



Beständighet hos injekteringsskärmar under svenska dammar

MARTIN ROSENQVIST, AFRY

DAMMSÄKERHET & BETONGTEKNIK

VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR 2020

Varför injektera berget under dammar?

— Tätning av dammens undergrund

- Reducera läckageflöden i berget
- Minska risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial
- Sänka portrycken i berget – förbättra stabiliteten

— Förstärkning av dammens undergrund

- Öka bergets bärighet
- Reducera risken för sättningar

— Reducera vattenförluster från magasinet

- Vanligt internationellt med permeabla bergarter – ej vanligt i Sverige

— Injektering innebär att ett pumpningsbart material under övertryck pressas in i ett annat material för att ändra det senare materialets fysikaliska och/eller mekaniska egenskaper

— Injekteringsskärm används ofta som benämning på utförd injektering

Geologiska förhållanden i Sverige

- Den svenska berggrunden består vanligtvis av bergarterna granit och gnejs
 - Längs fjällkedjan dominerar andra bergarter
 - Stora variationer förekommer lokalt
- Graniter och gnejser är båda hårda bergarter
 - Hög hållfasthet
 - God täthet
- Partier med dåligt berg i form av zoner med uppsprucket berg
 - Sprickigt, krossat och i vissa fall vittrat leromvandlat berg
 - Bergets vattengenomsläpplighet ökar
 - Bärigheten försämras
- Normalt avtar bergets permeabilitet med djupet
 - Sprickornas apertur (öppning) är vanligtvis störst i det ytligt belägna berget
 - Även efter rensning av trasigt ytberg kan sprickor och slag finnas kvar djupare ned

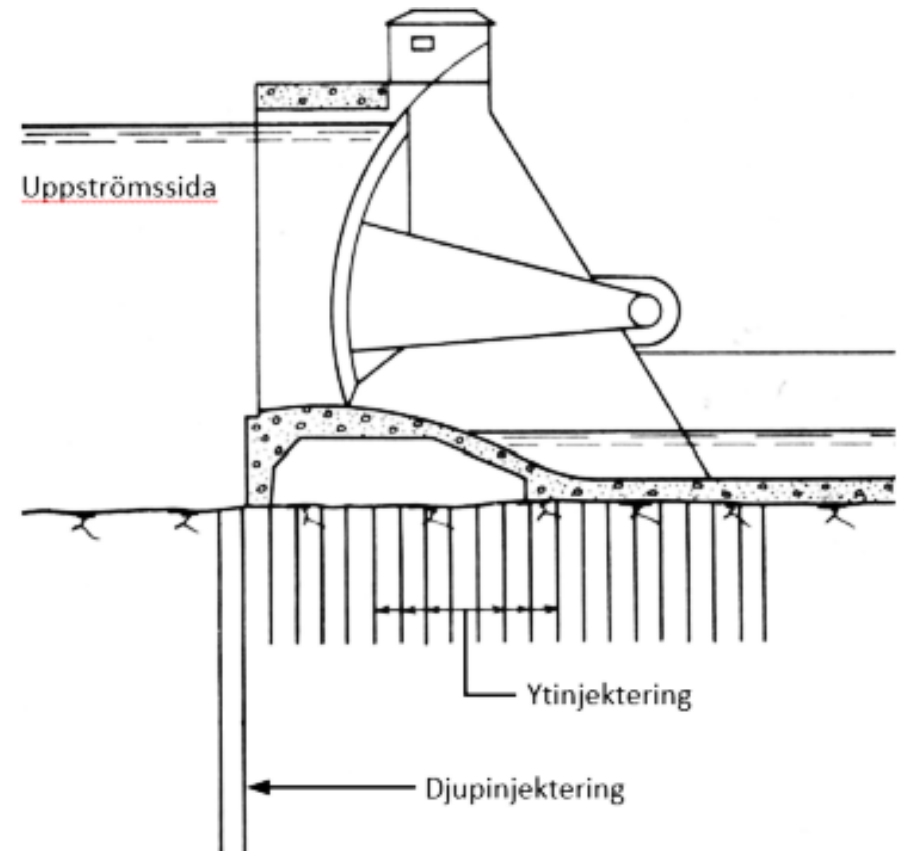
Injekteringsarrangemang

— Djupinjektering / ridåinjektering

- Injektering syftar till att reducera berggrundens vattengenomsläpplighet
- Utfördes i en eller ett par parallella hålrader utmed tätlinjen
- 1930/40-talet $1/6 - 1/5$ av dammens höjd
- 1950/60-talet $1/4 - 1/2$ av dammens höjd
- 1970/80-talet $1/3$ av dammens höjd om berget blev tätt
 $2/3$ av dammens höjd om berget var otätt efter $1/3$
- RIDAS
Betongdammar: $1/2$ av dammens höjd
Fyllningsdammar: $1/3 - 2/3$ av dammens höjd
- Berget ansågs normalt bli tätt vid hålavstånd om 1–2 m (0,5 m)

— Ytinjektering / utbredd injektering

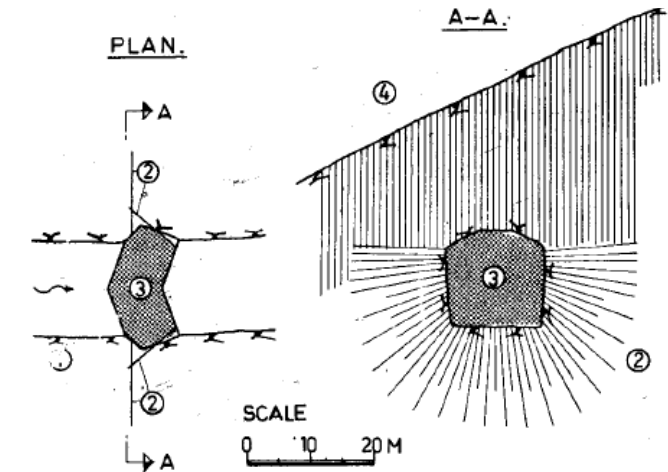
- Injektering syftar främst till att täta sprickigare ytberg
- Reducerar risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial, samt tätjord/filtermaterial
- Tidigare Vanligt att injektera till 2-3 m djup med hålavstånd av 1-2 m
- RIDAS Minst 6 m djup med hålavstånd av 3-4 m



Injekteringsarrangemang

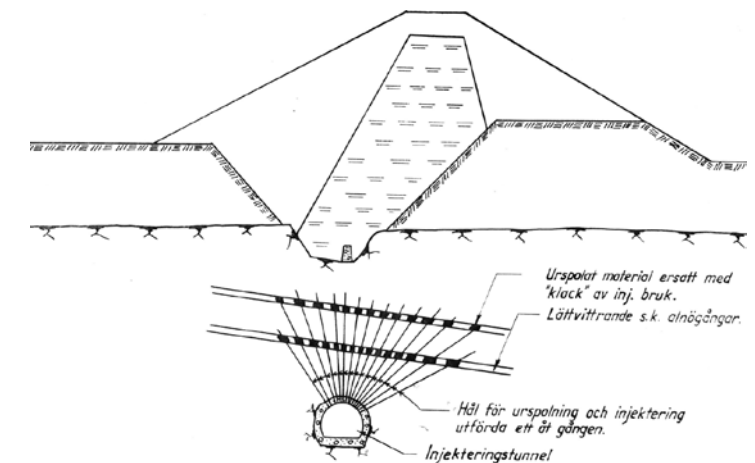
— Kontaktinjektering

- Injektering syftar till att täta sprickor, spalter och hålrum i kontaktzon mellan berg och betong
- Betongplattor för försegling av sprickigt berg
- Betonginklädda tilloppstuber / sugrör
- Betongpluggar i temporära omloppstunnlar
- Betongfyllning i större gropar / skrevor i berg



— Klackinjektering / elefantfotinjektering

- Injektering syftar främst till att förstärka en berggrund genomskuren av materialfyllda sprickor
- Grova hål borrades för att kunna spola ut så mycket som möjligt av sprickfyllnadsmaterialet
- Sprickorna injekterades sedan med cementbruk med hög hållfasthet
- Metoden har tillämpats vid flera dammanläggningar i landet

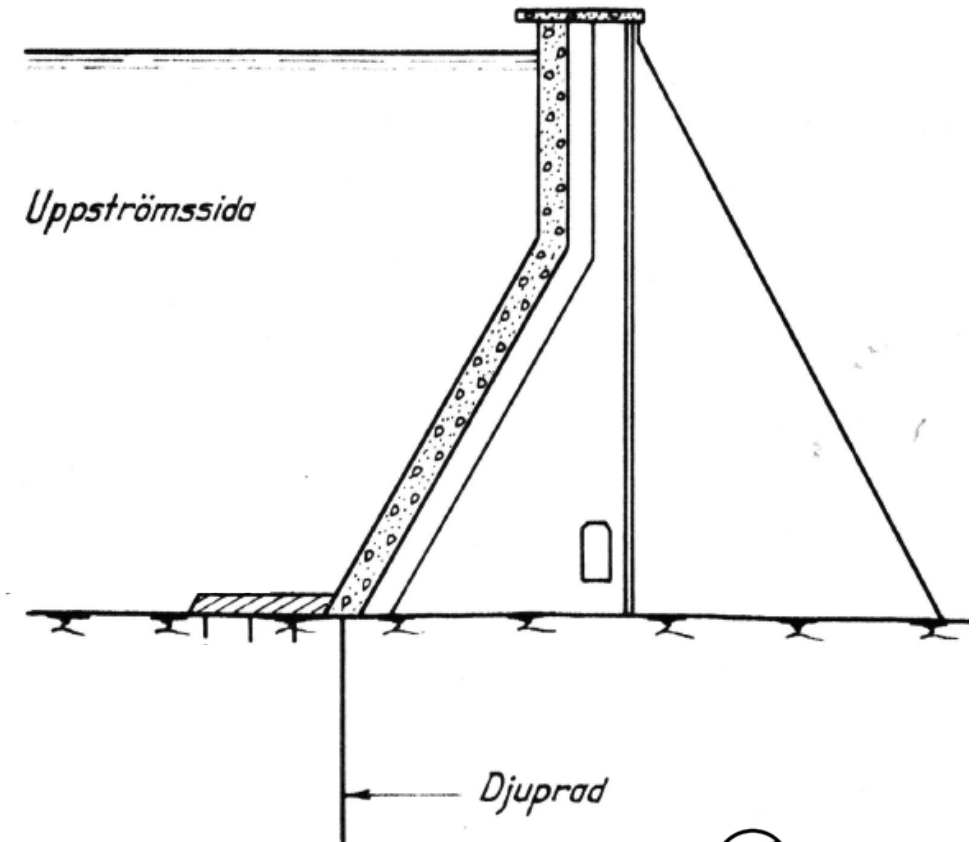


Injektering i tillbakablick

- 1800-talets järnvägsutbyggnad var en pådrivande kraft för utvecklingen av nya tekniker
 - Injektering var en sådan teknik
 - Möjlighet att öka bärigheten i förväg
 - Möjlighet att återställa bärigheten vid skador
- Injektering som metod för att reparera skadade sluss- och murverkskonstruktioner
- I USA injekteras permeabelt berg såsom sand- och kalksten under dammar sedan 1890-talet
- Vid dammbyggen i Sverige injekterades berget efter behov från och med 1920-talet
- Systematisk injektering blev ett naturligt inslag vid dammbyggen i Sverige mot slutet av 1930-talet
- Behovet växte i takt med att allt större och högre dammar byggdes
- Berget ansågs tätt vid en vattenförlust om 1 Lu (hydraulisk konduktivitet om ca 10^{-7} m/s)
- Koppling mellan dammens säkerhet och injekteringens funktion

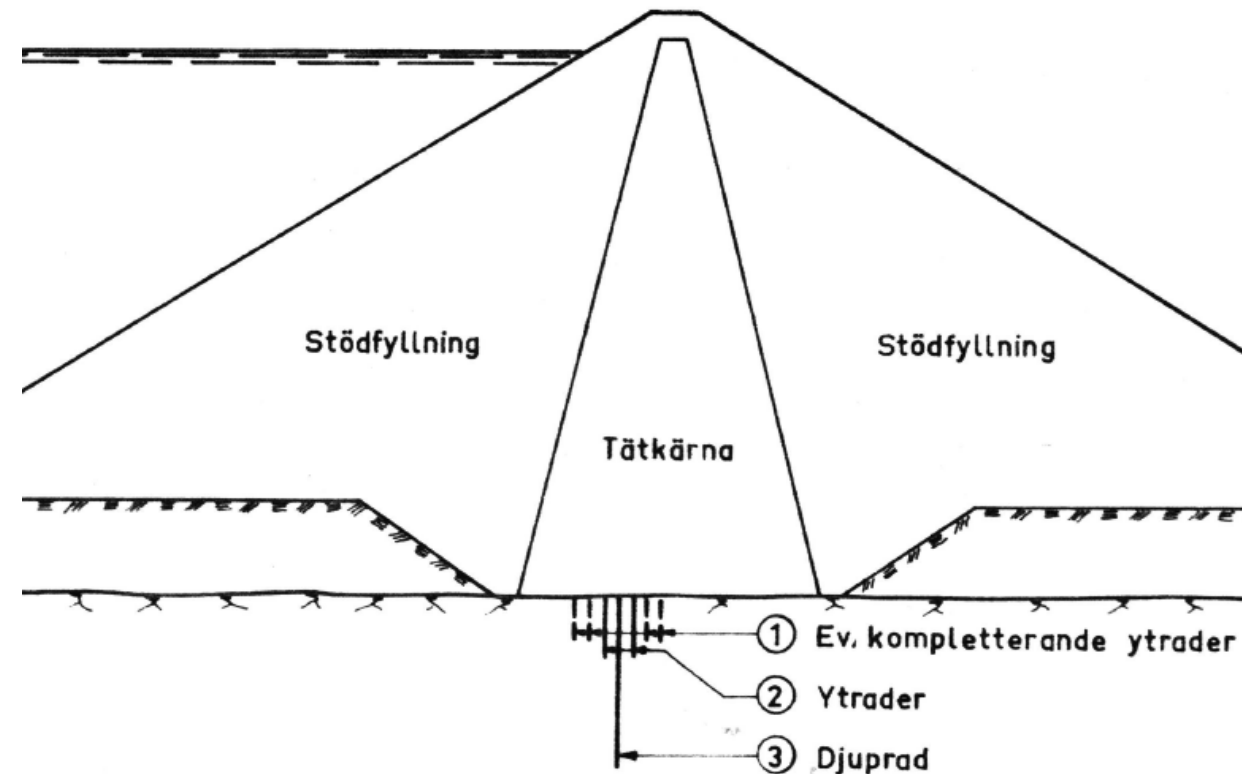
Betongdammar

- Injektering utförs främst för att sänka portrycken i berget
 - Reducerar vattnets lyftande kraft på dammen (uppträck)
 - Förbättrar dammens stabilitet med hänsyn till risken för stjälpning / glidning
 - Enligt RIDAS bör injektering endast betraktas som extra säkerhet
- Djupinjektering placeras vanligtvis nära uppströmssidan
- Kombinerar ofta med dränering av berget bakom injekteringen för att reducera uppträcket
- Ibland injekterades berget efter gjutning av betongkonstruktionerna, vilka användes som mothåll
- Fungerande injektering / dränering viktigare för tunna lamelldammar jämfört med massivdammar
 - Gäller särskilt om horisontella och ytligt belägna sprickor finns i berget



Jord- och stenfyllningsdammar

- Injektering utförs främst för att sänka portrycken i berget och minska läckagevattnets flödes hastighet under dammen
 - Förbättrar dammens stabilitet med avseende på risken att höga portryck i stödfyllningen kan initieras av förhöjda portryck i berggrunden
 - Reducerar risken för erosion av sprickfyllnadsmaterial
 - Reducerar risken för urspolning av tätjord / filtermaterial till följd av kontaktersion
- Djupinjektering placerades vanligtvis under tät kärnas centrala parti (uppströmsdelen)
- Ofta kompletterades djupinjekteringen med ytinjektering upp till en bredd av 10 m
- Ibland gjöts en betongplatta för att försegla berget och användas som mothåll



Injekteringstekniker

- Injektering till fullt djup
 - Berget är inte alltför otätt och har liknande sprickvidder
 - I övriga fall ger metoden otillfredsställande resultat
- Injektering i våningar nerifrån och upp
 - Vid tätning/förstärkning av sprickigt berg.
 - Praktiskt svårt att utföra
- Injektering i våningar uppifrån och ned
 - Borrning och injektering sker växelvis
 - Praktiskt enklare att utföra
 - De sämsta bergspartierna injekteras flera gånger
- Tillvägagångssätt beroende på bergets beskaffenhet
 - Finsprickigt berg kan injekteras gruppvis
 - Sämre berg injekteras med fördel genom successiv hålförtätning



Cementbruk för injektering

- Ett cementbruk för injektering förväntas ha god
 - Förmåga att tränga in i och fylla ut sprickor och håligheter
 - Förmåga att sprida sig i sprickorna
 - Beständighet i aktuell miljö
- Cementbrukets egenskaper styrs av ett flertal faktorer
 - Cementsort
 - Största kornstorlek
 - Vattencementtal
 - Tillsatsmaterial
 - Tillsatsmedel
- Vid injektering påverkas cementbrukets egenskaper även av
 - Cementets ålder och variationer i cementets kvalitet/finhet
 - Temperatur, injekteringstryck och blandningsutrustningens typ och skick.

Cementsorter

- Minsta sprickvidd som kan injekteras är 3 gånger cementets största kornstorlek
 - Gammal tumregel angav sprickbredden 0,3 mm
- Tre cementsorter användes huvudsakligen vid injektering
 - Standardcement (Std)
 - Förhållandevis grovmalet 250-400 m²/kg – jämför med anläggningscement 310-330 m²/kg
 - Lång bindetid mellan 1 och 6 timmar
 - Användes i undantagsfall när ej särskilt höga krav på inträngningsförmågan ställdes
 - Snabbt hårdnande cement (SH)
 - Mades till högre finhet – exempel snabbhårdnande cement Skövde 550 m²/kg
 - Kort bindetid – minst 45 minuter
 - Användes i stor omfattning – problematiskt sommartid
 - Slaggcement (Vulkacement 1954–1972)
 - Standardcement sammalt med granulerad masugnsslagg
 - Finhetsgrad mellan standardcement och SH-cement
 - Bindetid i likhet med Std-cement
 - Användes i stor omfattning – god inträngningsförmåga och lång bindetid

Tillsatser

- Cementbrukets egenskaper modifierades genom olika tillsatser
 - Förbättra brukets stabilitet genom att reducera risken för separation
 - Förbättra brukets förmåga att fylla ut sprickor och håligheter
- Tillsatsmaterial
 - Täppa igen läckvägar och minska risk för urspolning
 - Sågspån / pappersmassa / bentonitlera
 - Bentonitlera
 - Förbättra brukets stabilitet
 - Kiselgur
 - Reducera cementförbrukningen
 - Finsand / filler / lera
- Tillsatsmedel
 - Konsistensförbättrande – förbättrar brukets stabilitet eller minskar behovet av vatten
 - Retarderande/accelererande – förlänga eller förkorta brukets bindetid



Vattencementtal

- Vattencementtal (vct) anger viktförhållandet mellan vatten och cement
 - Brukets färskas tillstånd
 - Pumpbarhet
 - Arbetbarhet
 - Stabilitet
 - Inträngningsförmåga
 - Brukets hårdnade tillstånd
 - Hållfasthet
 - Täthet
 - Beständighet
- Lågt vattencementtal – hög täthet, dålig inträngningsförmåga och god beständighet
- Högt vattencementtal – låg täthet, god inträngningsförmåga och sämre beständighet
- Motsatsförhållande mellan god inträngningsförmåga och god beständighet!

Vattencementtal

- Injekteringsbrukets vattencementtal (vct) varierades kraftigt vid injektering
- Injekteringen inleddes ofta med högt vct
 - 2–10 för tunna blandningar
 - Möjlighet att känna sig för hur hålet reagerar
- Injekteringen fortsatte med lägre vct
 - Successiv sänkning av vct
 - 0,3-0,5 för tjocka blandningar
- Genom försök har det visats att vid $vct > 0,7$ bildas sammanhängande system av kapillärporer
- Teoretiskt är cementbruk med $vct < 0,7$ att betrakta som täta
- I praktiken stryps transportvägarna vid $vct 0,5–0,6$
- Genom tillsatsmedel kan vattenbehovet reduceras

Injekteringstryck

- Övertrycket är en viktig parameter vid injektering då brukets inträngningsförmåga ökar med trycket
 - Höga tryck leder till att bruket kan pressas längre in i sprickorna och på kortare tid
 - Höga injekteringstryck kan också medföra att fina sprickor temporärt vidgas, vilket underlättar brukets inträngning
- Vidgning i en spricka kan leda till hoptryckning i en annan spricka
 - Vissa sprickor gynnas medan andra missgynnas
 - Effekten av injekteringen blir därför svårbedömd
- Höga injekteringstryck leda till att nya sprickor induceras i berget eller att bergytan lyfts
- Erfarenhetsmässiga riktvärden
- Förundersökningar viktiga
- Rörelser övervakas

Injekteringsdjup [m]	Ogynnsamt berg [kPa]	Gynnsamt berg [kPa]	Tumregel [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

Injekteringens beständighet

- Cementbruket kan utsättas för olika kemiska, fysikaliska och mekaniska påfrestningar
- Nedbrytning leder till successiv försämring av injekteringens tillstånd och funktion
- Internationellt vanligt förekommande orsaker bristande beständighet hos injektering:
 - 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
- Svårt att i efterhand avgöra om injekteringen utfördes på korrekt sätt eller ej
- Beständigheten mot förekommande nedbrytningsprocesser avgör injekteringens tekniska livslängd

Nedbrytningsprocesser

— Fysikalisk nedbrytning

- Vad som avses med fysikalisk nedbrytning är förändringar i ett material som uppkommer till följd av exponering av solljus, värme och fukt
- Resulterar vanligen i förändrade materialegenskaper, såsom förlust av hållfasthet och styvhet, samt försämrad täthet

— Värmeskjul uppfördes över berget för att möjliggöra injektering vintertid

— Frostsador i injekterat berg som ligger oskyddat under vintern

- Cementbruk med höga vattencementtal innehåller avsevärt mycket mer vatten än vad som binds kemiskt till cementet vid hårdnandet
- Överblivet vatten bildar porer som förblir vattenfyllda om bruket ej kan torka ut, vilket sällan bör vara fallet i berggrunden
- Vid fasomvandling från vatten till is uppstår en volymexpansion om drygt 9 %, vilken kan spräcka cementbruket
- Ju längre frysperioden varar, desto djupare ned i marken kommer den frysta zonen att nå (tjälnedträngning)

— Ytinjektering är särskilt känslig för fysikalisk nedbrytning

— Praktiska erfarenheter saknas av denna typ av nedbrytning

- Kan dock vara värt att tänka på vid nybyggnad

Nedbrytningsprocesser

— Kemisk nedbrytning

- Vad som avses med kemisk nedbrytning är reaktioner mellan cementbruket och andra substanser, exempelvis grundvatten
- Kan resultera i förändrade materialegenskaper, såsom förlust av hållfasthet och styvhet, samt försämrad täthet

— Urlakning

- Cementbaserade material är kemiskt instabila i vatten
- Cementets beståndsdelar går i lösning vid långvarig kontakt med vatten
- Om ett flöde av vatten sker genom materialet transporteras beståndsdelarna iväg

— Upplösning av cementets beståndsdelar

- Upplösning sker av hydratationsprodukterna kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) och kalciumsilikathydrater (C-S-H)
- Kalciumhydroxid går i lösning vid pH 12,5
- C-S-H går i lösning när pH understiger 10
- Vatten som pressas ned i berget från magasinet har ofta pH runt 7

— Slaggcement generellt sett mindre känsligt än snabbhårdnande cement och standardcement

— Urlakning av injekteringens cementbruk är rimligt att förutsätta

Nedbrytningsprocesser

— Sulfatangrepp

- Vattenlösliga sulfater (SO_4^{2-}) kan accelerera cementbrukets nedbrytning
- Sulfaterna reagerar med cementets kalciumhydroxid och bildar gips
- Gipset reagerar med cementets monosulfater och bildar ettringit
- Ettringit binder stora mängder vatten, vilket leder till expansion
- Inträngning av sulfat- och sulfidhaltiga ämnen leder till nedbrytning genom volymexpansion och uppsprickning
- Förekomst av magnesium- och/eller ammoniumjoner kan ytterligare accelerera ett nedbrytningsförloppet
- Nämda ämnen kan härstamma från vittrande bergarter som bland annat förekommer i fjällkedjan

— Slaggcement generellt sett mindre känsligt än snabbhårdnande cement och standardcement

— Sura angrepp

- Vattnet i sjöar och älvar innehåller en mindre mängd löst koldioxid (CO_2), vilken bildar kolsyra (H_2CO_3) som kan angripa cementet
- Vittring och oxidation av särskilda bergarter (exempelvis alunskiffer) kan leda till bildandet av svavelsyra
- Pressas surt vatten ned i berget kan cementbrukets nedbrytning accelereras

Nedbrytningsprocesser

— Mekanisk nedbrytning

- Vad som avses är påkänningar som påverkar berggrunden så 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

- Aktiviteter som schaktning, sprängning och borrarbete kan påverka både berget eller cementbruket
- Bortschaktning av jordmassor kan exempelvis leda till hävning av berget till följd av avlastning
- En hävning av berget strax under 100 mm uppmättes vid bygget av en stenfyllningsdamm på 1950-talet
- Cirka 15 år efter färdigställandet hade mellan 21 och 93 % av hävningen gått tillbaka
- Minst tillbakagång hade uppmätts i berg av god kvalitet medan störst tillbakagång hade uppmätts i berg av sämre kvalitet

— Driftskedet

- Reglering av magasinet kan följaktligen leda till att berget lyfts och trycks tillbaka i omgångar
- Befintliga sprickor kan vidgas eller tryckas ihop
- Vidgas en injekterad spricka bildas en spalt mellan cementbruket och berget → vatten sipprar fram och bruket kan urlakas
- Sprickfyllnadsmaterial eller andra partiklar kan följa med vattenflödet in i spalten när sprickan är öppen
- När sprickan sluts är det rimligt att anta att partiklarna krossas eller orsakar krossning av cementbruket

Övervakning och undersökning

- I dagsläget saknas det specifika metoder för övervakning av injekteringens tillstånd och funktion
- Istället kan det övervakningssystem som de flesta stora dammar utrustats med användas
 - Läckageflöden / temperaturmätningar
 - Sättningar / rörelser i krön
 - Portryck i tät kärna, samt vattenstånd i filter och stödfyllning
 - Rörelser och portryck i berggrunden
- Komplettering med analyser av läckagevattnets kemiska sammansättning
- Det förutsätts dock att god förståelse finns för dammens naturliga beteende
- Flera års observationer kan krävas för att upptäcka trender som indikerar förändringar i injekteringen
- Viktigt att mätinstrument och befintligt dränage underhålls för att inte ändra förhållandena
- Uttag av borrhärlor för att bekräfta nedbrytning och fastställa orsak till nedbrytning

Avhjälpande åtgärder

- Avhjälpande åtgärder kan omfatta både reparationsinjektering och dränering
- Internationella erfarenheter har visat att god dränering av berg kan ha större betydelse än injektering
 - Giltigt särskilt för sprucket berg med låg permeabilitet (mindre än cirka 5 Lu)
 - I berg med högre permeabilitet är samverkan mellan dränering och injektering viktig
- Vid reparationsinjektering råder helt andra förutsättningar än under dammbygget
 - Berget täcks och belastas av en dammkropp
 - Större problem för fyllningsdammar jämfört med betongdammar
 - Injektering kan behöva utföras i närvaro av strömmande vatten och höga vattentryck
- Risker vid reparationsinjektering
 - Specifika risker med avseende på fyllningsdammar respektive betongdammar
 - Behöver hanteras - observationsmetoden ger ett ramverk för hantering av riskerna
- Behov av utveckling av metoder och tillvägagångssätt vid reparationsinjektering

Sammanfattande diskussion

- Cementbaserade injekteringsbruk bryts ned över tid – tidsaspekten beror på lokala förutsättningar
- 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
 - Normalt vid djupinjektering eftersom förhållandevis höga injekteringstryck kan tillåtas utan att berget deformeras eller att hävning inträffar
 - Omvänt förhållande vid ytinjektering – injektering sker vid förhållandevis låga tryck för att inte orsaka lyftning av berget
 - Sämre förutsättningar för att uppnå god inträngning och utfyllnad i berget vid ytinjektering
- Ytinjektering i kombination med förseglad bergyta under fyllningsdammar har stor betydelse för att minska risken för urspolning av tätjord / filtermaterial längs kontaktzonen mellan berg och jord
- Försämrad funktion hos injekteringen under betongdammar kan leda till reducerad säkerhet mot glidning. Risken är särskilt stor med ytligt belägna horisontella sprickplan under dammar med förhållandevis liten egentygnd
- Effektiv dränering av berget är särskilt viktigt under betongdammar