omfattning än cementsorten.

Att bruket med slaggcement presterade bättre än bruken med rent portlandcement kan ha sin förklaring i att slaggcement framställs genom att portlandcement mals samman med granulerad masugnsslagg från stålindustrin. Vid cementets reaktion med vatten konsumerar slaggpartiklarna delar av kalciumhydroxiden som annars skulle finnas i cementpastan. Istället bildas det ytterligare kalciumsilikathydrater. Eftersom kalciumsilikathydraterna blir kemiskt instabila först vid pH nedåt 10 får slaggcementpastan bättre förmåga att motstå urlakning i älvvatten (pH 7). Detta i jämförelse med cementpastan efter ett standardcement där en större andel av hydrationsprodukterna (CH) blir kemiskt instabila redan vid pH 12,5.

Slaggcementets bättre förmåga att motstå urlakning framgår med all tydlighet av de utförda undersökningarna under ledning av Alemo m.fl. (1988). Resultaten får dock inte tolkas som att cementbruk baserade på slaggcement nödvändigtvis kommer att prestera bättre även i det långa loppet i en injekteringsskärm.

De genomförda undersökningarna pågick endast under en förhållandevis kort tid om cirka åtta månader. Cementbruken i befintliga injekteringsskärmar utsätts för genomläckande vatten under åtskilliga decennier. Cementpastan som har bildats av använda cementsorter består huvudsakligen av kalciumhydroxid och kalciumsilikathydrater, vilka är kemiskt instabila vid pH 7. Dessa cementbruk riskerar att lösas upp med tiden och lakas ur till följd av att vatten med pH omkring 7 pressas ned i berget och genom injekteringsskärmen.

Beträffande de (ibland armerade) betongplattor, som berget kunde täckas med när särskilt trasiga partier med omfattande sprickbildning påträffades, gäller att de bör ha gjutits med betong av hög kvalitet givet att dammen byggdes på 1930-talet eller senare. Rosenqvist (2018) skriver att förståelsen för vikten av att framställa betong med hög kvalitet erhöles i slutet av 1920-talet. Urlakning av betong av god kvalitet sker därför huvudsakligen utmed konstruktionens ytor eller längs med väggarna i eventuellt förekommande sprickor. Någon hastig nedbrytning av dessa betongplattor till följd av urlakning anses vara mindre sannolik.

När sprutbetong användes för bergets ytförsegling kan situationen se annorlunda ut. Detta beror huvudsakligen på att det är praktiskt svårt att belägga horisontella eller svagt lutande ytor med sprutbetong av god och jämn kvalitet. Det finns alltid en risk att återstudsat material kan hamna under sprutbetongen och ge upphov till områden där avsaknad av vidhäftning råder mellan berg och sprutbetong.

Längs dessa områden utan vidhäftning kan vatten sippra och orsaka urlakning av sprutbetongskiktets undersida. Eftersom urlakning är en långsam process lär det krävas stora läckageflöden under lång tid för att allvarliga urlakningsskador ska uppstå. En svårbedömd risk är ifall tjockleken på sprutbetongskiktet blev mindre än planerat. Under förutsättning att sprutbetongskiktet uppnådde rätt kvalitet är det rimligt att anta att någon hastig nedbrytning av skiktet inte anses trolig.

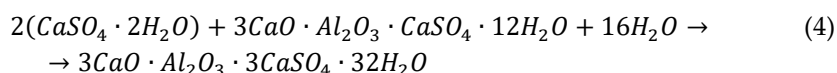
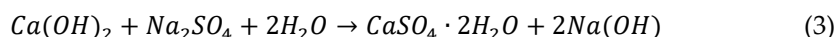
### Sulfatangrepp

Betong och cementbruk som kommer i kontakt med vattenlösliga sulfater ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) kan drabbas av hastig och kraftig nedbrytning genom volymexpansion och uppsprickning. Denna typ av nedbrytning benämns vanligtvis sulfatangrepp. Enligt Fagerlund (2012) orsakas nedbrytningen av att i vatten lösta sulfat- eller sulfidhaltiga ämnen tränger in i materialet.

I vattenkraftssammanhang kan sådana ämnen härstamma från vittrande bergarter som bland annat förekommer längs fjällkedjan. Förekomsten av magnesium- och/eller ammoniumjoner kan ytterligare accelerera ett eventuellt nedbrytningsförlopp.

Förstörelsemekanismen vid sulfatangrepp är inte klarlagd, men de inträngande sulfaterna anses dels reagera med cementpastans kalciumhydroxid och dels med monosulfater bildade av klinkermineralet kalciumaluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) vid cementets hydratation. Vid reaktion mellan sulfaterna och kalciumhydroxiden bildas gips.

När gipsen reagerar med monosulfaterna bildas mineralet ettringit. Vid reaktionen binds stora mängder vatten, vilket leder till mycket stor volymökning. Nedan visas reaktionerna mellan kalciumhydroxid och sulfater (3) respektive gips och monosulfater (4). Natriumsulfat utgör endast ett exempel på ett sulfathaltigt ämne.



Bogdanoff (2013) skriver att den volymexpansion som uppstår till följd av sulfatangrepp skulle kunna leda till att fina sprickor och spalter täpps till. Det går dock att ifrågasätta om scenariot ens är möjligt i en injekteringsskärm då cementbruket innan angreppets start varit så otätt att sulfater antingen har trängt genom bruket eller sipprat längs en eventuellt vattenförande spalt mellan bruk och berg. Båda fallen betyder att förhållandevis stora volymer vatten passerar bruket och bör därför även orsaka urlakning.

Till följd av att kalciumhydroxid konsumeras under sulfatangreppet uppstår risk att porlösningens pH börjar sjunka, vilket resulterar i att både monosulfater och ettringit kan bli kemiskt instabila. Enligt Faucon m.fl. (1996) går monosulfater i lösning vid ett pH under 12,5. Reardon (1990) och Myneni m.fl. (1998) anger att ettringit går i lösning vid pH 10,6–10,7. I likhet med kalciumhydroxid är det inte ovanligt att ettringit kan fällas ut på nytt på platser där porlösningens pH är högre. Sannolikheten är dock låg att den utfällda ettringiten kan reducera vattenläckaget.

Risken för sulfatangrepp är som högst i portlandcement med förhållandevis stort innehåll av klinkermineralet kalciumaluminat ( $C_3A$ ). Bland dessa cement återfinns flera av de standardcement och snabbt hårdnande cement som användes under utbyggnaden av vattenkraften. Enligt Fagerlund (1992) anses slaggcement med högt innehåll av slagg bli sulfatresistent då stora delar av kalciumhydroxiden förbrukas under hydratationsprocessen. Dessutom blir cementpastan avsevärt tätare i ett slaggcement, vilket försvårar inträngningen av sulfater.

Gällande gjutna betongplattor, som berget vid behov förseglades med, styrs risken för sulfatangrepp huvudsakligen av den använda cementsorten. Risken för sulfatangrepp där sulfat- och sulfidhaltiga ämnen finns lösta i grundvattnet växer när betong med standardcement användes istället för betong med slaggcement eller långsamt hårdnande cement. Likaså ökar risken med betong av låg kvalitet där sulfater enkelt tränger in i materialet. Betong av god kvalitet och hög täthet har framställts sedan slutet av 1920-talet. Sådan betong bör försvåra ett eventuellt sulfatangrepp då mindre mängder av sulfationer kan tränga in i betongen.

När sprutbetong användes för bergets ytförsegling beror risken för sulfatangrepp dels på den cementsort som användes och dels på sprutbetongens kvalitet. Ifall otillfredsställande kvalitet erhöles på sprutbetongsskiktet i form av låg täthet kan sulfater tränga in i betongen och orsaka uppsprickning. Genomsippande vatten kan därefter accelerera nedbrytningen genom urlakning av cementets kalk.

### Sura angrepp

I vattenkraftssammanhang är det ovanligt att sura angrepp på betong och cementbruk leder till omfattande och allvarliga skador. Däremot innehåller vattnet i sjöar och älvar vanligtvis en mindre mängd löst koldioxid ( $CO_2$ ), vilken bildar kolsyra ( $H_2CO_3$ ) som i sin tur kan ge upphov till viss nedbrytning av cementpastan.

Enligt Halvorsen (1966) återfinns kolsyran i bunden, halvbunden och fri form. Den bundna formen består av karbonationer ( $CO_3^{2-}$ ), den halvbundna av vätekarbonationer ( $HCO_3^-$ ) och den fria formen utgörs av löst koldioxid ( $CO_2$ ). Vid inträngning av vatten med löst kolsyra i betongen bildas kalciumkarbonat ( $CaCO_3$ ) i cementpastan på bekostnad av kalciumhydroxid. En liknande process bör kunna ske i cementbruket i en injekteringsskärm.

Kolsyrans aggressivitet växer med minskande hårdhet i vattnet. Fagerlund (1992) skriver att trots stora mängder aggressiv kolsyra blir angreppen förhållandevis små i tät betong med låga vattencementtal. Det kan dock finnas tillfällen när sura angrepp leder till kraftig och hastig nedbrytning av cementpastan. Dessa tillfällen kan uppstå om det sker vittring eller inträffar omvandling av fyllnadsmaterial i bergssprickor. I samband med dessa processer kan sura ämnen bildas.

Norstedt (1986) rapporterade att vittring och oxidation av så kallat svartberg, vilket omfattar bland annat alunskiffer, kan leda till att det bildas svavelsyra ( $H_2SO_4$ ). Sker oxidationen på en plats att det vatten som pressas ned i berget uppströms dammen för med sig de lösta ämnena kan dessa kraftigt accelerera cementbrukets nedbrytning när de passerar genom injekteringsskärmen. Risken för denna typ av angrepp styrs av de lokala geologiska förutsättningarna.

#### 4.2.3 Mekanisk nedbrytning

Vad som avses med mekanisk nedbrytning är sådana påkänningar som påverkar berggrunden på ett sådant sätt att förutsättningarna för injekteringens funktion och beständighet försämras. Potentiellt skadliga mekaniska påkänningar kan uppstå både under byggskedet av dammen och under det senare driftskedet.

##### Byggskedet

Under tiden för bygget av en damm kan aktiviteter såsom schaktning, sprängning, borrhning och injektering påverka berget eller cementbruket i sådan utsträckning att injekteringens beständighet försämras. Bernell (1964) ger ett exempel på mätningar som utfördes efter det att hävning av bergets yta noterades i samband med bygget av en stor stenfyllningsdamm i slutet av 1950-talet. En maximal hävning om strax under 100 mm uppmättes i flera sektioner. Hur stor den totala hävningen var gick inte att avgöra eftersom det förmodades att en betydande del av hävningen hade inträffat innan de första mätningarna utfördes.

Orsakerna till hävningen bedömdes bero på en kombination av pågående tunnel-drivning och avlastning av berget när befintliga jordlager schaktades bort. Det antogs att sprängningsarbetena i tunneln hade orsakat omfördelning av bergsspänningarna medan bortförandet av det ovanpåliggande jordlagret misstänktes ha initierat svällning av sprickfyllnadsmaterial.

Hast och Nilsson (1964) kompletterade förklaringen med ett teoretiskt resonemang kring de spänningar som finns i jordskorpan. När befintliga jordlager schaktades bort reducerades den vertikala lasten på berget och rådande jämvikt rubbades. Avlastningen ledde till att de horisontella spänningarna orsakade uppressning av bergets yta. Uppressningen skulle ha fortsatt tills ett nytt jämviktsläge infunnit sig mellan bergsspänningarna och den vertikala lasten.

Hävningen av berget upphörde först när höjden på den påförda dammbyggnaden låg i nivå med det ursprungliga jordlagret. Därefter initierades en långsam sättning av berget. Bernell och Scherman (1979) rapporterade att fram till och med år 1975 hade mellan 21 och 93 % av den uppmätta hävningen gått tillbaka. Minst tillbakagång hade uppmätts i berg av god kvalitet medan störst tillbakagång hade uppmätts i berg av sämre kvalitet.

I händelse av ett scenario liknande det som beskrivs ovan kommer injekteringen av berget att utföras samtidigt som hävningen pågår. Det injekterade berget kommer sedan att fortsätta lyftas innan det börjar sätta sig på grund av påförandet av jordmassorna till dammen. Till följd av detta kan injekteringens hårdnande störas och nya sprickor uppstå i berget som då förblir utan injektering.

Risken för att befintliga sprickor vidgas eller att nya sprickor bildas beror bland annat på bergets initiala spänningstillstånd, förekomsten av svaghetszoner och krosszoner, samt de omgivande geologiska förhållandena. Vidgas en injekterad spricka medför det att en spalt kan bildas mellan cementbruket och berget. Längs denna spalt kan vatten sippa och över tid laka ur cementpastan. Sprickor tvärs dammens längdriktning skär rakt genom injekteringsskärmen och är sett till injekteringens funktion och beständighet allvarligare än parallella sprickor.

Ett nyligen injekterat cementbruk kan utsättas för skadliga vibrationer till följd av angränsande sprängnings- och borrhningsarbeten. Ahmed (2015) anger att nygjuten betong är särskilt känslig för vibrationer orsakade av sprängning. Vibrationer stör cementets hydratation och kan då resultera i betong med försämrade mekaniska egenskaper. Eftersom hydratationsprocessen är densamma i cementbruk blir därför motsvarande vibrationer också av skadlig art vid injektering.

Vibrationer som stör cementbrukets hårdnande kan också uppstå vid hammarborrning av intilliggande injekteringshål eller när injekteringen sker i våningar uppifrån och ned. Då utförs borrhningen genom det injekterade berget för att nå ned till underliggande våning. Avgörande för graden av påverkan som dessa vibrationer får på bruket är hur långt gången hydratationsprocessen är.

Betydelsen av injekteringstrycket diskuteras i Eriksson och Stille (2005). De skriver att det råder delade meningar om att injektera med höga tryck för att göra tunna sprickor injekteringsbara. Utan att definiera höga tryck finns det en risk att den vidgning som fås i en spricka eller sprickgrupp kan leda till hoptryckning av en annan spricka eller sprickgrupp. På detta sätt kan effekten av injekteringen bli ojämn. Vidare skriver Rafi och Stille (2015) att höga injekteringstryck också kan leda till lyftning av berget och att irreversibla deformationer uppkommer.

I en rapport av Rafi m.fl. (2016) jämfördes två skandinaviska injekteringsprojekt där olika injekteringstryck och bruksegenskaper användes trots likartad geologi, vilken i huvudsak bestod av hårt kristallint berg. Resultaten visade att mängden vidgade sprickor blev högre med högt injekteringstryck. Det konstaterades också att höga injekteringstryck riskerar öppna upp tidigare injekterade sprickor. Höga tryck vid injektering inför ett dammbygge kan alltså leda hävning av berget som ökar risken för att bergmassan runt injekteringsskärmen skadas, vilket kan vara särskilt allvarligt om geologin är ogynnsam med långa och horisontella sprickor.

### Driftskedet

I likhet med att påförandet av dammens tyngd kan leda till att befintliga sprickor vidgas kan detsamma ske vid pålastningen till följd av upptagning av magasinets dämning. I Vattenfall (1988) står det att under fyllningsdammar med vertikal eller brant lutande tät kärna sker spänningsändringar i berget vid dämningen. Enligt Bondarchuk (2008) deformeras också berget under dammen och magasinet av variationer i vattennivån. Även om deformationerna är i millimeterskalan kan vidgning av sprickor öka risken för urspolning av fyllnadsmaterial och tätjord.

Hast och Nilsson (1964) framförde att särskilt koncentrerade laster kan uppstå på berget vid läget för valv- och lamelldammar i betong. Vertikala rörelser av berget kan troligtvis inträffa till följd av dessa laster, vilket då kan påverka injekteringens effekt. I Casadei m.fl. (1991) presenteras ett exempel på förstärkningsåtgärder som behövde vidtas efter dämningen av en kombinerad valv- och gravitationsdamm 1985–1986. Dammens största höjd över berg är 103 m och krönlängden är 432 m.

Casadei m.fl. (1991) uppgav att det rädde komplicerade geologiska förhållanden i området omkring dammen, vilket innebar att berget hade förstärkts med ett stort antal förankringsstag i kombination med injektering. När endast några meter var kvar innan full dämning hade nåtts noterades en markant ökning av läckage och

uppträck vid dammhälen. Beteendet förklarades delvis av vidgning av befintliga sprickor trots att berggrunden hade injekterats. Vid dämningens upptagning hade endast mindre rörelser i berggrunden uppmätts. För att hantera den uppkomna situationen borrades nya dränagehål och berget injekterades på nytt.

Arbetet skedde med fullt vattenmagasin, vilket krävde noggrann övervakning av uppträck och rörelser i damm såväl som berggrund. Under genomförandet av reparationsåtgärderna tillämpades observationsmetoden för riskhanteringen (se vidare i avsnitt 6.3). Injekteringen utfördes inledningsvis med cementbruk och därefter med olika kemiska injekteringsmedel. Genom de vidtagna åtgärderna reducerades både läckage och uppträck till acceptabla nivåer.

Plichon m.fl. (1976) skrev också om en kombinerad valv- och gravitationsdamm som hade drabbats av läckage efter dämningens upptagning. Dammens största höjd över berget var 135 m och krönlängden 390 m. Vid reglering av magasinet upp till 30 m uppmättes relativa rörelser om 2–3 mm mellan damm och berg. Efterföljande undersökningar visade att läckage hade uppstått i kontaktzonen mellan berg och betong, samt i berget under dammens häl.

Flögl och Stäubli (1991) ger ett tredje exempel där läckage uppstått i berget under dammens uppströmsdel. I detta fall var det en 131 m hög valvdamm med krönlängd 725 m som drabbades av kraftiga läckage när magasinsdämningen nådde full höjd. Undersökningar visade att dragspänningar i berget hade orsakat att befintliga sprickor öppnats upp vid läget för injekteringsskärmen.

Växlande belastning på berget till följd av reglering av magasinet kan följaktligen leda till att berget lyfts och trycks tillbaka i omgångar. Även små deformationer kan medföra att sprickor öppnas och sluts. I det vidgade läget kan vatten sippra längs spalten mellan berget och cementbruket och leda till urlakning. Eftersom flödet genom en spricka ökar med aperturen i kubik är det tillräckligt med små ändringar i sprickvidden för att läckaget ska öka signifikant.

Om sprickfyllnadsmaterial eller andra partiklar följer med vattenflödet in i spalten när sprickan är öppen kan dessa partiklar även kila fast. När sprickan sluts är det rimligt att anta att partiklarna krossas eller orsakar krossning av cementbruket. På detta sätt kan även ett ej urlakat cementbruk skadas. Rester av krossat cementbruk förs därefter bort av läckageflödet nästa gång sprickan öppnas. Denna typ av nedbrytning leder till ökat läckage genom injekteringsskärmen över tid.

#### 4.2.4 Synergieffekter

Definitionen av synergieffekt är att effekten av flera samverkande faktorer är större än summan av faktorerna var för sig. Rosenqvist (2017b) visade experimentellt att samverkan mellan urlakning och mekanisk nötning gav hastigare nedbrytning av betongytan än vad skademekanismerna tillsammans orsakade var för sig.

Cementbruk i befintliga injekteringsskärmar bryts troligtvis också ned till följd av samverkan mellan kemiska och mekaniska processer. Dessutom bör effekterna av nedbrytningsmekanismerna förstärkas av förekommande defekter i injekteringen. Dessa defekter karaktäriseras av ofullständig injektering till följd av de praktiska svårigheterna i att åstadkomma en injekteringsskärm av god och jämn kvalitet.

## 5 Övervakning och undersökning

Vilket behov det finns för övervakning av injekteringens funktion och tillstånd vid en specifik dammanläggning behöver bedömas från fall till fall. Samtliga dammar har konstruerats och byggts utifrån lokala förhållanden varför varje damm är unik. Vilket har framgått av tidigare kapitel i rapporten finns det många parametrar som kan påverka hur en injekteringsskärm kommer att prestera över tid. För att avgöra behovet av övervakning behöver en samlad värdering genomföras, vilken baseras på information om berggrundens beskaffenhet, injekteringsskärmens utformning, erfarenheter från injekteringsarbetet, förekommande påfrestningar i och på berget, samt injekteringens betydelse för dammens säkerhet.

### 5.1 ÖVERVAKNING AV INJEKTERINGENS FUNKTION

I dagsläget saknas det specifika metoder för övervakning av injekteringsskärmars funktion. Vad som istället finns att tillgå är det övervakningssystem som de flesta stora dammar utrustats med. Dessa system är vanligtvis utformade efter de lokala förutsättningarna och är framförallt avsedda för kontinuerlig övervakning av den samlade funktionen hos dammen. Baserat på enskilda mätvärden kan det därför vara svårt att fastställa vad som har orsakat en uppmätt avvikelse och var denna avvikelse har inträffat. För jord- och stenfyllningsdammar kan det vara svårt att avgöra om ett tilltagande läckage sker genom berggrunden eller dammen.

Baserat på dammtypen och de lokala förutsättningarna kan basinstrumenteringen för en damm omfatta mätningar av läckage, sättningar, rörelser i krön, porttryck i tät kärna, vattenstånd i nedströms filter och stödfyllning, samt rörelser, vattenstånd och porttryck i berggrunden. Av stor betydelse för möjligheten att kunna fånga upp förändringar i injekteringsskärmens funktion är mätning av läckageflöden, samt porttryck, vattenstånd och rörelser i berggrunden. Genom att kombinera dessa mätningar med bestämning av läckagevattnets kemiska sammansättning kan möjligheter skapas för att i ett tidigt skede kunna fånga upp eventuella förändringar i injekteringsskärmens funktion.

En förutsättning för detta är att det sedan tidigare finns god förståelse av dammens naturliga beteende. Genom att över tid mäta ovan nämnda parametrar tillsammans med vattenmagasinets nivå kan erhållandet av denna förståelse underlättas. Enligt ICOLD (2000) krävs det flera års observationer av dammens beteende innan det är möjligt att upptäcka trender som kan indikera förändringar i injekteringen. För att underlätta tolkningen av gjorda observationer är det viktigt att mätinstrument och befintligt dränage underhålls för att inte ändra förhållandena under dammen.

#### Vattenstånd/porttryck

Vattenstånd och porttryck mäts vanligtvis i flera punkter och kan därför ge viss vägledning om i vilket område ett eventuellt läckage kan ha uppkommit. Enligt Johansson och Edeskär (2012) kombineras mätning av vattenstånd och porttryck ofta med temperaturmätning. Enligt Johansson (2006) varierar porttrycken under en damm till följd av att vattengenomsläppligheten varierar mellan den eller de sprickor som ett specifikt borrhål genomkorsar.

Plötsligt förhöjda portryck behöver inte betyda att injekteringsskärmens funktion har försämrats. Enligt ICOLD (2000) kan igensättning av enskilda dränagehål ha stor inverkan på portrycken i berget. En möjlig orsak till igensatt dränage är enligt Johansson m.fl. (2017) att finmaterial transporteras av läckagevatten och fastnar i bergets sprickor. En annan möjlig orsak kan vara att utfällda mineral täpper igen hålen till följd av kemiska och biologiska processer. Av ICOLD (2000) framgår det att igensatt dränage ofta åtföljs av att läckageflödet sakta minskar.

### Läckage

Enligt Vattenfall (1988) förekommer det något läckage genom, runt eller under dammkroppen vid praktiskt taget alla jord- och stenfyllningsdammar. Vattnet samlas normalt upp i dammens dräneringssystem där bestämning av läckagets omfattning sker. Beträffande betongdammar kan det antas att de flesta läckage sker runt eller under dammkroppen. Johansson och Edeskär (2012) skriver att läckagevattnet kan analyseras med avseende på dess turbiditet och kemiska sammansättning med syftet att bedöma vattnets ursprung och läckväg.

### Vattenanalys

Analys av läckagevattnets kemiska sammansättning kan användas som underlag för att öka förståelsen för den geokemiska miljön i dammens grundläggning. Ifall vattenprover kan insamlas från ett flertal platser kan även eventuella variationer i den geokemiska miljön utmed dammens sträckning samt genom dammkroppen upptäckas. Genomförs analyserna med jämna intervall kan det vara möjligt att upptäcka även mindre förändringar i vattnets kemiska sammansättning. Sådana förändringar skulle kunna tyda på förändrad funktion hos injekteringsskärmen.

### Rörelser

I Vattenfall (1988) står det att mätning av rörelser i berggrunden kan ge värdefull information om dammens tillstånd. Rörelser i horisontalled kan vara indikationer på sprickbildning medan vertikalrörelser kan tyda på deformationer i berget. Som tidigare har nämnts kan rörelser i berggrunden leda till mekanisk nedbrytning och accelererad kemisk nedbrytning av cementbruket. Att mäta relativa rörelser mellan dammkropp och berg, samt absoluta rörelser för dammanläggningen kan ge värdefull information om vilka påfrestningar berggrunden utsätts för.

## **5.2 UNDERSÖKNING AV INJEKTERINGENS TILLSTÅND**

För undersökning av injekteringens tillstånd eller identifiering av förekommande nedbrytningsprocesser krävs det normalt provtagning. Denna provtagning utförs genom uttag av borrhärlor innehållande cementbruk från injekteringsskärmen. För en betongdamm är det förhållandevis enkelt att ta ut borrhärlor då bergets övertyga vanligtvis går att nå via en inspektionsgång inuti dammkroppen.

Beträffande jord- och stenfyllningsdammar saknas denna möjlighet, vilket innebär att samma provtagning blir betydligt svårare att utföra och dessutom mer riskfylld då borrhärlor behöver utföras genom filter och i värsta fall genom tät kärnan. Enligt Weaver och Bruce (2007) kan det vara särskilt svårt, om inte nästintill omöjligt, att nå injekteringsskärmen under dammar med lutande tät kärna. Endast vid ett fåtal

särskilt höga dammar i Sverige har det sprängts ut en inspektionstunnel i berget strax nedströms tåtkärnan, vilken möjliggör borrhning underifrån. I några fall kan det även finnas övergivna omloppstunnlar från byggtiden som är åtkomliga.

Uttag av borrhärlor är ingen garanti för att cementbruk kommer att påträffas eller att tillståndet för det uttagna bruket är representativt för hela injekteringsskärmen. För att exemplifiera påståendet kan massivdammar av cementfattig stampbetong från tidigt 1900-tal nämnas. Betongen var sällan tät och det praktiska utförandet av betongarbetena ledde till att det ofta uppstod svaghetszoner mellan gjutetapperna. Svaghetszonerna utsattes omgående för genomsipprande vatten, vilket orsakade urlakning av betongen. Urlakningen medförde i sin tur allt större läckage.

Vid uttag av borrhärlor från äldre dammar erhålls ofta betong av väldigt skiftande kvalitet. I svaghetszonerna har betongen ibland urlakats så till den grad att endast sand och grus återstår. Detta innebär att cementpastan har lakats ur och förts bort av vattnet. Mellan svaghetszonerna kan betong av mycket hög kvalitet påträffas. Ytterligare information om beständighetsproblem och nedbrytningsförlopp för massivdammar av cementfattig stampbetong återfinns i Rosenqvist (2018).

Vid nedbrytning av injekteringsskärmar bör det därför vara rimligt att förvänta sig ett kraftigt nedbrutet cementbruk i vissa partier av berget samtidigt som bruk av hög kvalitet påträffas i andra partier. I händelse av att läckvattnet har fört bort det nedbrutna bruket är det inte heller orimligt att det helt kan saknas spår av bruk i berget. Ifall cementbruk ej påträffas i den spruckna bergmassan kan det även indikera att det aldrig har funnits något bruk i de aktuella sprickorna.

Påträffas cementbruk i borrhärlorna kan brukets (varierande) kvalitet undersökas okulärt genom kartering. Likaså kan långt gången nedbrytning av bruket noteras. Kärnkartering kan även kompletteras med borrhälsfilmning. Med hjälp av borrhälsfilmning kan eventuella tveksamheter gällande bergets eller injekteringens beskaffenhet besvaras. Exempelvis går det att fastställa ifall en spricka finns i berget eller om den uppkommit till följd av oförsiktig hantering av borrhärlan. Vidare blir lägesbestämningen av sprickor, håligheter och urlakade partier exakt.

För undersökning av pågående urlakning eller för identifiering av förekommande nedbrytningsprocesser kan andra analysmetoder tillgripas. Till enklare metoder räknas framställning av plan- och tunnslip för strukturanalys av bruket för bedömning av exempelvis vattencementtal och eventuell urlakning.

För identifiering av nedbrytningsprocesser eller för bestämning av urlakningsgrad kan avancerade analysmetoder tillgripas. Dessa omfattar kemisk och mineralogisk karaktärisering av cementbruket, samt eventuella omvandlings- och nedbrytningsprodukter. Gustafson m.fl. (2008) använde röntgendiffraktion (XRD) vid karaktärisering av mineralogiska förändringar i cementpasta efter urlakning i successivt aggressivare miljö. Vidare jämförde Rosenqvist (2017c) tre metoder för bestämning av kemisk sammansättning i cementpasta. Metoderna var (1) syrauppslutning med haltbestämning medelst ICP-AES (förkortning för atomemissionsspektrometri med induktivt kopplad plasma), (2) SEM/EDS (förkortning för svepelektronmikroskopi med energidispersiv röntgenspektrometri), samt (3) EPMA/WDS (förkortning för mikrosondanalys medelst våglängdsdispersiv röntgenspektrometri).

## 6 Reparationsinjektering

Vid reparationsinjektering råder helt andra förutsättningar än under dammbygget. En stor skillnad mellan injektering i byggskedet och reparationsinjektering är att berggrunden belastas av en dammkropp med tillhörande vattenmagasin. Bristande funktion hos injekteringsskärmen i kombination med påförd vattenlast leder till att reparationsinjektering behöver utföras i närvaro av strömmande vatten och höga vattentryck. Dessa förutsättningar kommer i en del fall att kräva utveckling av både nya metoder och material för att möjliggöra lyckade injekteringsarbeten. Andra vanligt förekommande benämningar på reparationsinjektering är kompletterande injektering, återinjektering och ominjektering.

### 6.1 VAL AV AVHJÄLPANDE ÅTGÄRDER

Vilken eller vilka avhjälpande åtgärder som bör vidtas vid förhöjda upptryck eller ökande läckage genom berggrunden är sällan helt enkelt att avgöra. Enligt Weaver och Bruce (2007) bör orsaken till injekteringens bristande funktion alltid fastställas innan åtgärder vidtas. Inför valet av åtgärd lyfter Londe och Le May fram tre påståenden i ICOLD (1993) som bör beaktas beträffande sprucket berg:

- I sprucket berg med låg permeabilitet (mindre än cirka 5 Lu) är dränering av stor betydelse medan betydelsen av injektering försumbar.
- I sprucket berg med hög permeabilitet (större än cirka 50 Lu) är injektering nödvändig för att reducera läckageflödet. Dränering är inte nödvändigt.
- I sprucket berg med måttlig permeabilitet är dränering alltid av godo och en förhållandevis billig åtgärd. En injekteringsskärm kan anordnas för att fylla tomrum i berget och reducera läckageflödet till acceptabla nivåer.

Dessa värden bör betraktas kritiskt jämfört med det svenska riktvärdet om 1 Lu (avsnitt 3.5.2). I praktiken är bergmassan i grundläggningen sällan av homogen karaktär, varför reparationsinjekteringen behöver anpassas efter bergets lokala beskaffenhet. Det innebär att olika åtgärder kan behöva vidtas längs injekteringsskärmens utsträckning i längdled.

Också internationellt har injekteringsdjupet ofta valts utifrån en fast procentsats av dammens höjd. Detta påstående återfinns i ICOLD (1993) där det också står att ett sådant förfarandet i vissa fall kan betraktas som farligt. Praktiska erfarenheter har visat att en djup injekteringsskärm inte alltid varit nödvändig utmed dammens högre partier. Istället har det varit nödvändigt med stora injekteringsdjup vid dammens anfang eller anslutningar mot naturlig mark där dammen är låg.

### 6.2 RISKER VID REPARATIONSINJEKTERING

Injektering av berggrunden under en befintlig damm för med sig risker som inte fanns vid tiden för dammbygget. Reparationsinjektering är ibland en nödvändig åtgärd som utförs för att upprätthålla god och enhetlig dammsäkerhet över tid.

De risker som uppkommer i samband med injekteringen behöver därför hanteras för att inte göra avkall på dammens säkerhet. Riskerna kan vara av generell såväl

som specifik karaktär. Nedan presenteras i punktform några exempel på generella respektive specifika risker vid reparationsinjektering under betongdammar, samt jord- och stenfyllningsdammar. Vilka faktiska risker som uppträder styrs däremot alltid av de lokala förutsättningarna vid dammen. En djuplodande riskanalys är därför ett villkor för att injekteringen ska få utföras under en befintlig damm.

#### Generella risker

- Åtgärden kan inte utföras utan reduktion av dammens säkerhets-marginaler. Riskerna behöver hanteras innan åtgärden kan utföras.
- Åtgärden misslyckas. Injekteringsarbetet leder inte till att någon förbättring åstadkoms. Behovet av åtgärd kvarstår.
- Åtgärden förvärrar tillståndet. Injekteringsarbetet kan exempelvis leda till nya läckage eller att de befintliga förvärras. Behovet av åtgärd ökar.
- Åtgärden leder till nya problem. Injekteringsarbetet kan exempelvis leda till rörelser och deformationer i berget, vilket skapar helt nya problem. Behovet av åtgärder ökar drastiskt.

#### Specifika risker för jord- och stenfyllningsdammar

- Borrning. Vid borrning genom filter eller tätjord kan läckvägar uppstå, exempelvis runt foderrör eller i återfyllningen vid bristfälligt utförande.
- Spolning. Vid rens spolning av borrhålen i berget kan sprickfyllnadsmaterial eroderas, vilket i sin tur kan leda till erosion av tätjord (kontaktersion).
- Injekteringstryck. För att reparationsbruket ska kunna pressas ut i berget behöver injekteringstrycket vara högre än omgivande vattentryck. Detta kan leda till lokal lyftning av berget och orsaka sprickbildning i dammen.
- Porttryck. Eventuellt förhöjda porttryck i dammens nedströms stödfyllning kan höjas ytterligare till följd av injektering och ge försämrade stabilitet.
- Injektering. Cementbruk eller annat nyttjat injekteringsmedel kan söka sig upp i filtren som omger tätjorden. Detta ändrar dammens funktion och försämrar dess säkerhet.
- Övervakning. Möjligheten till visuell övervakning av bergets beteende under injekteringsarbetet är begränsad då berget täcks av dammkroppen.

#### Specifika risker för betongdammar

- Spolning. Vid rens spolning av borrhålen i berget kan sprickfyllnadsmaterial eroderas, vilket kan orsaka plötsliga och stora läckageflöden.
- Injekteringstryck. För att cementbruket ska kunna pressas ut i berget behöver injekteringstrycket vara högre än omgivande vattentryck. Detta kan leda till lyftning av berget och enskilda monoliter. Skador kan uppstå på rörelsefogarnas tätband. Dessutom kan sprickor uppkomma i betongen.
- Upptryck. Betongdammens djupinjektering återfinns oftast i uppströmskanten. Vid reparationsinjektering kan dammens säkerhet mot stjälpning försämrades om injekteringen leder till att upptrycket ökar i uppströmsdelen.
- Sprickplan. Förekomsten av sprickplan i berggrunden med ofördelaktig utbredning och lutning kan leda till att dammens säkerhet mot glidning försämrades om injekteringen leder till förhöjda porttryck i sprickplanet. Särskilt allvarligt för dammar med liten egentynghd (lamelldammar).

- Dränering. Reparationsinjektering kan leda till att befintliga dränagehål sätts igen. Dränagehålens funktion kan förändras ifall läget för den nya tätande injekteringsskärmen förflyttas nedströms.
- Spänningsomfördelning. Höga portryck och små deformationer i berget kan orsaka allvarliga spänningsomfördelningar i konstruktioner utan rörelsefogar. Detta gäller framförallt valvdammar.

### 6.3 HANTERING AV RISKER

Identifierade risker behöver alltid hanteras innan det praktiska injekteringsarbetet inleds. Hur och i vilken omfattning olika åtgärder bör vidtas för att reducera dessa risker kommer att skilja från fall till fall. Vilken dammsäkerhetsklass som dammen hänförs till kommer i många fall vara styrande för hanteringen av risker och viljan att använda beprövade respektive obeprövade metoder. Vid injektering av berget under dammar som hänförs till de högsta dammsäkerhetsklasserna bör alltid stor försiktighet iakttas. Enligt Bureau of Reclamation (2014) behöver injekteringens design ofta modifieras utifrån kontinuerliga observationer gällande borrhning, vattenförlustmätning, bruksåtgång, etc. Detta förändrar riskerna.

Svårbedömda risker kan bli enklare att hantera om det utförs på ett systematiskt sätt. Observationsmetoden är ett systematiskt arbetssätt som utvecklades för att hantera risker i geotekniska projekt. Peck (1969) skriver att ingenjörer under lång tid dessförinnan hade tillämpat olika former av observationsmetoder vid arbete med jordmekaniska frågeställningar i fält. Några beskrivningar av arbetssätten sammanställdes dock inte av dessa ingenjörer, vilket fördröjde och försvårade utvecklingen av ett systematiskt tillvägagångssätt.

Peck publicerade år 1969 en artikel där han beskrev en observationsmetod som hade tillämpats av Dr Terzaghi redan vid mitten av 1900-talet. Metoden tillät en kostnadseffektiv design utan att avkall på säkerheten behövde göras. En viktig förutsättning var att designen gick att modifiera under utförandefasen. Idag är observationsmetoden inarbetad i Eurokod 7.

Kortfattat bygger observationsmetoden på tre huvudprinciper:

- Planera en preliminär design utifrån tillgänglig geoteknisk information.
- Observera och mät relevanta parametrar med betydelse för säkerheten.
- Utför fördefinierade åtgärder vid observationer som inte ligger inom acceptabelt intervall.

Spross m.fl. (2016) tillämpade observationsmetoden i samband med injektering av berget under en utskovsdamm av betong uppförd i början av 1960-talet. Dammens säkerhet mot glidning behövde förbättras då ett horisontellt och sammanhängande sprickplan hade påträffats under några av dammens pelare. Djupinjekteringen behövde initialt injekteras för att reducera läckageflödet i berggrunden och därmed underlätta genomförandet av övriga arbetsmoment.

Under injekteringsarbetet övervakades portrycksförändringar, hävning av berget, samt urspolning av sprickfyllnadsmaterial. För dessa tre parametrar bestämdes acceptabla gränsvärden under vilka arbetet fick fortgå. Dessutom fastställdes fördefinierade åtgärder som skulle vidtas ifall gränsvärdena överskreds.

Injekteringen utfördes med ett bruk baserat på cementsorten Injektering 30 och tillsatsmedlet SetControl II. Medlet är en bindetidsreglerande och dispergerande tillsats som har anpassats för specialcementen Injektering 30, Microfine 20, samt Ultrafin 12. Cementbrukets vattencementtal varierades mellan 0,55 och 0,80. Ett injekteringsstryck om 250 kPa krävdes för att överkomma vattentrycket.

Erfarenheterna från injekteringsarbetet var att mätningarna fungerade som tänkt. Inga av de fördefinierade åtgärderna behövde sättas in. Reparationsinjekteringen ledde till att portrycket nedströms den nya djupinjekteringen reducerades, vilket minskade upptrycket och därmed förbättrade dammens säkerhet mot glidning.

Spross m.fl. (2016) rekommenderar observationsmetoden som ett bra ramverk för hantering av risker vid injektering under befintliga betongdammar. Författarna påpekar även att den tillämpade metodiken ligger i linje med nya riskbaserade riktlinjer för dammsäkerhet, vilka nu börjar introduceras runtom i världen.

För att ytterligare reducera riskerna vid reparationsinjektering under dammar kan andra förhållandevis enkla åtgärder vidtas. Dessa åtgärder syftar framförallt till att motverka effekterna av den portryckshöjning som uppkommer under dammen till följd av det övertryck som krävs för att cementbruket ska övervinna vattentrycket.

En åtgärd är att tidsmässigt ej utföra reparationsinjektering under månaderna när vattenmagasinet är täckt av is. Om istäcket trycks mot framförallt betongdammar försämras stabiliteten för dessa dammar. En annan fördel med att injektera under varmare månader är att cementbruket hårdnar snabbare än under vintern, under förutsättning att temperaturen på läckagevattnet följer variationerna i magasinet.

Ytterligare en åtgärd är att sänka av vattennivån i magasinet för att tillfälligt öka säkerheten mot glidning och stjälpning. Enligt Weaver och Bruce (2007) kan ett minskat vattentryck också reducera risken för urspolning av cementbruket, eftersom den hydrauliska gradienten minskar över injekteringsskärmarna.

En annan enkel åtgärd att vidta är att borra upp nya dräneringshål för att avgränsa den area som injekteringsstrycket kan verka på. Dräneringshålen kommer även att fylla en funktion efter injekteringsarbetets fullbordan eftersom de bidrar till att reducera portrycken i berget. Denna åtgärd är av förklarliga skäl enklare att genomföra för betongdammar än för jord- och stenfyllningsdammar.

Slutligen bör injekteringsarbetet utföras av erfaren personal med rätt kompetens. Utrustningen ska vara modern, kunna förhindra övertryck, samt vara i gott skick.

## 6.4 GENOMFÖRANDE AV REPARATIONSINJEKTERING

### 6.4.1 Injekteringsmedel

#### Cementbaserade injekteringsmedel

Även vid reparationsinjektering används cementbaserade bruk i stor utsträckning. En avgörande anledning är lägre kostnader, samt att eventuell miljöpåverkan vid utsläpp eller ofullständig reaktion blir mindre jämfört med kemiska injekteringsmedel. Enligt Bureau of Reclamation (2014) är det i dagsläget vanligt att tillsätta

bentonitlera, sand, samt olika typer av puzzolaner och kemiska tillsatsmedel för att modifiera brukets egenskaper. Antiutvaskningsmedel är ett tillsatsmedel som inte fanns vid tiden för vattenkraftsutbyggnaden, men som idag kan tillsättas för att öka brukets sammanhållning i kontakt med vatten.

Jämfört med tiden för den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden i Sverige finns det nuförtiden ett flertal cementsorter särskilt framtagna för injekteringsändamål. Det som skiljer dessa cementsorter från övriga cement, samt äldre cementsorter, är att de mals finare. Till dessa specialutvecklade cement räknas bland annat Injektering 30, Microfine 20 (ersätts av Ultrafin 20 under 2019), samt Ultrafin 12.

Teoretiskt ökar cementbrukets förmåga att tränga in i fina sprickor i takt med att cementkornens storlek minskar. Kostnaden för de finmalda specialcementen är dock högre än för vanliga cement varför specialcementen sällan är lämpliga för injekteringsarbeten där cementåtgången förväntas bli stor. Det är därför inte ovanligt att olika cementsorter används vid ett och samma injekteringsarbete.

I samband med reparationsinjektering av en stenfyllningsdamm byggd i slutet av 1960-talet åtgärdades förmodade otätheter i både fyllningsdamm och undergrund. Ekström m.fl. (2016) återger beskrivning av både bakgrund och arbetets utförande. Vid byggskedet hade ytinjektering utförts i sex rader med borrhålsavståndet 1 m. Därefter hade djupinjektering utförts, bestående av tre rader. Hålen i den centrala raden hade ett centrumavstånd av 1 m och sidoraderna ett hålavstånd av 3 m.

Vid undersökning av berget inför reparationsinjekteringen konstaterades det att berget var genomsläppligt ned till en meter under bergytan. Injekteringshålen borrades till ett djup mellan 3 och 4,5 m under bergets yta. Vid borrhållningen noterades slag, spolförluster och rester av den ursprungliga injekteringen.

Reparationsinjektering utfördes medelst ett bruk baserat på cementsorten Ultrafin och tillsatsmedlet V33 Melamin. Brukets vattencementtal var 2,0. Vid stor åtgång på bruk utan att mottryck erhöles sänktes vattencementtalet först till 1,25 och vid behov ned till 0,8. Krävdes än tjockare bruk användes ett bruk baserat på injekteringscement. Brukets vattencementtal var 0,5.

I efterhand har det uppstått osäkerheter beträffande hur stora volymer bruk som injekterades i berget respektive dammen. Misstankar finns att borrhålen i berget hamnade i bra berg och att förhållandevis små mängder bruk injekterades trots att den övre delen av berget var genomsläppligt. Istället kan betydande volymer av bruket som injekterades i dammen ha sökt sig ned i slag i dåliga partier av berget. Dessa osäkerheter visar hur svårt det kan vara att styra en reparationsinjektering.

#### Alternativa injekteringsmedel

Det finns tillfällen då traditionella cementbruk är mindre lämpliga att använda vid reparationsinjektering. För injektering av dynamiska sprickor som cykliskt öppnas och sluts bör andra injekteringsmedel väljas. Ett hårt cementbruk är inte elastiskt och kan inte följa sprickans rörelser. Risken är stor att sprickan återkommer.

Enligt Johansson och Edeskär (2012) kan närvaro av strömmande vatten ge stora problem vid användning av traditionella cementbruk. Det finns risk för att det färskas cementbruket spolas iväg innan det hunnit hårdna. För att minska större

läckageflöden kan kemiska injekteringsmedel i form av polyuretaner med kort härdningstid användas. När läckageflödet minskat till acceptabla nivåer utförs injekteringen med traditionellt cementbruk.

Kemiska injekteringsmedel har vanligtvis också god förmåga att tränga in i fina sprickor. Silica sol, vilket består av kolloidalt kisel ( $\text{SiO}_2$ ), är ytterligare ett medel med god förmåga att tätta sådana sprickor som ett cementbruk inte kan tränga in i. Enligt Funehag (2011) består silica sol av partiklar av amorf kiseldioxid, vilka är dispergerade i vatten. Partiklarna kan vara upp till 500 nm (0,0005 mm) i storlek.

Silica sol aktiveras genom att blandas med exempelvis vanligt koksalt som startar reaktionen där bindningar bildas mellan partiklarna. Johansson och Edeskär (2012) framhåller silica sol som ett alternativt injekteringsmedel som bör studeras vidare. En viktig fråga att utreda är hur partiklarna bildar bindningar mellan sig i närvaro av strömmande vatten. En annan viktig fråga är vilken beständighet silica sol har.

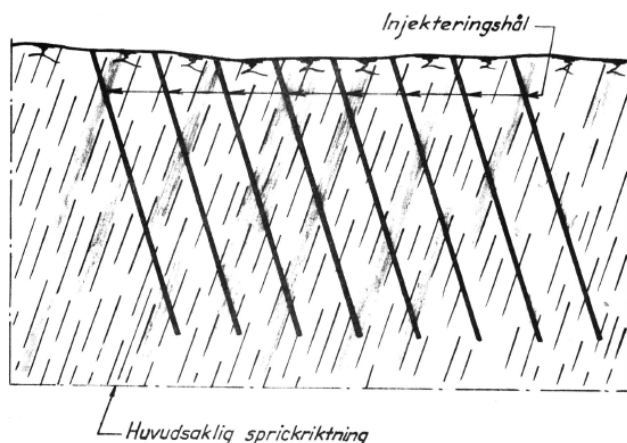
Vattenglas är ett annat medel som har använts för reparationsinjektering i dammar och grundläggning. Medlet består av natriumsilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) som är löst i vatten. Vattenglas har traditionellt använts för konservering av ägg eftersom medlet tätar porerna i äggens skal. Förhoppningar om samma tätande effekt i cementpastans porer har hysts om vattenglas. Ytterligare exempel på alternativa injekteringsmedel som använts internationellt har beskrivits av Weaver och Bruce (2007).

Gemensamt för silica sol och vattenglas är att beständigheten i vattenkraftsmiljön är dåligt kartlagd. Vid jämförelse med cementbaserade material är förhållandevis lite känt om vilken beständighet det faktiskt går att tillskriva dessa medel. Innan tillräckligt med kunskap har erhållits bör nämnda och liknande medel användas med försiktighet och inte betraktas som en långsiktig lösning.

#### 6.4.2 Tillvägagångssätt

De metoder som står till buds för reparationsinjektering är i huvudsak samma som användes vid injektering inför dammbygget. Skillnaden vid reparationsinjektering är att större noggrannhet och utökad övervakning krävs under arbetets utförande, vilket diskuteras i avsnitt 6.3. Den primära anledningen är att injekteringsarbetet sker under en befintlig damm, vilken dämmer upp en betydande volym vatten. Detta innebär i sin tur att injekteringen behöver utföras i ett område med en existerande tryckgradient i kombination med flödande vatten.

Weaver och Bruce (2007) framhåller att det vid reparationsinjektering krävs ett minimum av två borrhålsrader. Borrhålens riktning bör väljas så att de skär så många som möjligt av de befintliga sprickorna i berget (Figur 17). Horisontella och tunna sprickor kan vara särskilt svåra att injektera, varför det kan krävas ett antal ytterligare borrhålsrader. Erfarenheter har visat att stor åtgång av cementbruk är en tydlig indikation på att förtätning av hålen erfordras.



Figur 17. Snedställning av borrhål för att överbygga sprickor. Illustration från Vattenfalls anvisningar (1968).

Med ett fåtal undantag behöver injekteringsarbetet utföras ovanifrån. Beträffande de flesta jord- och stenfyllningsdammar kommer injekteringen att behöva utföras från en plats ovanpå dammkroppen. Endast vid några särskilt höga dammar har en inspektionstunnel sprängts ut i berget strax nedströms tåtkärnan. I driftskedet möjliggör tunneln förhållandevis enkel dränering av berget i direkt anslutning till djupinjekteringen. Vid reparationsinjektering underlättar tunneln istället injekteringsarbetet som kan utföras underifrån.

Att driva en inspektionstunnel i berget kan vara ett alternativ inför en omfattande reparationsinjektering under en jord- eller stenfyllningsdamm. Tunneln skulle inte bara underlätta injekteringsarbetet, utan även skapa möjligheter för kontinuerlig övervakning av injekteringens funktion över tid. Det skulle dessutom vara möjligt att med förhållandevis små resurser reparationsinjektera berget vid behov. Till sist ger inspektionstunneln möjlighet till effektiv dränering av berget under dammen.

Inför injektering av berget under en befintlig stenfyllningsdamm i norra delen av landet planerades det att driva en inspektionstunnel. Alemo m.fl. (1991) anger att förslaget skrinlades på grund av de höga kostnader som skulle uppstå. Det fanns även en svårbedömd risk kring vilka effekter eventuella vibrationer från sprängningsarbetena kunde ha på dammen och berggrunden. Det gick inte att utesluta risken att dammens problem kunde förvärras av tunneldrivningen.

Beträffande betongdammar kan reparationsinjektering av berget utföras ovanifrån. De flesta större dammar har inspektionsgångar från vilka injekteringsarbetet kan bedrivas. Mindre dammar går det att borra igenom för att nå ner till berget.

## 7 Diskussion

Enligt Vattenfalls anvisningar (1988) har grundläggning på berg med en tätande cementinjektering i allmänhet ansetts vara en säker metod. Injekteringsskärmen utgör den tätande och förstärkande zon som vanligtvis anordnas i berget under dammen genom djupinjektering, ytinjektering och kontaktingektering.

En återkommande fråga är ifall injekteringsarbetet utfördes enligt tillhandahållna anvisningar eller ej. Denna fråga är av uppenbara skäl omöjlig att besvara idag då lång tid har förflutit sedan den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden avslutades i början av 1970-talet. Det är däremot möjligt att resonera kring frågeställningen.

Det bör vara rimligt att anta att injekteringen i allmänhet utfördes i enlighet med generella eller projektspecifika anvisningar. Inte sällan utfördes injekteringen efter projektspecifika anvisningar, vilka i sin tur hade upprättats med stöd av generella anvisningar framtagna av byggande aktörer. Vattenfall tog exempelvis fram egna anvisningar för injektering i berg. Likaså gjorde Skånska Cementgjuteriet (idag Skanska) som byggde många av de privata aktörernas kraftverk och dammar.

Dessutom tillskärptes arbetskontrollen successivt under tiden för den storskaliga vattenkraftsutbyggnaden (se avsnitt 3.5.4). Detta innebar att kontrollanter skulle närvara och övervaka arbetet. Vidare upprättades det under injekteringens gång protokoll och rapporter som redogjorde för hålplacering, håldjup, bruksåtgång, injekteringstryck, samt eventuella svårigheter och hur dessa övervanns.

Kontrollanterna kunde inte övervaka arbetet minutiöst, varför det säkerligen har gjorts mindre avsteg från anvisningarna när någon har tyckt sig vinna på det. Att det skulle ha gjorts omfattande och systematiska avsteg från anvisningarna borde innebära att kontrollant och arbetare hade en överenskommelse om detta. Risken för upptäckt ökar dock med antalet involverade personer, varför detta skulle ha medfört ett stort risktagande utan några uppenbara vinningar för de som skulle utsätta sig för risken. Vid tiden för vattenkraftsutbyggnaden hade denna typ av misskötsel av arbetet troligtvis renderat i omedelbart avsked från arbetsplatsen. Det kan härmed antas vara osannolikt att injekteringsarbeten systematiskt skulle ha utförts på annat sätt än vad som föreskrevs i gällande anvisningar.

En annan återkommande fråga är vilken teknisk livslängd en injekteringsskärm kan tillskrivas. Till följd av frågeställningens komplexitet är det mycket svårt att besvara frågan. I RIDAS (2017) står det att injekteringens effekt avtar över tid då cementbruk successivt bryts ned av genomsippande vatten. Varför cementbruk inte är kemiskt stabila i vattenkraftsmiljön har beskrivits tidigare i föreliggande rapport (avsnitt 4.2). Generellt styrs cementbrukets nedbrytning i huvudsak av brukets egenskaper i kombination med storlek på läckageflödet, samt rådande kemiska och mekaniska påfrestningar i berget. Detta innebär att injekteringens funktion försämras på olika sätt och i olika hastigheter under olika dammar.

Beträffande bergmassans egenskaper står det i Vattenfalls anvisningar (1988) att bergets vattengenomsläpplighet i normalfallet avtar mot djupet, eftersom bergsprickorna är vidast i ytnära berg på grund av spänningsutlösning och vittring. Dessa förutsättningar påverkar dels injekteringsarbetets praktiska utförande och

dels cementbrukets beständighet. God beständighet erhålls generellt om bruk med lågt vattencementtal injekteras under högt tryck så att både god inträngning i och god utfyllnad av sprickor, slag och håligheter uppnås. Dessa förhållanden råder normalt vid djupinjektering eftersom förhållandevis höga injekteringstryck kan tillåtas utan att berget deformeras eller att hävning av bergets yta inträffar.

Vid ytinjektering råder nästintill omvänd situation, det vill säga att injektering sker vid förhållandevis låga tryck för att inte orsaka lyftning av berget. Denna naturliga begränsning ger sämre förutsättningar för att uppnå god inträngning och utfyllnad i berget. Enligt ICOLD (1993) är injektering sällan en tillräckligt effektiv metod för att täta den stora mängd av sprickor som kan finnas nära bergets yta, varför försegling av sprickorna rekommenderas som kompletterande åtgärd.

Traditionellt har berget injekterats till ett djup motsvarande en fast procentsats av dammens höjd. Där dammens höjd är liten blir också injekteringsdjupet litet. Vid ringa injekteringsdjup nära dammens anslutningar mot naturlig mark kan det bildas en svaghetszon där läckage genom eller under injekteringen kan ske.

För jord- och stenfyllningsdammar leder försämrad funktion hos ytinjekteringen till ökad risk för urspolning av tätjord längs kontaktzonen mellan berg och jord. I Ekström m.fl. (2016) anges det att höga gradienter kan uppstå mellan magasinets nivå och den dränerande nivån nedströms ifall det finns öppna vattenförande slag i berget i kombination med permeabel grundläggning nedströms. Vatten kommer att pressas genom dessa stråk om ytinjektering saknas eller har bristfällig täthet.

Om lerfyllda slag, vilka inte kunde injekteras i byggskedet, plötsligt börjar erodera kan nya läckagevägar skapas och leda till höga flödes hastigheter. Urspolning av sprickfyllnadsmaterial kan i sin tur resultera i urspolning av tätjord och leda till fortskridande skador på tät kärnan genom inre erosion. Det är svårt att tidigt få indikationer på begynnande inre erosion, eftersom processen sällan upptäcks innan den har orsakat större skador i form av sjunkhål i dammens övre delar.

Av Vattenfalls anvisningar (1988) framgår det att då erhållna erfarenheter från skador i svenska jord- och stenfyllningsdammar tyder på att ytinjektering och försegling av berget har stor betydelse för att hindra urspolning i tät kärnans underkant. Vid lägen för vertikala eller lutande sprick- och krosszoner är det särskilt viktigt med god funktion på både ytinjektering och ytförsegling.

Nedbrytning av djupinjekteringen har i tidigare nämnda erfarenheter ej framhållits som specifik orsak till problemen vid de aktuella dammarna. En möjlig tolkning av detta kan vara att försämrad funktion hos ytinjekteringen har ansetts leda till allvarligare problem än motsvarande försämring av djupinjekteringen.

För jord- och stenfyllningsdammar, vilka utmed en del av dammen har grundlagts på berg och längs resterande del på befintliga jordlager, kan området där tätjorden lämnar berget också vara en svaghetszon. I Vattenfalls anvisningar (1968) påpekas det att tätning kan behöva utföras i både berg och befintliga jordlager för att skapa tillräckligt långa läckvägar så att risken för erosion vid övergångszonen reduceras. Att bergytan inte kan rensas under befintliga jordlager innebär att det kan finnas partier med sprickigt och dåligt berg i området. Det går därför inte att utesluta risken att det kan finnas berg nära övergångszonen med bristfällig injektering.

Angående betongdammar kan försämrad funktion hos ytinjekteringen resultera i att upptrycket ökar och att dammens säkerhet mot glidning försämrats. Risken är särskilt stor för de dammar där det finns ytligt liggande horisontella sprickplan i berget vid läget för dammen samtidigt som dammen har en förhållandevis liten egentygnd. Enligt Hast och Nilsson (1964) är horisontellt orienterade sprickplan vanligt förekommande i den Fennoskandiska urbergsskölden, som täcker stora delar av Sverige. Avståndet mellan sprickplanen varierar mellan 0,5 och 2 m. Sprickplanen kan ofta observeras i gruvor och bergskärningar. Försämrad djupinjektering kan också leda till ökat upptryck under betongdammen.

I en studie av Spross m.fl. (2013) konstaterades det att sannolikheten för glidning är starkt kopplad till dränagesystemets funktion och tillstånd då avsaknad av ett fungerande dränage kan orsaka höga upptryck. Ett fungerande dränagesystem, som underhålls och övervakas, är därför fördelaktigt ur ett säkerhetsperspektiv.

Övervakning och mätning av läckageflöden och porttryck i berget under dammar kan göra det möjligt att tidigt identifiera trender som kan indikera förändringar i injekteringens funktion. Om förändringar upptäcks i ett tidigt skede kan åtgärder planeras i god tid. För att underlätta tolkning och analys av insamlad mätdata är det viktigt att installerade mätinstrument och befintligt dränage underhålls.

Försämrad funktion hos injekteringsskärmen under betongdammar kan ge sämre marginaler med avseende på dammens säkerhet mot framförallt glidning. För att delvis parera effekterna av injekteringens nedbrytning kan dammen förses med förspända förankringsstag eller att (nya) dräneringshål borrar. Beträffande jord- och stenfyllningsdammar saknas normalt motsvarande möjligheter, varför betydelsen av att upprätthålla injekteringens funktion över tid är större.

Vilket tidigare påtalats kommer en injekteringsskärm vid något tillfälle att förlora sin funktion. Om injekteringen bedöms viktig för dammens säkerhet kan åtgärder behöva vidtas. Injekteringens livslängd har i enskilda fall endast varit något eller några decennier innan reparationsinjektering har behövt utföras. Att det finns ett kommande behov av reparationsinjektering under svenska dammar har även diskuterats av Bronner m.fl. (1988) och Wiberg m.fl. (2001).

För att upprätthålla god säkerhet för särskilt utsatta dammkonstruktioner kan nya metoder behöva utvecklas för övervakning och undersökning av injekteringens tillstånd och funktion. Detsamma gäller utveckling och provning av injekteringsmedel, vilket bör omfatta både cementbaserade och alternativa injekteringsmedel. Ett injekteringsmedel förväntas enligt ICOLD (2005) ha goda inträngningsegenskaper, god förmåga att täta berget, samt god beständighet.

Slutligen kan det behövas utveckling av designkoncept beträffande injekteringsmetodiker, stoppkriterier och kontrollmetoder. Sammantaget skulle detta öka möjligheterna att åstadkomma lyckade åtgärder utan att dammens säkerhet behöver åsidosättas under reparationsinjekteringens genomförande.

## 8 Slutsatser

Föreliggande rapport innehåller en kunskapssammanställning om injekterings-skärmars beständighet under svenska dammar. Det beskrivs hur cementbruket i injekteringen bryts ned och vilka följder detta får för dammarnas säkerhet.

Baserat på rapportens innehåll kan följande slutsatser dras:

- Cementbruket i en injekteringsskärm bryts ned över tid, eftersom cementbaserade material inte är kemiskt stabila i vatten.
- Takten på cementbrukets nedbrytning styrs av brukets egenskaper i kombination med kemiska och mekaniska påfrestningar i berget.
- Hittills har det framförallt varit bristande beständighet i ytinjekteringen som har föranlett reparationsinjektering i berg under svenska dammar.
- Nedbrytningen av ytinjektering under jord- och stenfyllningsdammor kan resultera i urspolning av tätjord längs kontaktzonen mellan berg och jord. Utan åtgärd kan dessa skador på sikt leda till inre erosion i tätkärnan.
- En svaghetszon vid jord- och stenfyllningsdammor kan vara anslutningen mot naturlig mark där injekteringsdjupet kan ha varit förhållandevis litet, vilket medför ökad risk för läckage genom och under injekteringen.
- Nedbrytningen av ytinjektering under betongdammor kan resultera i att upptrycket ökar och att säkerheten mot glidning reduceras. Risken är särskilt stor när ytligt belägna horisontella sprickplan finns i berget i anslutning till betongdammor med förhållandevis liten egentyngd.
- Effektiv dränering av berget är särskilt viktigt under betongdammor med ogynnsam grundläggning i form av ytligt belägna horisontella sprickplan. Dränering är en enkel metod för att öka dammens säkerhetsmarginaler.
- Förändringar i injekteringens funktion kan indikeras via mätning. Genom rutinmässigt underhåll av mätinstrument och dräneringshål kan tolkning och analys av uppmätta läckageflöden och portryck underlättas.
- Injekteringens livslängd har i enskilda fall endast varit något eller några decennier innan reparationsinjektering har behövt utföras. Detta innebär att det bör finnas ett framtida behov av att utföra reparationsinjektering med särskilt fokus på ökade läckage från magasin samt på säkerhet och beständighet för befintliga jord- och stenfyllningsdammor.
- För att över tid upprätthålla god dammsäkerhet för särskilt utsatta dammkonstruktioner kan metoder behöva utvecklas för övervakning och undersökning av injekteringsskärmens tillstånd och funktion. Vidare behövs det utveckling och provning av nya injekteringsmedel, samt vidareutveckling av befintliga injekteringsmetodiker, stoppkriterier och kontrollmetoder. Detta för att åstadkomma lyckade åtgärder utan att dammens säkerhet behöver åsidosättas under reparationsinjekteringens genomförande.

## 9 Referenser

- Ahmed L (2015) *Models for analysis of young cast and sprayed concrete subjected to impact-type loads*, Rapport TRITA-BKN 132, Kungliga Tekniska Högskolan
- Alemo J, Johansson N, Bronner N (1988) *Urlakning av cementinjektering*, FUD-rapport 1988/18, Vattenfall
- Alemo J, Bronner N, Johansson N (1991) *Long-term stability of grout curtains*, Proc. 17th International Congress on Large Dams, Vol.2, s.1311-1325
- Allan J D, Castillo M M (2007) *Stream ecology. Structure and function of running waters*, Springer, Dordrecht
- Beddoe R E, Dorner H W (2005) *Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanism*, Cement and Concrete Research, Vol.35, s.2333-2339
- Berglund J, Lindblom U (2019) *Åldrande vattenförande bergtunnlar – Förstudie: Ingenjörsgelogisk status*, Energiforsk rapport 2019:626, Energiforsk
- Bernell L (1964) *Measurements in the Messaure dam, a rockfill structure with wet-compacted moraine core*, Proc. 8th International Congress on Large Dams, Vol.2, s.317-333
- Bernell L, Scherman K A (1979) *Long-term movements in rock foundation beneath two rockfill dams*, Proc. 13th International Congress on Large Dams, Vol.2, s.911-925
- Bogdanoff I (2013) *Degradering av berg, förstärkningar och injektering i tunnlar*, Rapport 2013:26, Strålsäkerhetsmyndigheten
- Bondarchuk A (2008) *Rock mass behavior under hydropower embankment dams – Results from numerical analyses*, Licentiatuppsats 2008:03, Luleå Tekniska Universitet
- Boynton R S (1966) *Chemistry and technology of lime and limestone*, John Wiley & Sons, New York, London, Sydney
- Bronner N, Fagerström H, Stille H (1988) *Bedrock cracks as a possible cause of leakage in two Swedish dams*, Proc. 16th International Congress on Large Dams, Vol.2, s.1029-1052
- Bureau of Reclamation (2012) *Embankment Dams – Chapter 3: Foundation surface treatment*, Design Standards No. 13, Bureau of Reclamation
- Bureau of Reclamation (2014) *Embankment Dams – Chapter 15: Foundation grouting*, Design Standards No. 13, Bureau of Reclamation
- Bydén S, Larsson A M, Olsson M (2003) *Mäta vatten : undersökningar av sött och salt vatten*, Göteborgs Universitet
- Casadei V, Gallico A, Marini P P, Piccinelli F (1991) *Ridracoli dam – Strengthening works with full reservoir*, Proc. 17th International Congress on Large Dams, Vol.3, s.785-800

- Dickson C L, Brew D R M, Glasser F P (2004) *Solubilities of CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O phases at 25°, 55°, and 85°C*, Advances in Cement Research, Vol.16, s.35-43
- Drugge E (2001) *Geokemin längs Luleälven samt påverkan av vattenkraftsutbyggnaden*, Rapport 2001:208 CIV, Luleå Tekniska Universitet
- Ekström I, Nilsson Å, Wilén P (2016) *Reparationsmetoder för fyllningsdammar – Sammanställning av erfarenheter med relevans för svenska förhållanden*, Energiforsk rapport 2016:333, Energiforsk
- Ekwall A (1928) *Konstruktion, utförande och underhåll av höga dammar i Sverige*, Publikation 206 (1928:6), Svenska Vattenkraftföreningen
- Ekwall A (1928) *Konstruktion, utförande och underhåll av höga dammar i Sverige – Redogörelse för valvoddammarna vid Suorva och Norrfors*, Teknisk Tidskrift, Årgång 58, s.101-108, Svenska Teknologföreningen
- Eriksson M, Dalmalm T, Brantberger M, Stille H (1999) *Separations- och filtreringsstabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel: En litteratur- och laboratoriestudie*, Rapport 3065, Avd. Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan
- Eriksson M, Stille H (2005) *Cementinjektering i hårt berg*, Stockholm
- Fagerlund G (1992) *Betongkonstruktioners beständighet – En översikt*, Cementa
- Fagerlund G (2012) *Inverkan av salter på betong – Kemisk och fysikalisk påverkan*, Elforsk rapport 12:29, Elforsk
- Faucon P, Bescop P L, Adenot F, Bonville P, Jacquinet J F, Pineau F, Felix B (1996) *Leaching of cement: Study of the surface layer*, Cement and Concrete Research, Vol.26, s.1707-1715
- Flodin H, Hagrup J (1954) *Ligga kraftstation*, Teknisk Tidskrift, Årgång 84, s.923-931, Svenska Teknologföreningen
- Flögl H, Stäuble H (1991) *Experience with the supplementary installation of an elastic diaphragm in the rock of schlegeis arch dam*, Proc. 17th International Congress on Large Dams, Vol.3, s.731-742
- Funehag J (2011) *Handledning för injektering med silica sol – för tätning i hårt berg*, BeFo Rapport 106, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning
- Furuskog V (1939) *Byggnadstekniska särdrag hos några nya vattenkraftverk*, Teknisk Tidskrift, Häfte 12:153-163, Svenska Teknologföreningen
- Gustafson G, Hagström M, Abbas Z (2008) *FoU-Väst – Underhåll av berganläggningar – Beständighet av cementinjektering*, Chalmers Tekniska Högskola
- Hallhagen F (1939) *Krångede kraftverk – Några byggnadstekniska data*, Publikation 322 (1939:2), Svenska Vattenkraftföreningen
- Halvorsen U (1966) *Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner*, Bulletin 1, Tekniska Högskolan i Lund

- Hansson P (1994) *Cementinjektering – Handbok i materialteknik för injekterare*, Elforsk rapport 94:12, Elforsk
- Hast N, Nilsson T (1964) *Recent rock pressure measurements and their implications for dam building*, Proc. 8th International Congress on Large Dams, Vol.1, s.601-610
- Hellström B (1939) *Svensk väg- och vattenbyggnadskonsts landvinningar utomlands under senaste tio åren*, Teknisk Tidskrift, Årgång 69, s.122-130, Svenska Teknologföreningen
- Hiltzik M A (2010) *Colossus: Hoover Dam and the making of the American century*, New York
- ICOLD (1993) *Rock foundations for dams*, Bulletin 88, International Commission on Large Dams, Paris
- ICOLD (2000) *Rehabilitation of dams and appurtenant works – State of the art and case histories*, Bulletin 119, International Commission on Large Dams, Paris
- ICOLD (2005) *Dam foundations – Geologic considerations. Investigation methods. Treatment. Monitoring*, Bulletin 129, International Commission on Large Dams, Paris
- Jain J, Neithalath N (2009) *Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water*, Cement and Concrete Research, Vol.31, s.176-185
- Johansson F (2006) *Stabilitetsanalyser av stora konstruktioner grundlagda på berg – En inledande litteraturstudie*, BeFo Rapport 74, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning
- Johansson F, Edeskär T (2012) *Reparationsinjektering av dammar och undergrund – Strategi för forskning och utveckling*, Elforsk rapport 12:65, Elforsk
- Johansson F, Krounis A, Westberg Wilde M (2017) *Igensättning av dränage under betongdammar – Orsaker, övervakning och åtgärder*, Energiforsk rapport 2017:369, Energiforsk
- Kleman C (1934) *Notiser: En cementinjektionspump*, Teknisk Tidskrift, Årgång 64, s.93, Svenska Teknologföreningen
- Kommunikationsdepartementet (1924) *Normalbestämmelser för Leverans och Provning av Cement samt för Byggnadsverk av Betong och Armerad Betong*, SOU 1924:25
- Lalin G S (1942) *Handledning i betongkontroll vid Statens Vattenfallsverks byggnadsarbeten*, Vattenfall
- Matton C (1933) *Svenska Vattenkraftföreningens tjuguffjärde ordinarie årsmöte den 27 april 1933 – Erfarenheter från utförda injekteringsarbeten i betong: Föredrag av Direktör C. Matton*, Publikation 260 (1933:5), Svenska Vattenkraftföreningen
- Myneni S C B, Traina S J, Logan T J (1998) *Ettringite solubility and geochemistry of the  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}$  system at 1 atm pressure and 298 K*, Chemical Geology, Vol.148, s.1-19

- Nilsson T (1954) *Svenskt kraftverksbyggande*, Teknisk Tidskrift, Årgång 84, s.249-258, Svenska Teknologföreningen
- Nilsson T (1967) *Swedish National Committee on Large Dams – General Paper No. 9*, Proc. 9th International Congress on Large Dams, Vol.4, s.811-830
- Norstedt U (1986) *Otätt berg under östra Suorvadammen*, Kompendium Bergmekanikdag 1986, s.63-89, Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo
- Peck R B (1969) *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*, Geotechnique, Vol.19, s.171–187
- Plichon M, Baldy M, Combelles J, Le May, Lebreton, Londe, Mathaly, Taylor, Therond, Wong (1976) *Seepage at Électricité de France (EDF) dams – Case histories, interpretation and remedies*, Proc. 12th International Congress on Large Dams, Vol.2, s.323-350
- Powers T C (1945) *A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete*, Journal of the American Concrete Institute, Vol.16, s.245-272
- Powers T C, Copeland L E, Hayes J C, Mann H M (1954) *Permeability of Portland cement paste*, Journal of the American Concrete Institute, Vol.26, s.285-298
- Rafi J Y (2014) *Study of pumping pressure and stop criteria in grouting of rock fractures*, Rapport TRITA-JOB PHD 1020, Kungliga Tekniska Högskolan
- Rafi J Y, Stille H (2015) *Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.49, s.174-187
- Rafi J, Stille H, Johansson F (2016) *Jacking of rock fractures during pre-grouting in Scandinavian tunneling projects*, BeFo Rapport 156, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning
- Reardon E J (1990) *An ion interaction model for the determination of chemical equilibria in cement/water systems*, Cement and Concrete Research, Vol.20, s.175-192
- RIDAS (2012) *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet – Avsnitt 7.2 – Fyllningsdammar – Tillämpningsvägledning – 2011-12-15*, Svensk Energi
- RIDAS (2017) *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet – Avsnitt 7.3 – Betongdammar – Tillämpningsvägledning – 2017-03-21*, Energiföretagen i Sverige
- Rogers J D (2005) *Hoover Dam: Grout curtain failure and lessons learned in site characterization*, Dams Symposium, Association of Engineering Geologists, Sep. 22, USA
- Rosenqvist M (2011) *Vägledning för cementinjektering av betongkonstruktioner – Projektering, utförande och kontroll*, Elforsk rapport 11:60, Elforsk
- Rosenqvist M (2016) *Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures – Interactions between water absorption, leaching and frost action*, Rapport TVBM-1036, Lunds Universitet

- Rosenqvist M (2017a) *Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterisation*, Concrete and Cement Research, Vol.92, s.110-120
- Rosenqvist M (2017b) *Effects of interactions between leaching, frost action and abrasion on the surface deterioration of concrete*, Construction and Building Materials, Vol.149, s.849-860
- Rosenqvist M (2017c) *Bestämning av frisk och urlakad betongs kemiska sammansättning*, Energiforsk rapport 2017:251, Energiforsk
- Rosenqvist M (2018) *Betongteknikens utveckling samt betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*, Energiforsk rapport 2018:481, Energiforsk
- Rothelius E (1936) *Svenska Diamantbergborrningsaktiebolaget 50 år*, Teknisk Tidskrift, Årgång 66, s.103-105, Svenska Teknologföreningen
- Samsioe F (1929) *Skador å betong och botemedlen däremot*, Publikation 224 (1929:12), Svenska Vattenkraftföreningen
- Schmidt C, Samsioe F (1926) *Material- och arbetsbeskrivning över vissa byggnads- och inredningsarbeten för Vattenkraftverk vid Krångfors*, skrivelse daterad den 16 mars, Vattenbyggnadsbyrån
- Schmidt C, Jonson E W (1930) *Kraftverk vid Munkfors i Letälven – Material- och arbetsbeskrivning*, skrivelse daterad den 1 april, Vattenbyggnadsbyrån
- Serrander M, Berg G, Sundin A G, Thulin C, Karlsson K I, Samsioe F (1923) *Forshuvudforsens kraftverk*, Publikation 1952 (1923:7), Svenska Vattenkraftföreningen
- Spross J, Johansson F, Larsson S (2013) *On the use of pore pressure measurements in safety reassessments of concrete dams founded on rock*, Georisk, s.117-128
- Spross J, Johansson F, Rafi J Y, Uotinen L K T (2016) *Using observational method to manage safety aspects of remedial grouting of concrete dam foundations*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.34, s.1613-1630
- Svenska Teknologföreningen (1910) *Bestämmelser för utförande af arbeten i betong och armerad betong*, Handbok XIII
- T P (1934) *Provning av frankringsbultar i berg*, Teknisk Tidskrift: Väg- och vattenbyggnadskonst, s.106-107, Svenska Teknologföreningen
- Vattenfalls anvisningar (1958) *Anvisningar för utförande och kontroll av jorrdammar*, 2. uppl., Statens Vattenfallsverk, Stockholm
- Vattenfalls anvisningar (1968) *Anvisningar för utförande av cementinjektering i berg*, Statens Vattenfallsverk, Stockholm
- Vattenfalls anvisningar (1988) *Jord- och stenfyllningsdammar*, Statens Vattenfallsverk
- VBB (1954) *Bålforsens kraftverk – Byggnadsbeskrivning*, dokument daterat 18 oktober, Vattenbyggnadsbyrån

- VBB (1963) *Rätans kraftverk – Byggnadsentreprenaden – Byggnadsbeskrivning*, dokument daterat 10 oktober, Vattenbyggnadsbyrån
- Weaver K, Bruce D A (2007) *Dam foundation grouting: Revised and expanded edition*, American Society of Civil Engineers, New York
- Westerberg G (1926) *Några tillämpningar av cementinpressningsmetoden vid Statens Vattenfallsverks byggnadsföretag*, Tekniska Meddelanden, Ser. B., N:r 7, Vattenfall
- Westerberg G (1933) *Svenska Vattenkraftföreningens tjugufjärde ordinarie årsmöte den 27 april 1933 – Underhåll och reparation av betong i vattenbyggnader: Föredrag av arbetschefen G. Westerberg*, Publikation 260 (1933:5), Svenska Vattenkraftföreningen
- Westerberg G, Wittrock P (1949) *Harsprångets kraftverksbygge*, Teknisk tidskrift, s.409-418, Svenska Teknologföreningen
- Wiberg U, Eriksson H, Engström Å (2001) *Betongdammar*, KTH VASO – Kursmaterial i Dammar och Dammsäkerhet, Svensk Energi

# BESTÄNDIGHET HOS INJEKTERINGS- SKÄRMAR UNDER SVENSKA DAMMAR

De flesta av de svenska kraftverksdammarna av jord och betong har grundlagts på berg. Innan dammkroppen byggdes var det vanligt att tätta och förstärka berget genom att injektera det med ett cementbruk för att fylla ut sprickor och håligheter.

En lyckad injektering leder till att läckageflöden under dammen minskar, att porttrycken i berget sänks och att risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial och/eller tätjord reduceras. Det finns alltså en koppling mellan dammens säkerhet och injekteringens funktion och tillstånd. Hur stark kopplingen är varierar med typen av damm, dammens utformning, bergets beskaffenhet och andra lokala förutsättningar.

Det här är en kunskapssammanställning av injekteringsskärmars beständighet under svenska dammar som beskriver hur cementbruket i injekteringen kan brytas ned över tid och vilka följder det kan få för dammens säkerhet.

Betongdammars respektive jord- och stenfyllningsdammars behandlas var för sig. Rapporten beskriver den historiska utformningen av injekteringsskärmars och hur det praktiska arbetet utfördes under byggskedet. Övergripande beskrivningar finns också av metoder för övervakning, undersökning och rehabilitering av injekteringen.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)