

FUKTTILLSTÅND I BETONG BAKOM CHESTERTON-LAGNING

RAPPORT 2019:615



VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Energiforsk

Fukttillstånd i betong bakom Chesterton-lagning

MARTIN ROSENQVIST OCH AMANDA HOLMQVIST

ISBN 978-91-7673-615-9 | © Energiforsk september 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Under 1990-talet utfördes reparationer av ytliga betongskador på olika vattenkraftskonstruktioner med ett polymerbaserat lagningsbruk salufört under namnet Chesterton. Syftet var att återställa ytan samt att öka beständigheten mot nötning. Skibord, utskovspelare, pelarnosar och vattenlinjen var de vanligaste platserna för lagning med Chestertonbruk.

Olika typer av polymerbaserade material för lagning och förstärkning av skadade ytskikt börjar nu återigen diskuteras. Enligt materialtillverkare kan dessa material användas för att tätas uppströmssidan på gamla och nya dammar, utgöra skydd mot avskalning längs vattenlinjen, minska risken för erosionsskador på skibord, samt hindra fuktupptagning i konstruktioner vilka uppvisar risk för exempelvis ASR. Det är dock inte oproblematiskt att belägga betongkonstruktioner med täta material om dessa konstruktioner står i ständig kontakt med vatten. Om vatten ackumuleras i betongen under det täta skiktet ökar risken för frostskaador, vilka kan orsaka större skador än de skador det täta skiktet var tänkt att avhjälpa.

I detta projekt har Martin Rosenqvist, senior konsult på ÅF, och Amanda Holmqvist, betongtekniker på Vattenfall R&D, utfört provtagning och analys av fuktnivåerna bakom en äldre Chestertonlagning. Syftet är både att få information om fukttillståndet bakom en sådan lagning, och att få en fingervisning framåt angående hur polymerbaserade lagningsmetoder fungerar i vattenkraftsmiljön..

Projektet har genomförts inom Betongtekniskt program vattenkraft, med intressenterna Fortum Sverige AB, Jämtkraft AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Svensk Kärnbränslehantering, Sydkraft Hydropower AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB Vattenkraft och Vattenfall Indalsälven AB.

Sammanfattning

Föreliggande rapport redogör för fukttillståndet i betongen bakom ett reparationsskikt i form av Chesterton-bruk. Reparationsskiktet antas vara mindre vattengenomsläppligt än underliggande betong. Bruket applicerades i mitten av 1990-talet för att bromsa nedbrytningen av betongytan längs vattenlinjen på en betongdamm.

Det är vanligt förekommande att betongens yta successivt nöts bort i vattenlinjen på konstruktioner i ständig kontakt med vatten. Gällande betongdammar är det särskilt vanligt att betongens grova ballast friläggs utmed vattenlinjen på både upp- och nedströmssidan. Nedbrytning av betongens yta längs vattenlinjen vid svenska vattenkraftverk och dammar orsakas vanligtvis av samverkan mellan urlakning, frysning och mekanisk nötning.

Under 1990-talet utfördes ett stort antal reparationer av ytliga betongskador på vattenkraftskonstruktioner runt om i landet. Polymerbaserat Chesterton-bruk användes vid ett flertal reparationer av skador utmed vattenlinjen på dessa konstruktioner. Att reparera ytliga skador med polymerbaserade material är fortfarande idag en aktuell och vanligt förekommande reparationsmetod.

Att reparera betongkonstruktioner med material som kan förmodas vara tätare än underliggande betong kan leda till nya problem om konstruktionen står i ständig kontakt med vatten. Det kan finnas en risk för ackumulering av fukt i betongen under det tätare reparationsskiktet, vilket försämrar betongens frostbeständighet.

Okulär besiktning av betongdammen och utbörning av betongkärnor utfördes hösten 2018. Betongkärnorna borrades ut från dammen både vid en plats med Chesterton-lagning och en plats utan lagning. Betongkärnorna skickades sedan vidare till laboratorium för fortsatta analyser.

Resultaten från de efterföljande undersökningarna visade att det inte råder någon förhöjd risk för generell frostnedbrytning av betongen bakom Chesterton-bruket. Istället erhöles indikationer på att bruket kan hindra vatten från våguppspolning och stänka att absorberas av betongen ovanför magasinets dämningssgräns. Lägre vattenmättnadsgrader uppmättes nämligen i betongen med Chesterton-lagning jämfört med betongen utan lagning.

Summary

This report presents data on moisture conditions in the concrete behind a repair layer made of Chesterton coating. The repair layer is assumed to be less water permeable compared to the structural concrete. The coating was applied in the mid-1990s to slow down ongoing deterioration of the concrete surface at the waterline of a concrete dam.

Progressive deterioration of the concrete surface is common to see at the waterline of hydraulic structures in contact with water all year round. Exposure of the coarse aggregate occurs along the waterline on both the upstream and downstream side of concrete dams. Progressive deterioration of the concrete surface at the waterline of Swedish hydro power structures is usually caused by interactions between leaching, frost action and abrasion.

During the 1990s, a large number of repairs of superficial damage to hydro power structures of concrete were carried out in the country. Polymer-based Chesterton coatings were used in numerous repairs of damage along the waterline of these structures. Using polymer-based materials to repair superficial damage is still a commonly used repair method.

Repairing concrete structures with materials that can be assumed to be less water permeable compared to the structural concrete can lead to new problems if the structure is in contact with water all year round. There may be a risk that water accumulates in the concrete under the less permeable repair layer, which reduces the frost resistance of the concrete.

Visual inspection of the concrete dam and extraction of concrete cores were carried out in the autumn of 2018. The cores were taken out both at a location with the Chesterton coating and a location without the coating. The concrete cores were then sent to the laboratory for further analysis.

The results of the subsequent analyses showed that there is no increased risk of general frost deterioration of the concrete behind the Chesterton coating. Instead, indications were obtained that the coating may prevent water from splashes and waves from being absorbed by concrete above the maximum water level of the reservoir. Lower water saturation levels were measured in the concrete with Chesterton coating compared to the concrete without coating.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Avgränsningar	8
2	Chesterton-lagning i vattenlinjen	9
3	Genomförande av praktiskt arbete	12
3.1	Planering av studien	12
3.2	Utborrning av betongkärnor	14
3.3	Provningsmetoder	18
3.3.1	Bestämning av vattenmättnadsgrad	18
3.3.2	Bestämning av fukttinnehåll vid kapillärmättnad	18
4	Resultat och diskussion	19
4.1	Betongens vattenmättnadsgrad	19
4.1.1	Betong med Chesterton-lagning	19
4.1.2	Betong utan lagning	20
4.1.3	Jämförelser vid olika nivåer	22
4.2	Betongens fukttinnehåll vid kapillärmättnad	24
4.3	Chesterton-lagning som reparationsmetod	25
5	Slutsatser	26
6	Referenser	27

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Det är vanligt förekommande att betongens yta successivt nöts bort i vattenlinjen på konstruktioner i ständig kontakt med vatten. Gällande betongdammar är det särskilt vanligt att betongens grova ballast friläggs utmed vattenlinjen på både upp- och nedströmssidan. Rosenqvist (2016) visade experimentellt att gradvis nedbrytning av betongens yta längs vattenlinjen vid svenska vattenkraftverk orsakas av samverkan mellan urlakning, frysning och mekanisk nötning.

Nedbrytningsprocessen är vanligtvis långsam, men nedbrytningshastigheter upp till 1 mm per år kan förekomma lokalt. I dessa fall kan ett 50 mm tjockt täckande betongskikt nötas bort inom loppet av 50 år och därmed frilägga armeringsjärnen.

För dammanläggningar med stora årliga variationer i magasinets vattennivå är det vanligt att nedbrytningshastigheten är låg eftersom nedbrytningen fördelas över relativt stora ytor. För anläggningar med små eller inga variationer i magasinets vattennivå koncentreras nedbrytningen istället till ett smalt band utmed vattenlinjen och hastigheten på nedbrytningen kan bli hög. I många fall har större reparationer behövt utföras för att hindra tillväxten av allvarligare skador.

Under 1990-talet utfördes det ett stort antal reparationer av ytliga betongskador på vattenkraftskonstruktioner runtom i landet. Chesterton-bruk användes vid många av reparationerna. Det huvudsakliga syftet med reparationerna var att återställa betongens yta och hindra fortsatt nedbrytning. I en förteckning över genomförda reparationer, sammanställd av Björkenstam (1999), står det att Chesterton-bruk ofta användes för reparationer av skador längs vattenlinjen på betongdammar.

De Chesterton-bruk som användes under 1990-talet var enligt Björkenstam (1999) kvartsförstärkta polymerkompositer där bindemedlet var epoxi. Chesterton-bruk skyddar den bakomliggande betongen dels genom att reducera inträngningen av aggressiva ämnen och dels genom dess goda nötningsbeständighet. Att reparera ytliga skador med polymerbaserade material är fortfarande idag en aktuell och vanligt förekommande reparationsmetod vid dammanläggningar.

Tillverkare av reparationsmaterial uppger ofta att deras produkter kan användas för att avhjälpa en mängd olika typer av problem. Möjliga användningsområden för polymerbaserade material vid betongdammar kan vara tätning av dammens uppströmssida eller förbättring av skibordens nötningsbeständighet. Ett annat användningsområde för polymerbaserade material kan vara skydd mot hög fuktbelastning i konstruktioner med risk för alkali-kiselsyrareaktioner.

Att reparera betongkonstruktioner med material som kan förmodas vara tätare än underliggande betong kan leda till nya problem om konstruktionen står i ständig kontakt med vatten. Det kan inte uteslutas att fukt ackumuleras i betongen under det tätare reparationsskiktet. Över tid kan detta öka risken för inre frostskaador i konstruktionen. Uppkomsten av frostskaador kan i sin tur leda till större problem än vad de ursprungliga skadorna gjorde. Följaktligen är det viktigt att förstå hur reparationsmaterial samverkar med den underliggande betongen.

I många fall saknas det ofta tillräckligt med kunskap för att kunna bedöma om ett polymerbaserat reparationsmaterial är lämpligt att använda eller inte. Framförallt är det svårt att bedöma risken för fuktackumulering under ett, förmodat betydligt, tätare reparationsmaterial jämfört med underliggande betong. Vidare saknas det kunskap kring vilka faktiska fuktnivåer som över tid kan uppkomma i betongen bakom ett polymerbaserat reparationsmaterial. Bristen på kunskap gäller bland annat för konstruktioner i ständig kontakt med vatten, till exempel dammar.

Inom ramen för denna studie har rådande fuktnivåer bestämts i betongen bakom en Chesterton-lagning, vilken utfördes vid en dammanläggning under mitten av 1990-talet. Erhållna resultat jämförs sedan med motsvarande fuktnivåer i betong från samma anläggning utan Chesterton-lagning. Till sist förs det en diskussion kring de uppmätta fuktnivåernas betydelse för risken för frostnedbrytning.

1.2 SYFTE

Det huvudsakliga syftet med föreliggande studie är att förbättra kunskapsläget med avseende på vilka fuktnivåer som kan uppstå i betong bakom ett förmodat tätare reparationsmaterial. Kunskapen kan användas för att bedöma risken för eventuella följdskador till följd av frostnedbrytning i bakomliggande betong.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Fokus i denna studie är att bestämma fukttillståndet i betongen bakom en lagning som utfördes med Chesterton-bruk längs vattenlinjen på en kraftverksdamm av betong. Undersökning och bestämning av fukttillståndet bakom Chesterton-lagningar på andra konstruktioner ligger utanför ramen för denna studie.

Eftersom bara en dammanläggning undersökts utgör de erhållna resultaten endast en indikation på hur fukttillståndet kan vara bakom liknande Chesterton-lagningar vid andra dammanläggningar. Vilket fukttillstånd som kan råda bakom andra typer av polymerbaserade reparationsmaterial ger inte denna studie svar på.

2 Chesterton-lagning i vattenlinjen

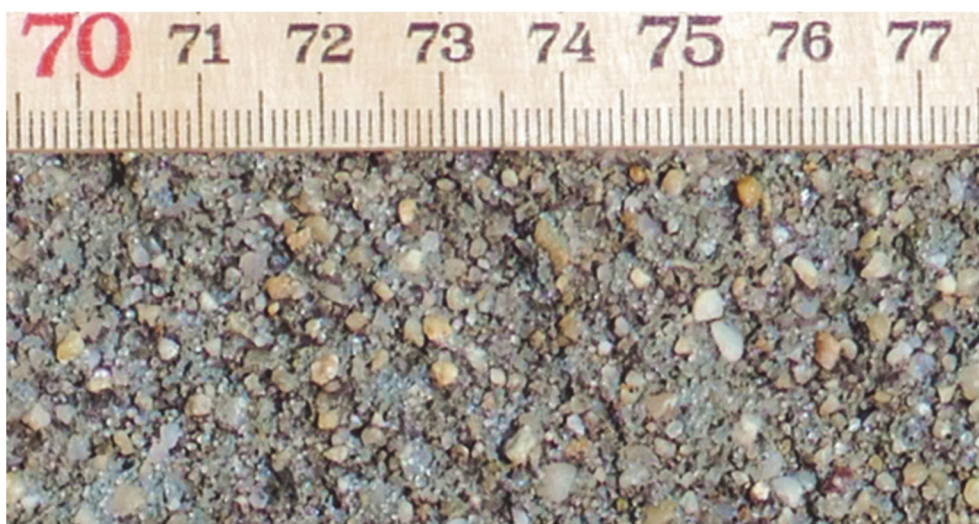
För reparation av ytliga betongskador finns det ett stort antal produkter att välja mellan. I vattenkraftssammanhang används vanligtvis cementbaserade material eller hårdplaster för reparation av ytskador. Hårdplast är ett polymer som görs hårt genom tillsats av en härdare. Hårdplast är ett samlingsnamn för produkter som bland annat baseras på akrylharts, epoxiharts och polyuretan/polyurea.

Vilken hårdplast som bör användas vid ett reparationsarbete styrs framförallt av de rådande förutsättningarna vid den skadade konstruktionen. Olika produkter fungerar olika bra i olika miljöer, exempelvis alkaliska eller sura miljöer. Likaså varierar förmågan att tåla höga temperaturer eller överbrygga rörliga sprickor.

Ur ett praktiskt perspektiv kan vissa hårdplaster appliceras direkt på ett fuktigt underlag eller vid låga temperaturer medan andra inte kan det. Därutöver kan härdtiden variera mellan olika produkter. Till sist kan det även finnas miljö- och hälsoaspekter att ta hänsyn till vid valet av hårdplast. I denna rapport kommer hårdplaster att benämnas som polymerbaserade reparationsmaterial.

I denna studie kommer ett så kallat Chesterton-bruk att utgöra den produkt som får representera gruppen polymerbaserade reparationsmaterial. Chesterton är ett amerikanskt företag som bland annat tillhandahåller reparationssystem för ytligt skadade betongkonstruktioner där ytans beständighet behöver förbättras.

Valet av Chesterton grundas på att materialet användes i stor omfattning på 1990-talet för att reparera skadade betongkonstruktioner vid dammanläggningar. Vid tidpunkten användes huvudsakligen två epoxibaserade produkter – ARC 790 H och ARC 790 V. ARC 790 H användes på horisontella ytor medan ARC 790 V på vertikala ytor. De två produkterna kan normalt sett skiljas åt visuellt genom att ARC 790 H innehåller grövre kvartspartiklar (Figur 1) än ARC 790 V (Figur 2).



Figur 1. Närbild på lagningsbruk av typ Chesterton ARC 790 H. Notera de förhållandevis grova partiklarna i ytan. Lagningsbruket applicerades i mitten av 1990-talet på ett skadat skibord. Måttstock som referens.



Figur 2. Närbild på lagningsbruk av typ Chesterton ARC 790 V. Notera de förhållandevis fina partiklarna i ytan. Lagningsbruket applicerades i mitten av 1990-talet på sidorna av två utskovspelare. Måttstock som referens.

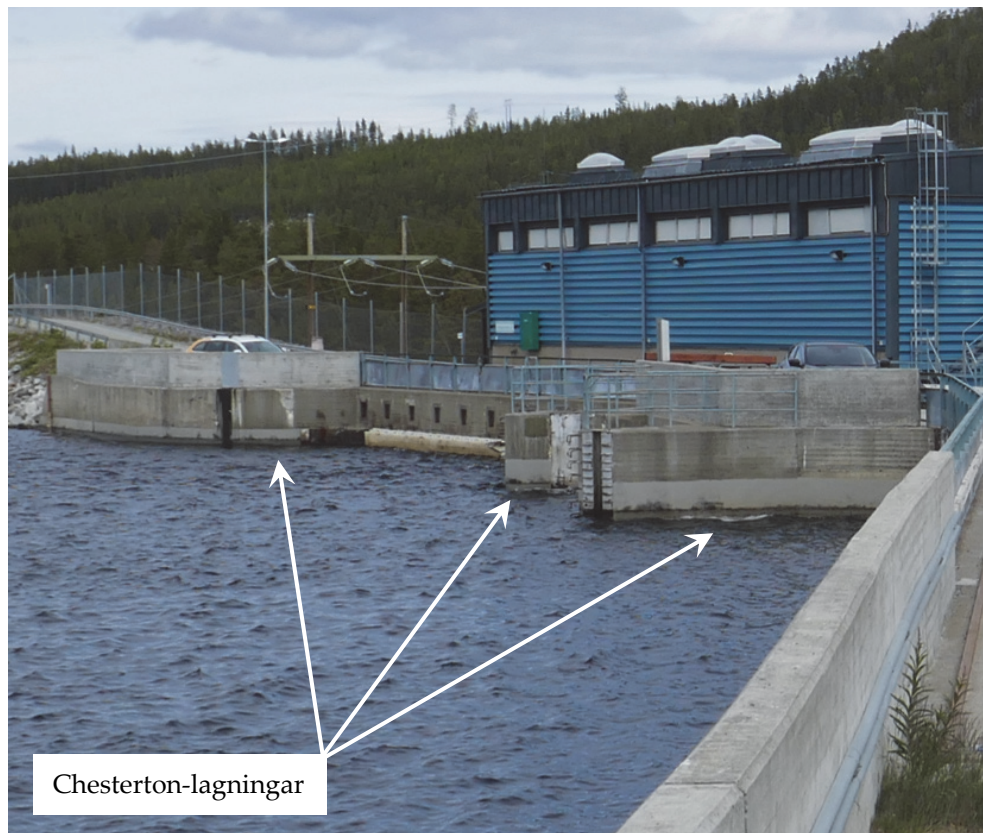
Dammanläggningen som är föremål för föreliggande studie började byggas under hösten 1957. Det tillhörande kraftverket togs i drift drygt tre år senare. Författaren har inte haft tillgång till information om betongens faktiska sammansättning och proportionering, men betongen antas vara typisk för den aktuella tidsperioden.

I en skrift kring betongteknikens utveckling under svensk vattenkraftsutbyggnad anger Rosenqvist (2018) att en kubikmeter betong vanligtvis innehöll cirka 300 kg långsamt hårdnande cement (LH-cement) vid dammbyggen i slutet av 1950-talet. Betongens vattencementtal (vct) låg ofta kring 0,50. Luftporbildande tillsatsmedel tillsattes i regel vid betongmassans blandning med syftet att förbättra betongens frostbeständighet. LH-cementbetong har generellt uppvisat god beständighet i vattenkraftsmiljön. Avsaknad av luftporbildande tillsatsmedel eller att för lite medel tillsattes kan dock vara orsaker när skador likväl har uppkommit.

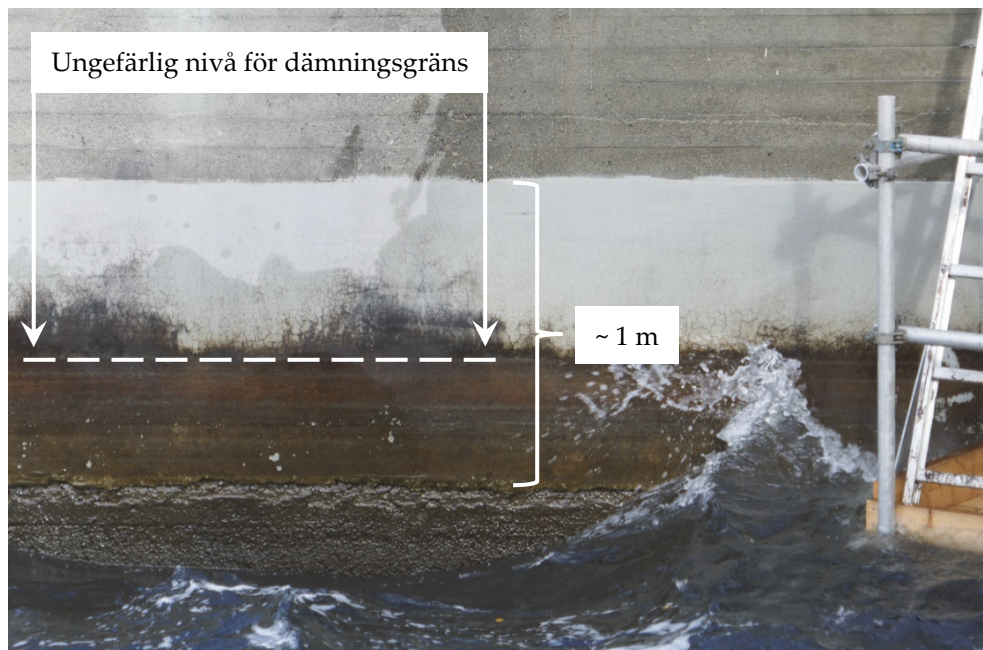
Trots att betongen vid den aktuella dammanläggningen sannolikt sammansattes och proportionerades enligt gällande anvisningar uppstod det med tiden skador längs vattenlinjen på dammens uppströmssida. Eftersom regleringsamplituden i magasinet är 0,5 m hade skador uppkommit främst inom detta område. För att bromsa nedbrytningen beslutades det i början av 1990-talet att vidta åtgärder.

Reparationsarbetet utfördes i mitten av 1990-talet genom att ett Chesterton-bruk av typ ARC 790 V applicerades utmed de mest skadade partierna av dammen. Dessa partier återfanns främst runt intaget till kraftverket och vid det tidigare flottningsutskovet (Figur 3). Chesterton-bruket applicerades för hand i ett band med en höjd av ungefär 1 m. Centrum för bandet ligger i nivå med magasinet's dämningssgräns. Tjockleken på lagningen varierar sannolikt med djupet på de underliggande skadorna, men bör enligt tillverkarens instruktioner inte understiga 6 mm.

I samband med avsänkt magasin och kraftigare sjögång kan skador fortfarande skymtas nedtill i övergången mellan Chesterton-bruket och ursprunglig betong (Figur 4). Om det rör sig om nya eller gamla skador har ej gått att fastställa.



Figur 3. Reparationer i vattenlinjen utfördes medelst Chesterton-bruk runt om intaget och flottsutskovet.



Figur 4. Chesterton-bruk applicerades i ett band om cirka 1 m höjd med centrum i nivå med dämmningsgränsen. I övergången nedtill mellan Chesterton-bruk och ursprunglig betong kan mindre skador skyntas.

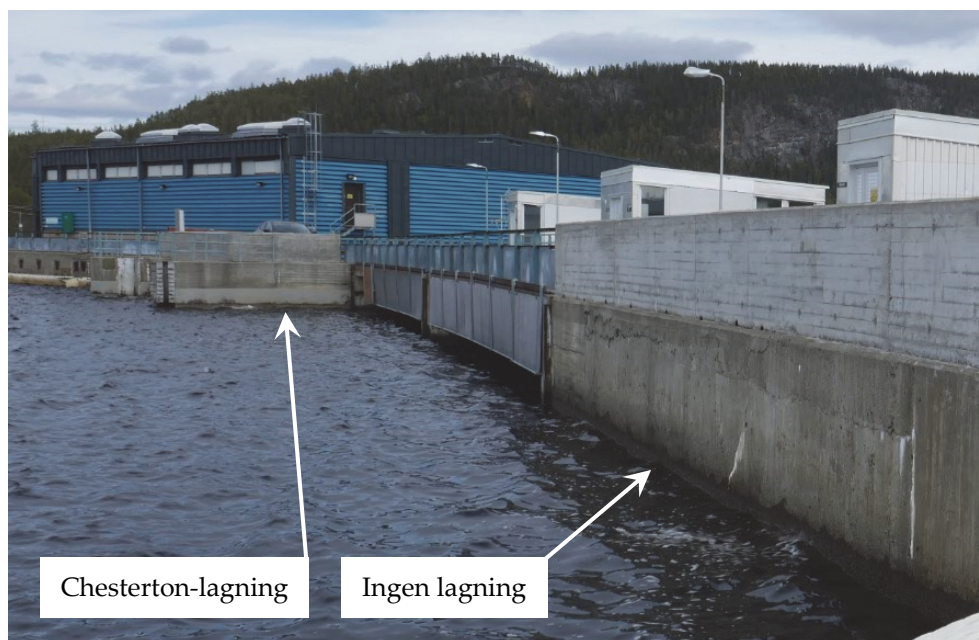
3 Genomförande av praktiskt arbete

3.1 PLANERING AV STUDIEN

Inom ramen för denna studie skulle rådande fuktnivåer bestämmas vid olika djup i betongen bakom en Chesterton-lagning. Erhållna resultat skulle därefter jämföras med motsvarande fuktnivåer i betong utan Chesterton-lagning. För att jämförelsen ska bli relevant är det viktigt att de två provtagningsplatserna finns inom samma dammanläggning och att de geografiskt sett befinner sig nära varandra. Detta för att öka sannolikheten att betongen har liknande sammansättning och att den har utsatts för samma exponeringsmiljö både innan och efter reparationsarbetet.

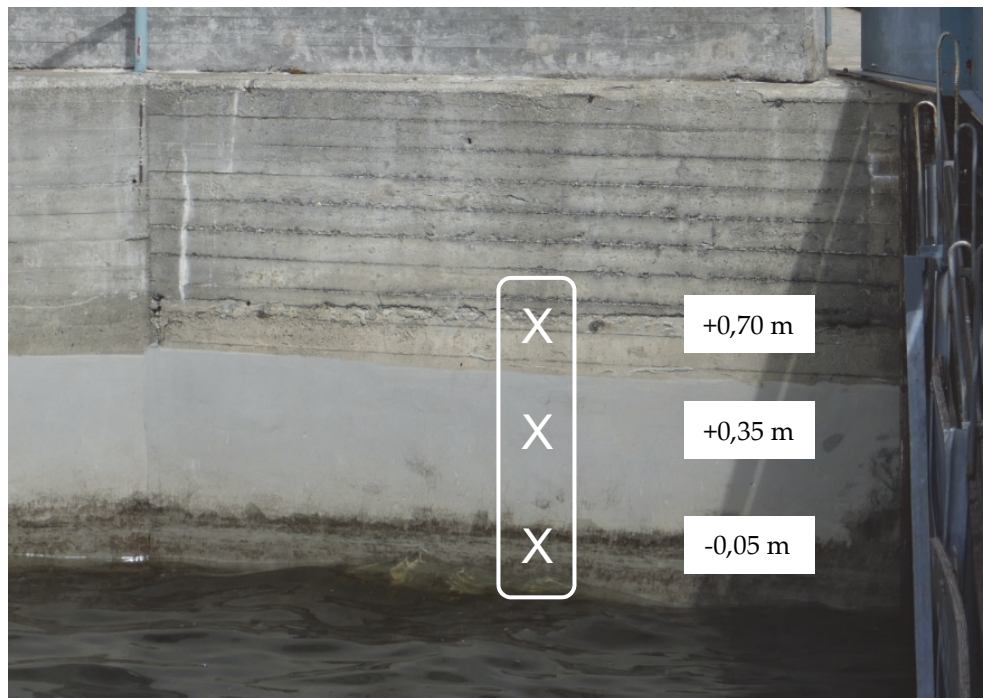
Till följd av att inte alla betongkonstruktioner på dammanläggningens uppströms-sida var i behov av reparationer i mitten av 1990-talet utelämnades några sträckor längs uppströmssidan. Tack vare detta fanns det två platser inte alltför långt ifrån varandra som ansågs lämpliga för provtagning.

Den första provtagningsplatsen låg till vänster om utskovspartiet där betongytan hade reparerats med Chesterton-bruk (Figur 5). Den andra provtagningsplatsen låg till höger om utskovspartiet där betongytan ej hade reparerats.

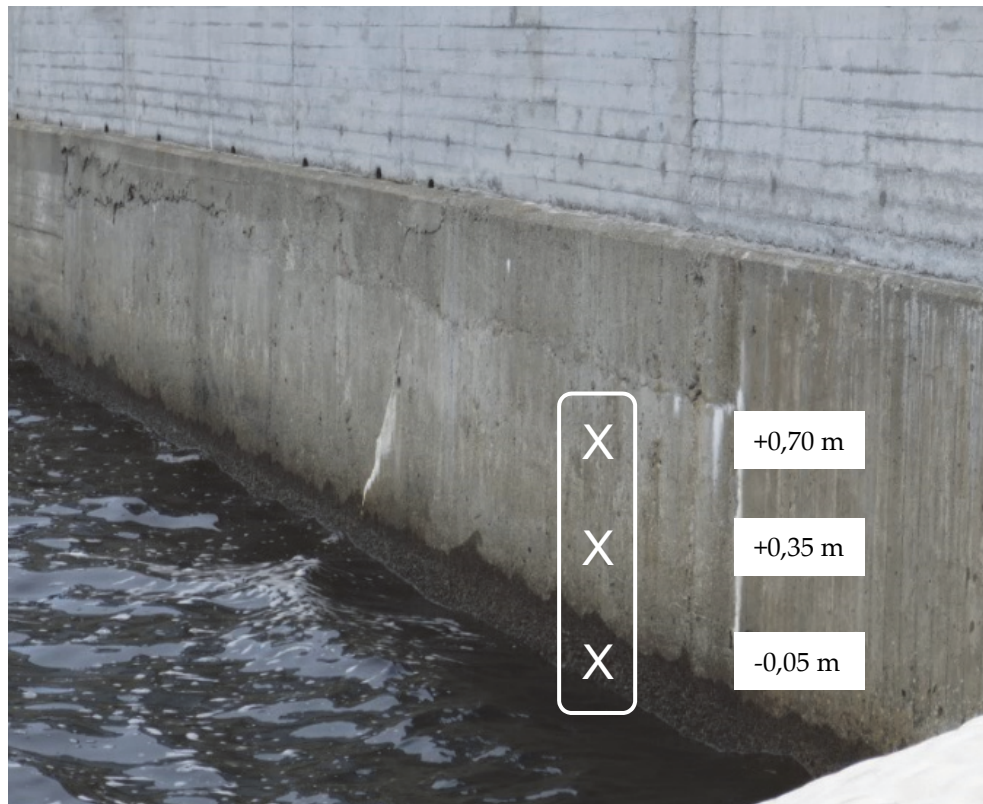


Figur 5. De två provtagningsplatserna med och utan Chesterton-lagning på respektive sida om utskovspartiet.

Vid provtagningsplatsen för Chesterton-lagningen skulle det tas ut betongkärnor på tre nivåer. Dessa nivåer låg (1) vid dämmningsgräns, (2) mellan dämmningsgräns och övre kant för Chesterton-lagningen, samt (3) ovanför Chesterton-lagningen. Placering av de tre betongkärnorna framgår av Figur 6. Vid provtagningsplatsen utan Chesterton-bruk skulle betongkärnor tas ut på motsvarande nivåer (Figur 7).



Figur 6. Placering av de tre betongkärnorna som skulle borraras ut vid provtagningsplatsen för Chesterton-bruk. Nivåangivelserna till höger anger avståndet uttryckt i meter relativt magasinets dämmningsgräns.



Figur 7. Placering av de tre betongkärnorna som skulle borraras ut vid provtagningsplatsen utan reparationer. Nivåangivelserna till höger anger avståndet uttryckt i meter relativt magasinets dämmningsgräns.

3.2 UTBORRNING AV BETONGKÄRNOR

För utborrning av betongkärnorna anlätades Bygg & Rep Rolf Strömberg AB. Innan borrhingsarbetet inleddes monterades en provisorisk arbetsställning för att arbetet skulle kunna utföras under säkra förhållanden (Figur 8). Borrhingsarbetet utfördes den 25 och 26 september 2018. Placeringen av betongkärnorna justerades så att de borrades ut mellan förekommande armeringsjärn (Figur 9).

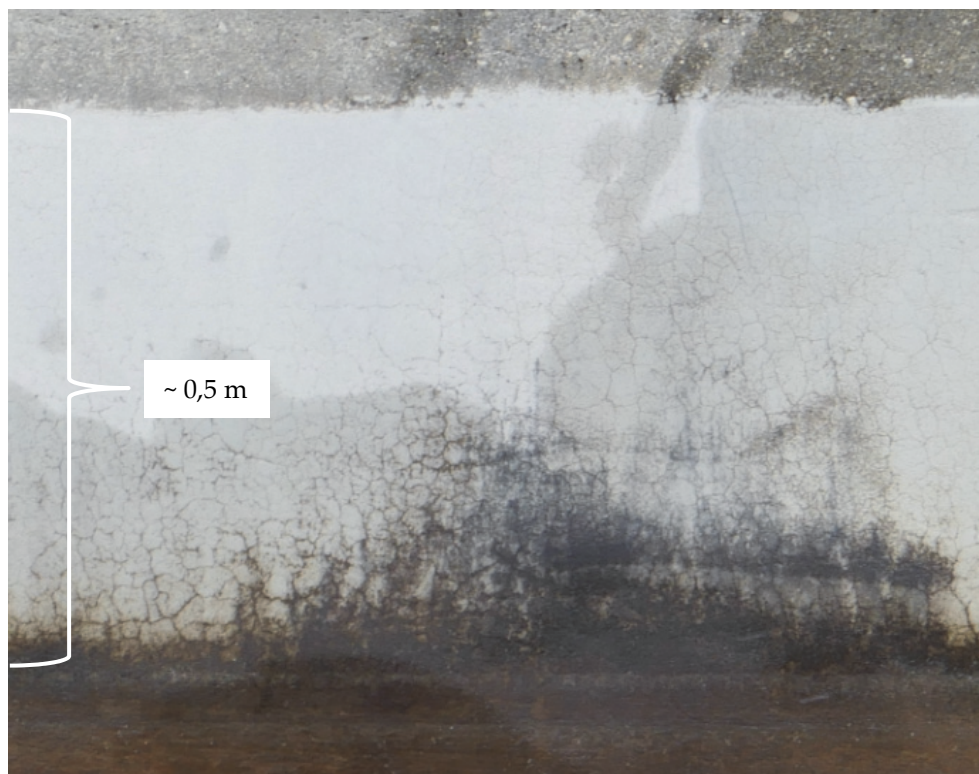
Okulärt noterades ett oregelbundet krackeleringsmönster i Chesterton-lagningen, vilket framgår av både Figur 9 och Figur 10. Liknande observationer har tidigare gjorts av Björkenstam (2001) och Rosenqvist (2019) rörande Chesterton-lagningar utförda på skibord. Något samband mellan krackeleringsmönstret och eventuell avsaknad av vidhäftning mellan Chesterton-bruk och betong har ej gått att finna.



Figur 8. Borrhning utfördes från en provisorisk arbetsställning som flyttades mellan provtagningsplatserna.



Figur 9. Läget för en betongkärna (X) anpassades så att den borrades ut mellan förekommande armeringsjärn.



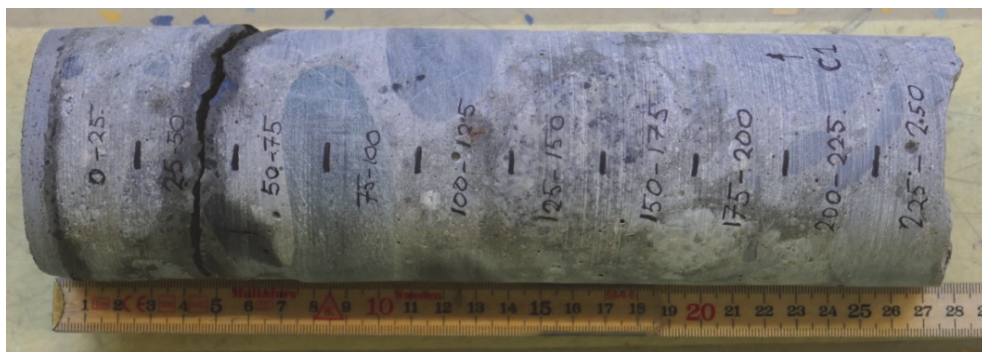
Figur 10. Ett oregelbundet krackeleringsmönster noterades i Chesterton-lagningen vid provtagningsplatsen.

De utborrade betongkärnorna hade en diameter av 75 mm och var upp till 300 mm långa. Totalt borrades det ut sex betongkärnor fördelade på tre kärnor för vardera provtagningsplats. Borrhålen gjöts igen medelst reparationsbetong av typ Weber 932. Då det färdigblandade bruket var lättflytande monterades formar för att hålla det på plats (Figur 11). Formarna togs bort efter en vecka och ytan återställdes.

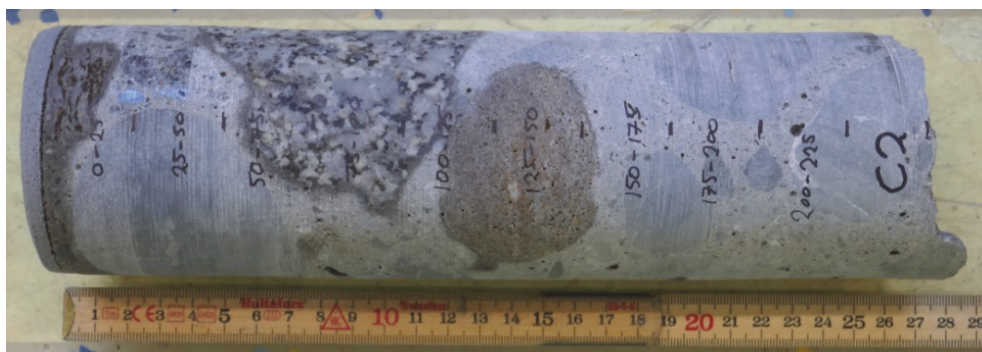


Figur 11. Borrhålen gjöts igen med reparationsbetong. Formar monterades för att hålla bruket på plats i hålen.

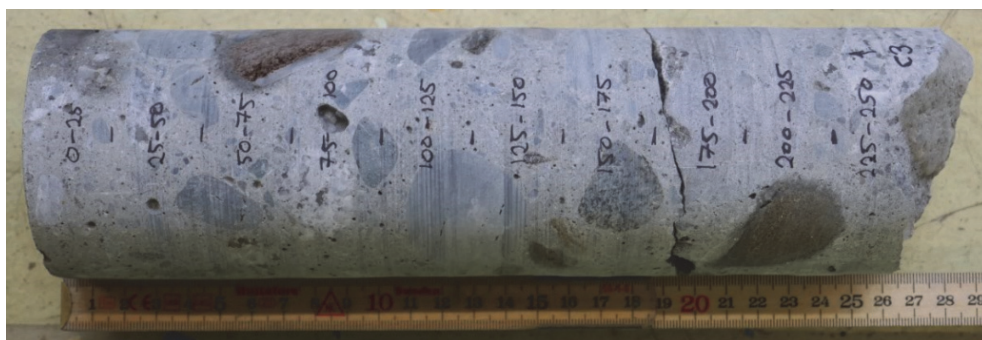
Vid provtagningsplatsen med Chesterton-bruk borrades det ut tre betongkärnor. Den nedre kärnan borrades ut cirka 5 cm under dämmningsgränsen och benämns "Chesterton -0,05 m". Måttangivelsen syftar på betongkärnans placering relativt dämmningsgränsen. Kärnan avbildas i Figur 12. Den mellersta kärnan togs ut cirka 35 cm över dämmningsgränsen och betecknas "Chesterton +0,35 m". Betongkärnan avbildas i Figur 13. Den övre kärnan borrades ut cirka 70 cm över dämmningsgränsen och benämns "Chesterton +0,70 m". Kärnan avbildas i Figur 14.



Figur 12. Betongkärna "Chesterton -0,05 m" efter uppmärkning. Notera Chesterton-bruket ytterst (t.v.).



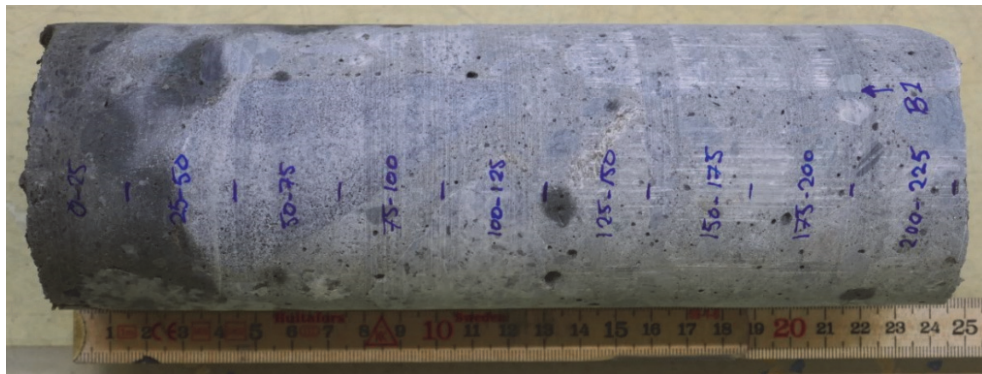
Figur 13. Betongkärna "Chesterton +0,35 m" efter uppmärkning. Notera Chesterton-bruket ytterst (t.v.).



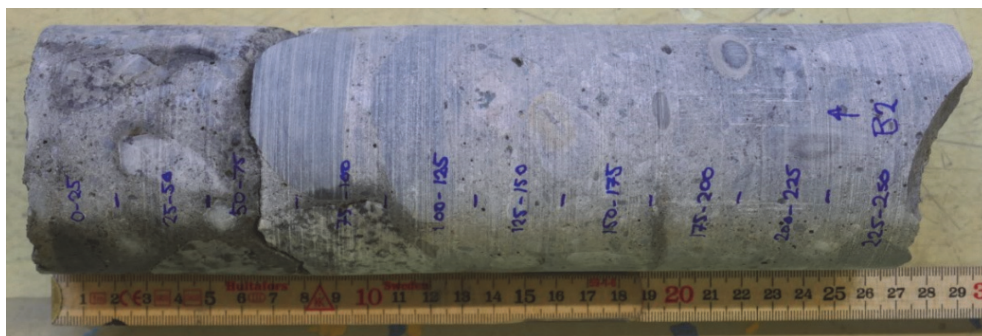
Figur 14. Betongkärna "Chesterton +0,70 m" efter uppmärkning. Notera att kärnan saknar Chesterton-bruk.

De två nedre betongkärnorna (-0,05 m och +0,35 m) har Chesterton-bruk på ytan medan den övre kärnan (+0,70 m) saknar Chesterton-bruk. Vidhäftning rådde mellan Chesterton-bruket och betongen på de utborrade kärnorna.

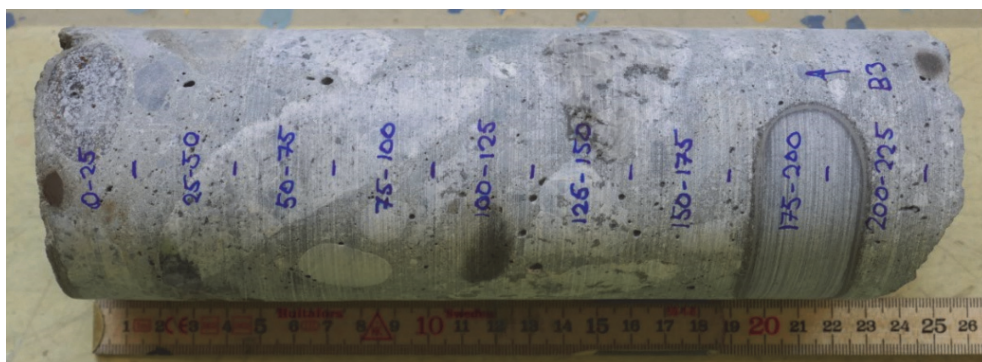
Vid provtagningsplatsen utan Chesterton-bruk togs det också ut tre betongkärnor. Kärnorna borrades ut vid ungefär motsvarande nivåer relativt dämpningsgränsen. De tre betongkärnorna betecknas "Betong -0,05 m", "Betong +0,35 m", samt "Betong +0,70 m". Kärnorna avbildas i Figur 15, Figur 16 och Figur 17.



Figur 15. Betongkärna "Betong -0,05 m" efter uppmärkning. Notera konturen av en skrovlig yta ytterst (t.v.).



Figur 16. Betongkärna "Betong +0,35 m" efter uppmärkning.



Figur 17. Betongkärna "Betong +0,70 m" efter uppmärkning.

3.3 PROVNINGSMETODER

För beskrivning av rådande fuktnivåer i betongen, och hur dessa varierar inom och mellan de två provtagningsplatserna, har betongens vattenmättnadsgrad bestämts vid olika avstånd från ytan i de utborrade betongkärnorna. Inledande mätningar utfördes i fält medan övriga mätningar utfördes i laboratoriemiljö. I laboratoriet bestämdes även betongens fuktinnehåll vid kapillärmättnad.

3.3.1 Bestämning av vattenmättnadsgrad

Det praktiska tillvägagångssättet vid bestämning av betongs vattenmättnadsgrad (S) styrs av följande samband:

$$S = \frac{m_{\text{aktuell}} - m_{105}}{m_{\text{mättad}} - m_{105}}$$

m_{aktuell} är betongens massa vid tillfället då den borrar ut ur konstruktionen, m_{105} är massan efter torkning vid 105 °C och $m_{\text{mättad}}$ är massan i vattenmättat tillstånd.

Samtliga betongkärnor märktes upp när de hade borrats ut (Figur 12 – Figur 17). Uppmärksningen syftade till att dela in kärnorna i 25 mm långa bitar som skulle användas för att bestämma hur vattenmättnadsgraden varierar med djupet från betongkärnans överyta. Kärnorna fotograferades av innan de delades upp i små provbitar som omgående vägdes (m_{aktuell}). Beroende på förekomsten av stenar i betongen delades respektive del (25 mm) upp i en, två eller tre bitar. Provbitarna förpackades därefter individuellt i plastpåsar för transport till Vattenfalls betonglaboratorium i Älvkarleby för vidare hantering.

Provbitar som skulle användas för bestämning av betongens vattenmättnadsgrad placerades i torkskåp vid 105 °C. Efter 28 dygn vägdes provbitarna på nytt för att bestämma massan i torrt tillstånd (m_{105}). Därefter mättes provbitarna i enlighet med en metod beskriven av Fagerlund (1977). Efter att provbitarna vattenmättats förvarades de i ett vattenfyllt kärl. Provbitarna låg i vatten i tre månader innan de vägdes på nytt för att bestämma massan i vattenmättat tillstånd ($m_{\text{mättad}}$).

3.3.2 Bestämning av fuktinnehåll vid kapillärmättnad

De provbitar som skulle användas för bestämning av betongens fuktinnehåll vid kapillärmättnad förvarades vid 20 °C och 65 % relativ fuktighet under 28 dygn innan kapillärsugningstestet inleddes. Kapillärsugningstestet utfördes sedan i enlighet med det tillvägagångssätt som föreskrivs i EN 15801.

Trots att kapillärmättnad nåddes i provbitarna redan inom ett dygn fortsatte testet i ytterligare drygt två månader innan det avslutades. Fuktopptagningens hastighet innan och efter kapillärmättnad kan uppskattas genom linjär regressionsanalys om provbitarnas massa plottas mot kvadratroten av tiden. Provbitarnas massa vid kapillärmättnad antas vara skärningspunkten mellan regressionslinjerna som representerar fuktopptagning innan respektive efter kapillärmättnad.

4 Resultat och diskussion

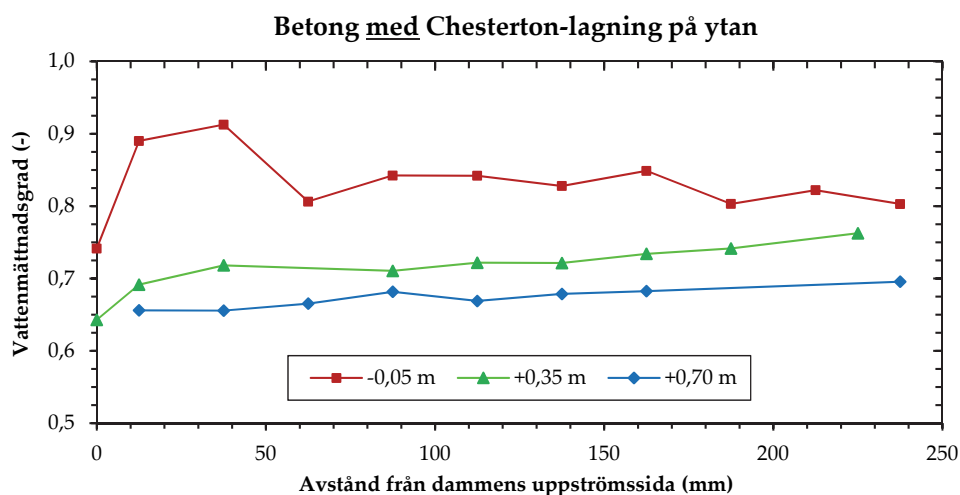
I följande avsnitt redovisas resultaten från utförda mätningar för bestämning av vattenmättnadsgraden i betong med och utan Chesterton-bruk. Resultaten från bestämningen av fukttinnehållet vid kapillärmättnad presenteras också. Till sist diskuteras lämpligheten att använda Chesterton-bruk vid reparationsåtgärder.

Kommande diskussioner av erhållna resultat bör ses i ljuset av att det endast har borrats ut en betongkärna från respektive nivå vid de två provtagningsplatserna. Föreliggande studie är följaktligen begränsad både vad gäller antalet undersökta dammanläggningar och antalet uttagna kärnor från provtagningsplatserna.

4.1 BETONGENS VATTENMÄTNADSGRAD

4.1.1 Betong med Chesterton-lagning

I Figur 18 redovisas resultaten från bestämning av vattenmättnadsgraden i betong från provtagningsplatsen med Chesterton-lagning (Figur 6 och Figur 8). Resultaten visar att de högsta uppmätta värdena finns vid nivån -0,05 m, vilket är strax under magasinets dämningssgräns. Chesterton-brukets vattenmättnadsgrad uppmättes till 0,75 medan motsvarande värden i betongen strax bakom bruket ligger runt 0,90. På djupet 50–200 mm från ytan ligger betongens vattenmättnadsgrad runt 0,83–0,84. På ytterligare större djup sjunker vattenmättnadsgraden ned mot 0,80.



Figur 18. Vattenmättnadsgraden i de tre betongkärnorna från provtagningsplatsen med Chesterton-bruk.

Sprickan som syns runt djupet 40–50 mm i betongkärnan från nivån -0,05 m (Figur 12) har antingen funnits i betongen sedan tidigare eller uppkommit vid borrhänsarbetet till följd av en lokal svaghet i betongen. Om sprickan var vattenfylld sedan tidigare eller blev det under borrhänsarbetet kan det förklara det högre värdet vid djupet 37,5 mm. Då de uppmätta värdena på vardera sidan om sprickan skiljer sig åt antas det att betongen inte nämnvärt har påverkats av vatteninträängning utmed

sprickan. Antagandet innebär att det kan vara rimligt med en vattenmättnadsgrad uppåt 0,90 i betongen direkt bakom Chesterton-bruket vid nivån -0,05 m.

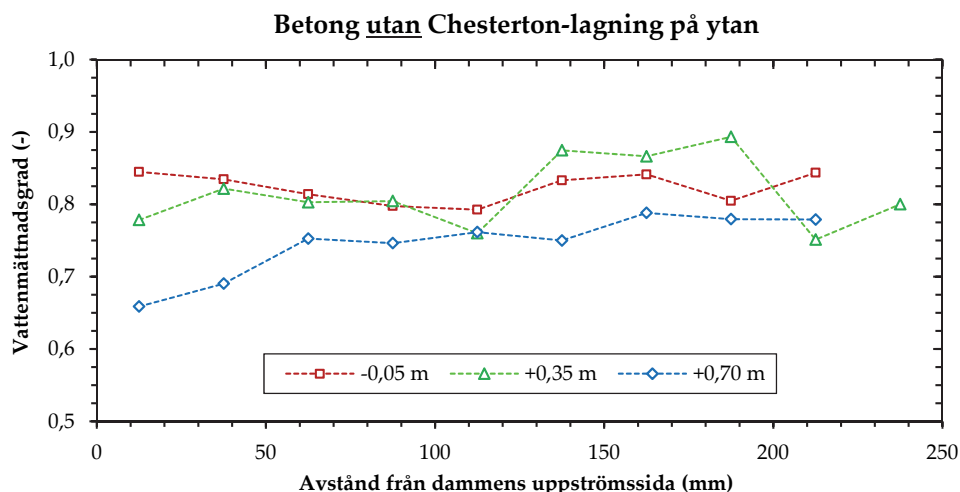
Vid nivån +0,35 m är vattenmättnadsgraden i det ytterst belägna Chesterton-bruket drygt 0,65. I betongen bakom Chesterton-bruket ligger vattenmättnadsgraden strax under 0,70. På större djup från ytan ökar sedan betongens vattenmättnadsgrad till 0,75 och antas längre in i dammen sammanfalla med värden för nivån -0,05 m.

Vid nivån +0,70 m, vilket är drygt 0,2 m ovanför Chesterton-lagningens övre kant, ligger betongens vattenmättnadsgrad runt 0,65. På större djup från betongens yta ökar sedan vattenmättnadsgraden till 0,70 och antas längre in i dammen sammanfalla med värden för nivåerna -0,05 m och +0,35 m.

De uppmätta värdena ska ses i ljuset av att Fagerlund (1977) anger att den kritiska vattenmättnadsgraden för normal gjutbetong vanligen ligger mellan 0,75 och 0,90. Vid vattenmättnadsgrader högre än den kritiska vattenmättnadsgraden är risken stor för skador vid frysning. Den kritiska vattenmättnadsgraden är dock inte ett fast värde, utan varierar med betongens sammansättning, rådande temperaturförhållanden och eventuellt åldrande i form av exempelvis urlakning.

4.1.2 Betong utan lagning

I Figur 19 redovisas resultaten från bestämning av vattenmättnadsgraden i betong från provtagningsplatsen utan Chesterton-lagning (Figur 7 och Figur 11). Även vid denna provtagningsplats uppmättes de högsta värdena vid nivån -0,05 m, det vill säga strax under magasinets dämmningsgräns. Vattenmättnadsgraden i det yttersta skiktet är runt 0,85 för att vid större djup från ytan ligga strax över 0,80.



Figur 19. Vattenmättnadsgraden i de tre betongkärnorna från provtagningsplatsen utan Chesterton-bruk.

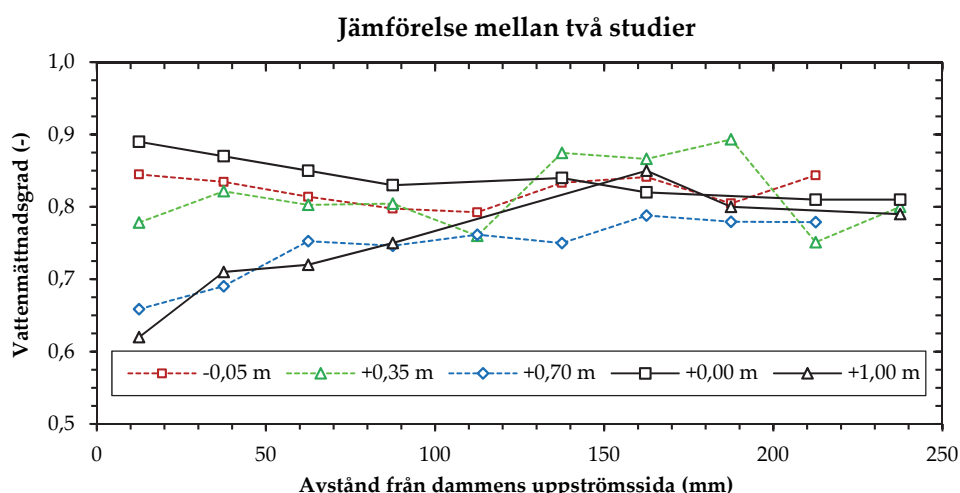
Vid nivån +0,35 m är betongens vattenmättnadsgrad i det ytterst belägna skiktet cirka 0,78, vilket är något lägre jämfört med vid nivån -0,05 m. På större djup är vattenmättnadsgraden runt 0,80 med undantag för djup mellan 140 och 190 mm där värden uppåt 0,90 erhöles. Längre in i dammen återgår värdena till att ligga

runt 0,80. Orsaken till de lokalt högre värdena kan vara försämring i betongens kvalitet, mätfel eller att delar av provkropparna försvunnit i hanteringen.

Vid nivån +0,70 m är betongens vattenmättnadsgrad i det ytterst belägna skiktet cirka 0,66, vilket är lägre jämfört med de andra nivåerna. Därefter stiger vattenmättnadsgraden och planar ut runt 0,75–0,80 vid djup större än 50 mm från ytan.

Vad som också kan utläsas av resultaten i Figur 19 är att vattenmättnadsgraden i betongen vid djup större än 100 mm troligtvis är densamma för de tre nivåerna. Vidare framgår det av Figur 19 att betongens vattenmättnadsgrad i ytskiktet sjunker med ökat vertikalt avstånd till magasinets dämpningsgräns.

Rosenqvist (2016) har i en tidigare studie bestämt vattenmättnadsgraden i betong härstammande från en damm som byggdes åren 1954–1958. Eftersom både denna damm och dammen i föreliggande studie har uppförts under samma tidsperiod är det rimligt att anta att de byggdes på ett likartat sätt och med betong av likvärdig sammansättning. En jämförelse av resultaten från föreliggande studie med resultaten redovisade i Rosenqvist (2016) presenteras i Figur 20.



Figur 20. Jämförelse av resultat från föreliggande studie beträffande vattenmättnadsgrader i betong utan Chesterton-lagning med resultat (svarta linjer) från en betongdamm undersökt av Rosenqvist (2016).

Jämförelsen visar på ett flertal likheter beträffande betongens vattenmättnadsgrad i både absoluta tal och skillnader mellan olika nivåer respektive djup från betongens yta. I nivå med dämpningsgränsen är betongens vattenmättnadsgrad som högst vid ytan för att längre in successivt sjunka ned mot ett värde runt 0,80. Vid nivåer över dämpningsgränsen (+0,70 respektive +1,00) ligger vattenmättnadsgraden runt 0,60–0,65 för att vid större djup från ytan successivt stiga mot värden runt 0,80.

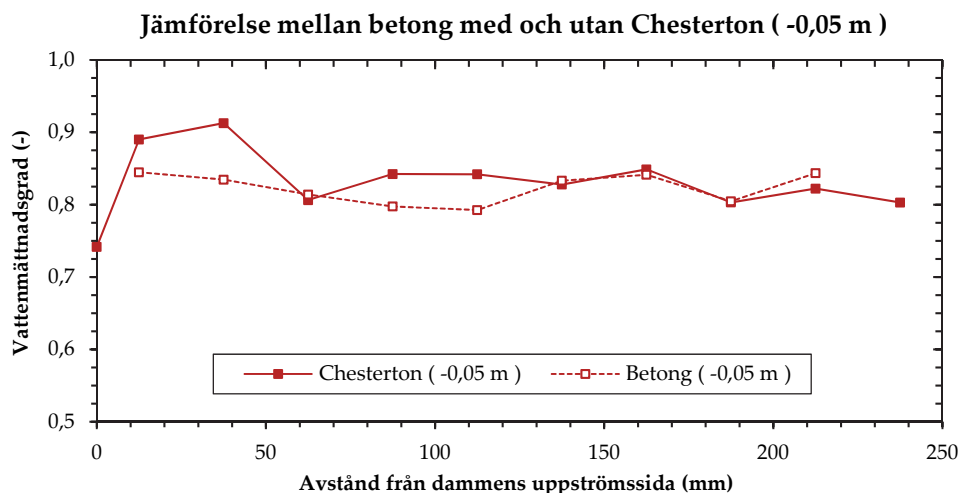
Resultaten från både föreliggande studie och studien av Rosenqvist (2016) visar att fuktupptagning sker där betongen står i ständig kontakt med vatten. Uttorkning sker vid högre nivåer där betongens yta sällan kommer i kontakt med vatten. Vid djup runt 150 mm från betongens yta stabiliseras vattenmättnadsgraden runt 0,80. För betong från dammen som ingick i studien av Rosenqvist (2016) motsvarade detta värde betongens vattenmättnadsgrad i kapillärmättat tillstånd.

Vid uttorkning från kapillärmättat tillstånd är det framförallt betongens kapillärporer som gradvis töms på vatten. Fuktupptagning över kapillärmättat tillstånd sker istället på bekostnad av instängd luft i luftporer och andra grova porer. De grova porerna är nämligen för stora för att vattenfyllas genom kapillärsugning.

Enligt Fagerlund (2006) fylls grova porer istället genom att den instängda luften successivt löses i porvattnet och därefter diffunderar ut ur betongen. I takt med denna process ökar risken för frostnedbrytning då betongens frostbeständighet försämras. Genom att jämföra fukttinnehållet i betong med och utan Chestertonlagning kan lagningsskiktets inverkan på betongens frostbeständighet bedömas dels vid nivån för dämmningsgränsen och dels vid nivåer belägna högre upp.

4.1.3 Jämförelser vid olika nivåer

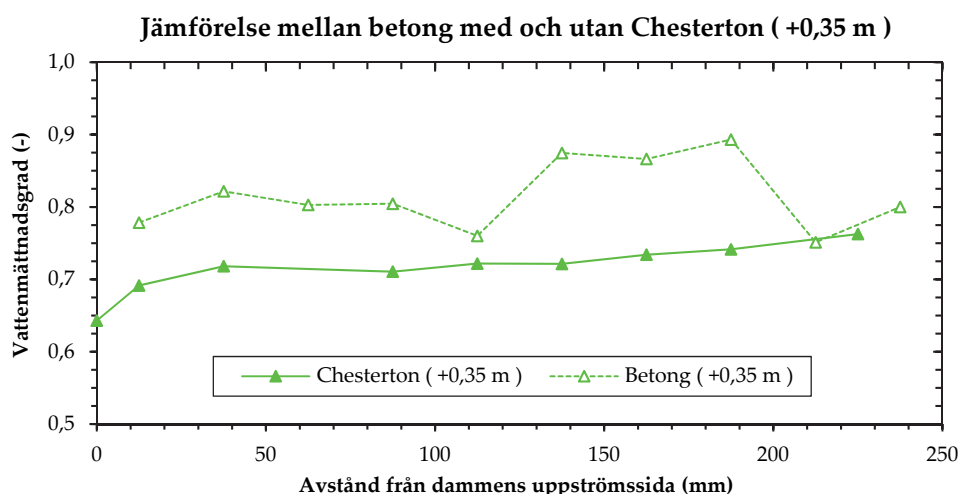
I Figur 21, Figur 22 och Figur 23 jämförs erhållna värden för vattenmättnadsgraden i betong med respektive utan Chestertonlagning vid nivåerna -0,05 m, +0,35 m och +0,70 m. Vad som framgår av jämförelsen i Figur 21 är att vattenmättnadsgraden i betongen strax bakom Chesterton-skiktet i nivå med dämmningsgränsen (-0,05 m) är något förhöjd jämfört med betongen utan lagning. Vid större djup från betongens yta är skillnaderna försumbara. Resultaten skulle kunna indikera att det finns en mindre risk för fuktackumulering i betongskiktet strax bakom Chesterton-bruket vid nivån för dämmningsgränsen. Vid borrningsarbetet kunde dock inga tecken på frostnedbrytning noteras i betongen bakom den aktuella Chestertonlagningen.



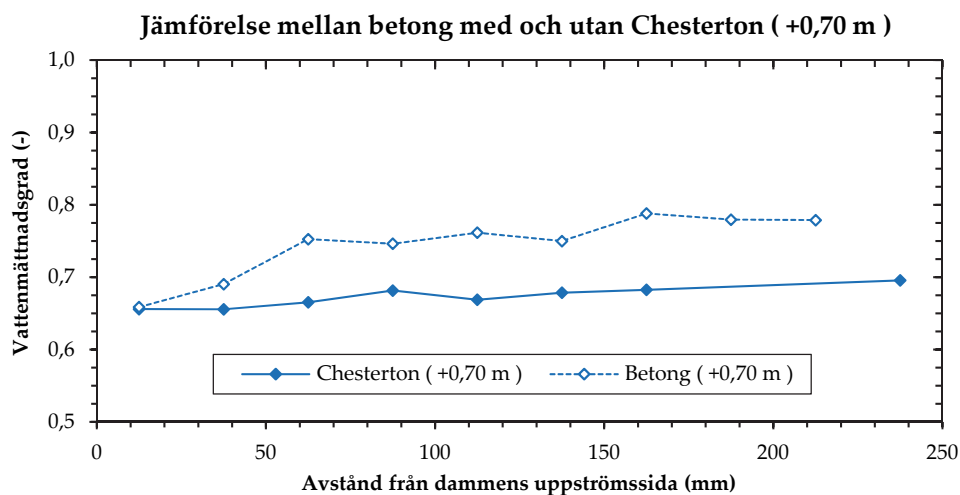
Figur 21. Jämförelse av vattenmättnadsgraden i betong med och utan Chestertonlagning vid nivån -0,05 m.

Vad som framgår av jämförelsen i Figur 22 är att vattenmättnadsgraden i betongen bakom Chestertonlagningen vid nivån +0,35 m är betydligt lägre än motsvarande värden för betongen utan lagning. En förklaring skulle kunna vara att Chestertonlagningen är tillräckligt tät för att hindra det bakomliggande betongskiktet från att absorbera vatten till följd av stänk och periodvis våguppspolning. Uttorkning av betong är generellt sett en långsammare process än fuktupptagning, varför ett skyddande skikt skulle kunna möjliggöra längre perioder av uttorkning.

Vid nivån +0,70 m, vilket är drygt 0,2 m ovanför Chesterton-lagningens övre kant, uppmättes samma vattenmättnadsgrad i det ytterst belägna betongskiktet oavsett provtagningsplats. Vid större djup från betongens yta är vattenmättnadsgraden lägre vid provtagningsplatsen med Chesterton-lagning jämfört med platsen utan lagning. Anledningen till den uppmätta skillnaden kan vara densamma som för nivån +0,35 m. Dessutom utsätts troligtvis betongens yta vid nivån +0,70 m förhållandevis sällan för våguppspolning och vågstänk.



Figur 22. Jämförelse av vattenmättnadsgraden i betong med och utan Chesterton-lagning vid nivån +0,35 m.



Figur 23. Jämförelse av vattenmättnadsgraden i betong med och utan Chesterton-lagning vid nivån +0,70 m.

4.2 BETONGENS FUKTINNEHÅLL VID KAPILLÄRMÄTTNAD

Resultaten över betongens vattenmättnadsgrad vid olika nivåer och på olika djup från dammens uppströmssida (Figur 18 och Figur 19) visar på högt fuktinnehåll i betongen vid nivån för magasinets dämmningsgräns. Då risken för frostnedbrytning är starkt sammankopplad med betongens fuktinnehåll uppstår frågan om rådande fuktinnehåll är så pass högt att det riskerar försämra betongens frostbeständighet.

Enligt Rosenqvist (2018) var det vanligt att vattenbyggnadsbetong i slutet av 1950-talet innehöll cirka 300 kg LH-cement per m³ betong och hade ett vattencementtal runt 0,50. Luftporbildande medel tillsattes vanligtvis för att förbättra betongens frostbeständighet. Det är därför rimligt att anta att luftporbildande medel också användes vid framställningen av betong till den aktuella dammanläggningen.

Enligt Fagerlund (2006) sker fuktupptagning ovanför betongens kapillärmättade tillstånd genom att den instängda luften i luftporer och andra grova porer går i lösning och därefter diffunderar ut ur betongen. På detta sätt vattenfylls de, för betongens frostbeständighet, viktiga luftporerna över tid. Genom att bestämma vikten på provkroppar från dammen vid utborrning och kapillärmättnad är det möjligt att bedöma ifall betongens luftporer håller på att vattenfyllas eller ej.

I Tabell 1 redovisas vikten för sex provkroppar, dels vid tillfället för utborrningen av betongkärnorna och dels efter kapillärmättnad i laboratoriet. Provkropparna B1–B3 kommer från provtagningsplatsen utan Chesterton-lagning medan C1–C3 kommer från platsen med lagning. En provkropp från vardera plats kommer från nivån -0,05 m medan de övriga från +0,70 m. Samtliga provkroppar kommer från större djup än 100 mm från överytan. Resultaten visar att fuktinnehållet i samtliga provkroppar var lägre vid utborrningstillfället än efter kapillärmättnad. Dessa resultat indikerar att betongens luftporer ej håller på att fyllas med vatten.

Tabell 1. Vikten på provkroppar vid utborrningstillfället och efter kapillärmättnad i laboratoriemiljö. Även provkropparnas läge redovisas, samt differensen mellan vikten vid utborrning respektive kapillärmättnad.

	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Provets nivå	-0,05 m	+0,70 m	+0,70 m	+0,70 m	+0,70 m	-0,05 m
Provets djup	187,5 mm	112,5 mm	162,5 mm	212,5 mm	237,5 mm	187,5 mm
m aktuellt (g)	174,00	191,44	194,77	166,91	108,54	198,37
m mättad (g)	174,30	192,24	195,23	167,77	109,60	198,51
Differens (g)	0,30	0,80	0,46	0,86	1,06	0,14
Differens (%)	0,17	0,42	0,24	0,51	0,98	0,07

Differensen i provkropparnas vikt mellan utborrningstillfället och efter kapillärmättnad presenteras också i Tabell 1. Det framgår att betong vid nivån +0,70 m kan absorbera mer vatten än vid nivån -0,05 m, samt att betong med Chesterton-lagning kan absorbera mer vatten än betong utan lagning. Det bör dock påpekas att provkropparnas storlek och varierande andel ballast medför att dessa resultat inte är helt inbördes jämförbara. Trots detta ligger de i linje med resultaten som erhöles vid bestämningen av betongens vattenmättnadsgrad.

4.3 CHESTERTON-LAGNING SOM REPARATIONSMETOD

Summerat tyder den genomförda studien på att det inte föreligger någon förhöjd risk för generell frostnedbrytning av betongen bakom den undersökta Chesterton-lagningen. Vid nivåerna över dämmningsgränsen är de uppmätta vattenmättnadsgraderna dessutom lägre i betongen med Chesterton-lagning än i betongen utan lagning, varför risken för frostsador bakom Chesterton-bruket också blir lägre.

Höga vattenmättnadsgrader uppmättes dock i betongens ytskikt vid magasinets dämmningsgräns både för betong med och utan Chesterton-lagning. Det är därför inte omöjligt att lokala frostsador kan uppkomma i betongens ytskikt framöver. Chesterton-lagningen skyddar dock betongen från nötning av is och drivgods, samt reducerar takten för eventuell urlakning av betongens ytskikt.

Huruvida den något högre vattenmättnadsgraden bakom Chesterton-lagningen, jämfört med betongen utan lagning, beror på ackumulering av fukt vid nivån för dämmningsgränsen går inte att fastställa. Takten för eventuell fuktackumulering är dock låg eftersom skillnaderna knappt är mätbara efter drygt 25 år.

Detsamma gäller i vilken utsträckning Chesterton-lagningen kan ha hindrat vatten från stänk och våg uppsugning att nå in till den bakomliggande betongen vid de två nivåerna ovanför dämmningsgränsen. En anledning till att det inte går att fastställa dessa förhållanden är att Chesterton-brukets fuktegenskaper inte är kända.

Resultaten från föreliggande studie och det faktum att flera Chesterton-lagningar i dagsläget är nära 25 år gamla tyder på att reparationsmetoden är lämplig i svensk vattenkraftsmiljö. Större reparationer förväntas vanligtvis nå en teknisk livslängd om minst 25–30 år, vilket den aktuella lagningen snart gör. Detta utan några större tecken på att Chesterton-bruk eller bakomliggande betong håller på att brytas ned.

Det bör påpekas att eftersom endast en dammanläggning har undersökts i studien utgör resultaten bara en indikation på hur fukttillståndet kan vara bakom liknande Chesterton-lagningar vid andra dammanläggningar. Det är inte heller känt om de aktuella Chesterton-produkterna har modifierats över tid, vilket skulle kunna leda till annorlunda fukttillstånd bakom lagningar utförda vid andra tidpunkter.

För att ytterligare förbättra kunskapsläget gällande Chesterton-lagningar bör fler reparationer undersökas med avseende på både den bakomliggande betongens fukttillstånd och lagningsbrukets fuktegenskaper. Dessutom bör andra typer av polymerbaserade reparationsmaterial undersökas, vilka idag kan komma till användning vid liknande reparationsarbeten på dammanläggningar.

5 Slutsatser

I denna studie har fukttillståndet i betong bakom ett förmodat tätare reparations-skikt i form av ett Chesterton-bruk undersökts experimentellt och sedan jämförts med fukttillståndet i betong utan motsvarande lagningsbruk på ytan. Syftet med studien har varit att bedöma ifall det föreligger förhöjd risk för frostnedbrytning till följd av fuktackumulering i betongen bakom reparationsskiktet. Baserat på undersökningarna och efterföljande diskussion kan följande slutsatser dras:

- Det föreligger inte någon förhöjd risk för generell frostnedbrytning av betongen till följd av fuktackumulering bakom Chesterton-bruket.
- Vattenmättnadsgraden i betongen är högst vid magasinets dämningssgräns och sjunker sedan med ökat vertikalt avstånd till dämningssgränsen. Denna slutsats gäller både för betong med och utan Chesterton-lagning.
- Höga vattenmättnadsgrader närmast ytan vid nivån för dämningssgränsen kan eventuellt leda till lokala frostsador i betongens överyta. Denna risk finns dock både för betong med och utan Chesterton-lagning.
- Ovanför magasinets dämningssgräns är vattenmättnadsgraden betydligt lägre i betong med Chesterton-bruk jämfört med betong utan lagning.
- Fukttillståndet i betongen utan Chesterton-lagning är likvärdigt med det uppmätta fukttillståndet i en annan damm som har undersökts tidigare.
- Den undersökta reparationsmetoden bedöms vara lämplig att använda för reparation av ytskador längs vattenlinjen på betongdammar.

6 Referenser

- [1] Björkenstam E (1999) *Inventering av betongreparationer utförda på svenska vattenkraftsanläggningar*, Elforsk rapport 99:28
- [2] Björkenstam E (2001) *Studie och uppföljning av reparationer utförda på utskov/skibord*, Elforsk rapport 01:29, Elforsk
- [3] Fagerlund G (1977) *The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*, Journal of Materials and Structures, Vol.4, s.231-253
- [4] Fagerlund G (2006) *Moisture design with regard to deterioration of materials and structures – With special reference to frost destruction*, TVBM-3130, Lund University
- [5] Rosenqvist M (2016) *Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures*, TVBM-1036, Lund University
- [6] Rosenqvist M (2018) *Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*, Energiforsk rapport 2018:481, Energiforsk
- [7] Rosenqvist M (2019) *Uppföljning av reparationer på skibord av betong*, Energiforsk rapport 2019:585, Energiforsk

FUKTTILLSTÅND I BETONG BAKOM CHESTERTON-LAGNING

Syftet med studien har varit att bedöma risken för generell frostnedbrytning till följd av fuktackumulering i betongen bakom en lagning med ett förmodat tätare reparationsskikt i form av ett Chesterton-bruk. En lagning genomförd i mitten av 1990-talet längs vattenlinjen på uppströmssidan av en betongdamm som byggdes under slutet av 1950-talet har studerats. Okulär besiktning och utborring av betongkärnor för bestämning av betongens fukttillstånd i form av dess vattenmättnadsgrad har genomförts. Betongkärnor borrades ut från dammen både vid en plats med Chesterton-lagning och en plats utan lagning.

Resultaten tyder på att det inte råder någon förhöjd risk för frostnedbrytning av betongen bakom den undersökta Chesterton-lagningen. Istället finns det indikationer på att bruket hindrar vatten från stänk och våguppspolning att absorberas av betongen ovanför magasinets dämmningsgräns. Lägre vattenmättnadsgrader uppmättes ovanför dämmningsgränsen i betongen med Chesterton-lagning jämfört med betongen utan lagning.

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



Energiforsk