

Fuktupptagning och Frostbeständighet hos Vattenbyggnadsbetong

Frostnedbrytning av betong kan vara en av flera bakomliggande orsaker till skador på betongkonstruktioner i konstant kontakt med sötvatten. I arbetet med avhandlingen 'Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures - Interactions between water absorption, leaching and frost action' har samverkan mellan olika nedbrytningsmekanismer undersökts experimentellt genom fält- och laboratoriestudier.

Det svenska klimatet ställer höga krav på betongens frostbeständighet i konstruktioner i ständig kontakt med vatten. Detta gäller speciellt för betongkonstruktioner i vattenkraftverk. I de södra delarna av landet utsätts konstruktionerna årligen för ett större antal fryscyklar samt korta perioder av sträng kyla. I de norra delarna av landet är förhållandet omvänt, vilket innebär långa perioder av sträng kyla och ett mindre antal fryscyklar.

På vattenkraftskonstruktioner runt om i landet har både ytliga och inre skador på betong observerats. Dessa observationer har väckt frågor om betongkonstruktioners beständighet i vattenkraftsmiljö. Exponeringsmiljön för vattenkraftskonstruktioner kan dessutom likställas med vissa konstruktioner i slussar, kanaler, hamnar och bropelare.

Inom ramen för doktorandprojektet 'Fuktupptagning och frostbeständighet hos vattenbyggnadsbetong' har samverkan mellan olika nedbrytningsmekanismer undersökts experimentellt genom fält- och laboratoriestudier. Den övergripande frågeställningen har varit ifall de observerade skadorna beror på brister i betongens ursprungliga frostbeständighet eller om frostbeständigheten har försämrats med tiden.

AVSKALNING LÅNGS VATTENLINJEN

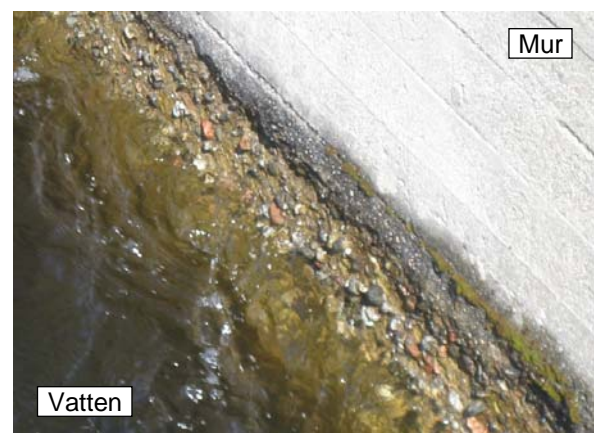
Ett vanligt förekommande nedbrytningsfenomen på vattenkraftsanläggningar är att betongens yta successivt nöts bort vid vattenlinjen och att ballasten friläggs; se Figur 1. I de flesta fall är nedbrytningen långsam medan den i vissa fall till och med har föranlett friläggning av de ytligast belägna armeringsjärnen. De senare fallen gäller främst för vattenkraftsanläggningar vilka uppfördes under 1900-talets första hälft.

I enstaka fall har avskalningstakter närmare 1 mm observerats på vattenkraftsanläggningar uppförda även efter 1950. Ett täckande betongskikt på 50 mm kan således nötas bort inom loppet av 50 år, vilket då leder till förtida reparationsinsatser.

Utseendemässigt påminner skadorna om avskalningar orsakade av tösaltning. I vattenkraftsmiljö förekommer normalt sett inte tösalter varför avskalning till följd av tösaltning kan avfärdas. För konstruktioner där vattennivån är stabil över året är avskalningarna främst koncentrerade till vattenlinjen. Avskalningarna avtar därefter med ökat djup från vattenlinjen. För konstruktioner där vattennivån varierar under året är avskalningarna utspridda inom regleringshöjden. Som en följd av dessa observationer har nötning av is föreslagits som bakomliggande orsak till skadorna.

Nötning av isflak och strömmande vatten bidrar sannolikt till avskalning i närheten av intag och utskov. Invid dessa konstruktioner förekommer högre strömningshastigheter på vattnet, samt att vattenflödet för med sig is och drivgods som kolliderar med konstruktionerna. Nötning av is och drivgods är dock inte huvudorsaken till skadorna vid vattenlinjen då samma typ av skador återfinns på nedströmssidan av vattenkraftverk. Eftersom vattenflödet på nedströmssidan istället för bort is och eventuellt drivgods från konstruktionerna kan samma nötande effekt inte uppstå. I flera fall är dessutom avskalningarna av större omfattning på nedströmssidan än på uppströmssidan.

Under vinterhalvåret är betongen i vattenlinjen för det mesta täckt av is; se Figur 2. Isen täcker betongytan någon decimeter ned under vattenlinjen. Detta visar att det är minusgrader i betongen trots att vattentemperaturen är över fryspunkten.



Figur 1. Frilagd ballast till följd av successiv avskalning av betongens yta i vattenlinjen.



Figur 2. Vanligtvis är betongen i och strax under vattenlinjen täckt av is under vintern.

I de exempel med vattenkraftverk där avskalningarnas omfattning synbart varierar mellan upp- och nedströmssidan finns det indikationer på att variationen hänger samman med vilket väderstreck konstruktionerna ligger i. Detta skulle i så fall tyda på att solstrålningen påverkar antalet fryscyklar i betongen. En betongyta som ligger mot söder utsätts troligtvis för fler fryscyklar än en betongyta som ligger mot norr. Av denna anledning har inverkan av antalet fryscyklar på nedbrytningen av betong i vattenlinjen undersökts.

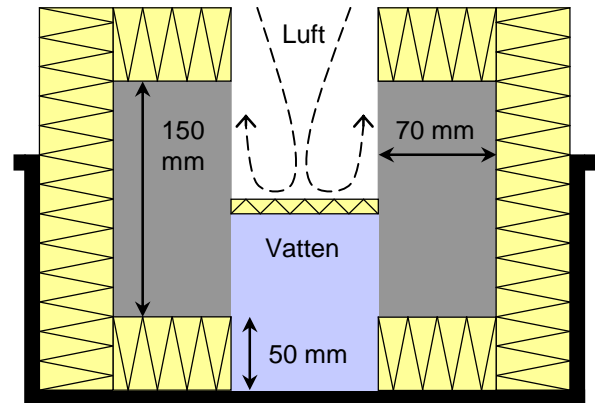
Betongytans frostbeständighet

Tre betongkvaliteter gjöts för att undersöka typisk betong från olika epoker av vattenkraftutbyggnaden; se Tabell 1. Perioden fram till 1930 representerades av betong med vattencementtal (vct) 0,70, perioden 1930-1950 av betong med vct 0,62, samt 1950-1970 av betong med vct 0,54 och lufttillsats.

Frostprovning i sötvatten utfördes enligt Boråsmetoden (SS 13 72 44), samt enligt en metod utvecklad av Rosenqvist m.fl. (2015). Försöksuppställningen till den senare metoden visas i Figur 3. Den grundläggande idén för metoden är att utsätta provkroppar för förhållanden lika de verkliga. Den undre delen av provkroppen står i vatten medan den övre delen befinner sig i luften. Således uppstår en vattenlinje mitt på provkroppen.

Tabell 1. Använda betongkvaliteter för att undersöka frostnedbrytning av betong i vattenlinjen.

vct	Cement [kg/m ³]	Lufthalt [%]	Tryckhållf. [MPa]
0,70	285	2,1	37,3
0,62	325	2,6	44,6
0,54	300	4,1	45,9



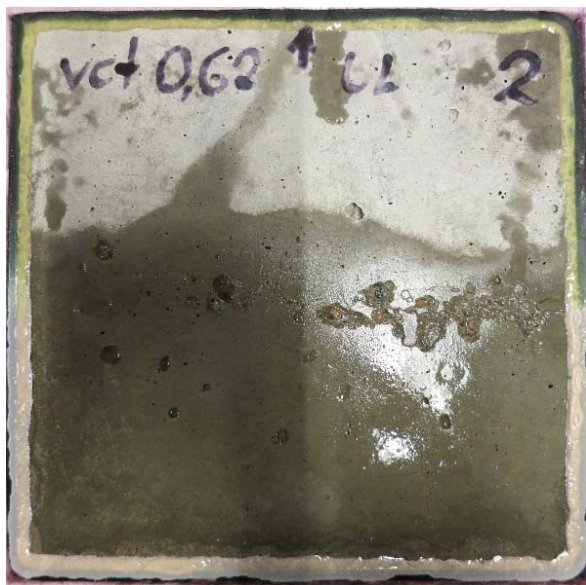
Figur 3. Försöksuppställning för frostprovning av provkroppar ståendes till hälften i vatten.

Under fryscykeln hölls vattentemperaturen över fryspunkten medan lufttemperaturen pendlade mellan -36 °C och $+10\text{ °C}$. Ytterlighetsvärdena valdes med bakgrund av att inom rimlig tid uppnå en temperatur runt -20 °C i betongens ytskikt ovanför vattenlinjen, samt att det skulle bildas ett istäcke på betongytan i och strax under vattenlinjen. Fryscykeln bestod av 7,5 timmar frysnings och 4,5 timmar upptining. Den inledande halvtimmen av frysnings- och upptiningsperioden bestod av att med jämna steg sänka respektive höja lufttemperaturen.

Vid kontroll kunde det konstateras att i slutet av frysperioden hade det bildats ett täcke av is på betongytan. Således kunde de förhållanden som kan ses i Figur 2 återskapas i laboratoriet, det vill säga minusgrader i luften, ofrusen vattenyta, samt bildandet av ett istäcke på betongytan i och strax under vattenlinjen. Provkroppar av de tre betongkvaliteterna utsattes för 112 fryscyklar i försöket.

Även formytans och den sågade ytans frostbeständighet bestämdes enligt Boråsmetoden för de tre betongkvaliteterna. För den sågade ytan uppfyllde samtliga tre betongkvaliteter det högsta kravet på frostbeständighet - *Mycket god*. Detta innebar att avskalningen var mindre än $0,10\text{ kg/m}^2$. För formytan uppfyllde även provkroppar med vct 0,70 och 0,54 kravet för *Mycket god* frostbeständighet. Provkropparna med vct 0,62 hamnade strax över kravet till följd av att en provkropp fick betydligt mer omfattande avskalning än de övriga tre.

Vid frostprovning i försöksuppställningen i Figur 3 kunde ingen avskalning noteras på provkropparna med vct 0,54. Däremot kunde avskalning observeras i och strax under vattenlinjen för provkroppar med vct 0,70 och 0,62; se Figur 4. Avsaknaden av avskalning på provkropparna med vct 0,54 överensstämmer dock inte med verkligheten.



Figur 4. Mindre omfattande avskalning återfinns längs vattenlinjen på en provkropp med vct 0,62.

Betong i vattenkraftsanläggningar utsätts dock för fler nedbrytningsmekanismer än enbart frost. En möjlighet är att samverka mellan flera nedbrytningsmekanismer har orsakat skadorna i vattenlinjen på vattenkraftsanläggningarna.

Vattnet i de svenska vattendragen är för det mesta relativt fattigt på joner. Drugge (2001) visade att halten av kalciumjoner (Ca^{2+}) är betydligt lägre i Luleälven än i många andra vattendrag runt om i världen. Således bör det svenska vattnet ha god förmåga att laka ur kalcium från betongens yta. Likaså bör även isens nötande inverkan beaktas.

Urlakade betongytans frostbeständighet

För att undersöka inverkan av urlakning på betongytans frostbeständighet gjöt Pham och Terzic (2013) provkroppar med vct 0,62 och 0,54. Värdena för lufthalt och tryckhållfasthet varierade endast marginellt jämfört med värdena i Tabell 1. Vid 28 dygns ålder förbereddes provkropparna för frostprovning enligt Boråsmetoden. Alla ytor förutom en försågs med tät gummiduk.

Två försöksserier utfördes i studien. I den första serien utsattes provkropparnas sågade yta för urlakning i avjoniserat vatten med pH 7. Därefter utsattes de eventuellt också för fryscyklar och/eller nötning. I den andra serien användes istället vatten med pH 4 i syfte att accelerera urlakningen. Vattnets pH-värde hölls konstant ($\pm 0,1$) genom automatisk tillsättning av salpetersyra för att neutralisera effekten av urlakade joner.

Följande fyra kombinationer av nedbrytningsmekanismerna frysning (F), urlakning (U) och nötning (N) undersöktes i studien:

- 1) Frysning (F)
- 2) Frysning + Nötning (F+N)
- 3) Urlakning + Frysning (U+F)
- 4) Urlakning + Frysning + Nötning (U+F+N)

För de provkroppar som utsattes för exponeringscykeln U+F+N inleddes försöket med en veckas urlakning i avjoniserat vatten. Därefter följde 7 fryscyklar enligt Boråsmetoden och slutligen utsattes provkropparna för nötning orsakad av skrubbing med stålborste. Exponeringscykeln upprepades fyra gånger per försöksserie.

De provkroppar som erhöll minst avskalningar var de som endast utsattes för F eller F+N. För både vct 0,62 och 0,54 var avskalningarna efter 28 fryscyklar knappt märkbara. Avskalningarna för provkroppar som utsattes för U+F erhöll större avskalningar. Störst avskalningar fick dock U+F+N; se Tabell 2 och Figur 5. Resultaten visar att urlakning försvagar ytans frostbeständighet.

Urlakning i ytan på vattenbyggnadsbetong

I november månad 2013 borrades betongkärnor ut från uppströmssidan av betongdammen vid Ramsele kraftverk. Dammen uppfördes av betong med cement av typ Limhamn LH. Cementhalten var ungefär 340 kg/m^3 och vct cirka 0,5. Vid utboringen av kärnorna var dammen 56 år gammal.

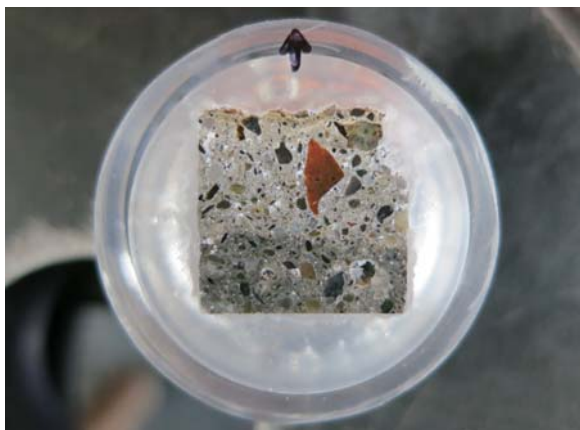
Cementpastans kemiska sammansättning bestämdes medelst mikrosondanalys (EPMA). Mätningarna bekräftade att betong urlakas i kontakt med älvvatten; se Rosenqvist m.fl. (2017). Upp till fem zoner, parallella med betongens yta, identifierades. De yttre zonerna visade sig ha dålig frostbeständighet vid frysning i närvaro av avjoniserat vatten. De olika zonerna var dessutom synliga för ögat genom färgskiftningar i betongen; se Figur 6.

Tabell 2. Avskalningar från provkroppar med vct 0,62 och 0,54 efter totalt 28 fryscyklar. Provkropparna har utsatts för olika kombinationer av frysning (F), urlakning (U) och nötning (N).

vct	F [kg/m ²]	F+N [kg/m ²]	U+F [kg/m ²]	U+F+N [kg/m ²]
0,62	0,01	0,01	0,09	0,13
0,54	0,00	0,00	0,04	0,09



Figur 5. Ytan på provkroppar med vct 0,54 efter avslutat försök. Provkroppen i bild A utsattes enbart för frysning medan provkroppen i bild B utsattes för urlakning, frysning och nötning.



Figur 6. Zoner med olika kemisk sammansättning syns parallellt med betongprovets yta.

Scenario för avskalningar i vattenlinjen

De utförda studierna visar att frostbeständig betong kan frostska under förutsättning att ytan urlakas innan frysning sker. Generellt leder urlakning av betong till ökad kapillärporositet, vilket i sin tur leder till sämre frostbeständighet eftersom andelen frysbart vatten i betongen ökar.

Det mest sannolika scenariot för nedbrytningen av betong längs vattenlinjen är att betongytan utsätts för urlakning under sommarhalvåret. Det yttersta betongskiktet urlakas till den grad att det frostska under det följande vinterhalvåret. Efter att det skadade skiktet fallit eller nötts bort av is och annat drivgods kan processen börja om. Scenariot stämmer väl överens med gjorda observationer av successiv nedbrytning av betongytan i vattenlinjen på vattenkraftsanläggningar i Sverige.

ISLINSBILDNING I BETONGDAMMAR

Skadade områden har i ett flertal fall påträffats långt under den normala vattenlinjen på tunna betongdammar, exempelvis valvdammar och lamelldammar. De skadade områdena kan karakteriseras av att stora sjok av betong lossnat och fallit ner. Dykare har dessutom med handkraft kunnat dra loss ytterligare bitar. Skadorna har i enstaka fall nått ett djup på närmare 200 mm. Armeringsjärnen har då varit helt frilagda.

Den gemensamma faktorn för de skadade betongdammarerna är att de har varit utsatta för långa perioder av sträng kyla vintertid. Eftersom dammarna är relativt tunna och dessutom saknat isolering på nedströmssidan har genomfrysning kunnat ske. Dykare har noterat decimetertjocka istäcken långt under vattenlinjen på dammarnas uppströmssida.

I de flesta fall där skador har upptäckts har dessa åtgärdats och betongdammarerna har isolerats på nedströmssidan för att hindra genomfrysning. I ett fall åtgärdades inte dammen och till slut uppstod det ett hål som var 0,8 m i bredd och 1,2 m i höjd. All lös betong spolades bort av vattnet och enbart armeringen överbyggde hålet efteråt; se Figur 7.



Figur 7. Ett genomgående hål (0,8 m i bredd och 1,2 m i höjd) i en allvarligt skadad betongdamm.

De bakomliggande orsakerna till skadorna har inte utretts ordentligt i samband med åtgärderna. Både undermålig betongkvalitet och effekter av åldring är tänkbara orsaker. En hypotes är att dammarna har drabbats av makroskopisk islinnsbildning, vilket påminner om tjälskjutning i mark. Tjälskjutning inträffar när markytan utsätts för frysning och en frysfront vandrar nedåt i marken. Genom kapillärsugning av grundvatten kan islinstillväxt ske vid frysfronten och orsaka bulor på markytan.

I en tunn betongdamm utan isolering utsätts nedströmssidan för frysning, medan uppströmssidan står i kontakt med vatten. Under vintern kan frysfronten vandra genom dammen och har i några fall orsakat genomfrysning med efterföljande isbildning på uppströmssidan. Av denna anledning har det varit av intresse att undersöka risken för makroskopisk islinnsbildning i hårdnad betong.

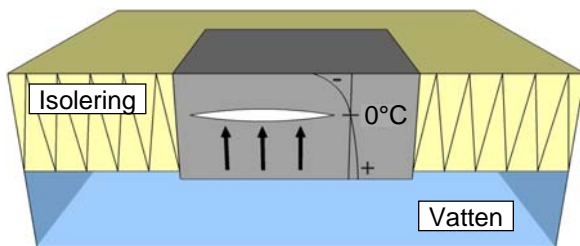
Försök

En försöksuppställning utvecklades med syftet att exponera provkroppar för frysning ovanifrån samtidigt som de har kontakt med tempererat vatten undertill; se Figur 8. Genom att hålla lufttemperaturen vid $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och vattentemperaturen vid $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ kunde det säkerställas att frysfronten hamnade i provkroppen; se Rosenqvist m.fl. (2016).

För att undersöka risken för makroskopisk islinnsbildning gjöts åtta betongkvaliteter med vct mellan 1,4 och 0,5. Tre typer av provkroppar användes:

- 1) Provkroppar utan påverkan.
- 2) Provkroppar med inre frostska.
- 3) Provkroppar med ingjutna pappersskikt.

Syftet med provkropparna utan påverkan var att försöka bestämma vid vilket vct makroskopisk islinnsbildning kan inträffa. Provkropparna med inre frostska representerar betong närmast uppströmssidan som med tiden kan nå hög vattenmättnadsgrad och skadas vid genomfrysning.



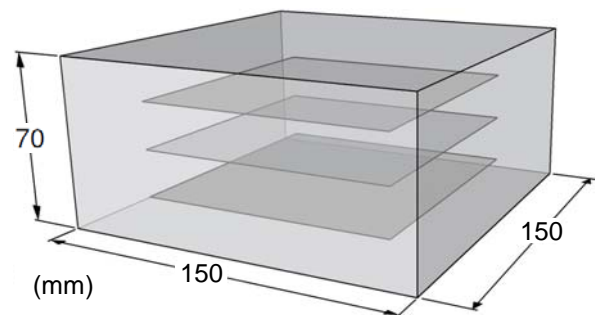
Figur 8. Försöksuppställning för makroskopisk islinnsbildning i hårdnad betong.

Provkropparna med ingjutna pappersskikt (Figur 9) representerar betong med inre defekter, exempelvis ofullständig kompaktering kring armeringsjärnen eller bristande vidhäftningshållfasthet mellan reparationsmaterial och underliggande betong. Den gemensamma nämnaren för defekterna är att de resulterar i oönskade håligheter i betongen.

I provkropparna utan påverkan inträffade makroskopisk islinnsbildning vid vct $\geq 0,9$. Provkropparna delades i två bitar av en horisontell och jämntjock islinns; se Figur 10. Tiden till att provkropparna delades steg med sjunkande vct. För vct 1,4 tog det 21 dygn och för vct 0,9 66 dygn. Försöket avbröts efter drygt 200 dygn. Då hade inga provkroppar med vct 0,8 eller lägre fått islinnsbildning.

För provkroppar med inre frostska inträffade makroskopisk islinnsbildning för samtliga betongkvaliteter inom en veckas tid. För provkropparna med högst vct tog det mindre än ett dygn för islinnsen att dela provkropparna i två bitar.

Även i provkropparna med ingjutna pappersskikt inträffade makroskopisk islinnsbildning, vilket resulterade i att provkropparna delades i två bitar. Efter 6 dygn hade provkroppen med vct 1,4 delats i två bitar medan det tog över 100 dygn för provkropparna med vct 0,6 och 0,5 att nå samma resultat. De övriga provkropparna landade tidsmässigt mellan nämnda ytterlighetsvärden.



Figur 9. Provkropp försedd med tre pappersskikt i syfte att representera defekter i betongen.



Figur 10. Provkropp som har delats av en islinns.

Risken för makroskopisk islinsbildning

Att makroskopisk islinsbildning, likt tjälskjutning i mark, kan inträffa i hårdnad betong har påvisats genom utförda försök i denna studie. Följande förutsättningar måste vara uppfyllda:

- Frysfronten ligger stilla en längre period.
- Det finns god tillgång på vatten.

Dessutom måste minst en av följande tre förutsättningar uppfyllas:

- Betongens vct är $\geq 0,9$.
- Betongen har inre frostsador.
- Betongen har inre defekter.

Således kan det konstateras att det föreligger risk för makroskopisk islinsbildning i tunna och oisolerade betongdammar. Även om betongen i dammen har ett vct mellan 0,6 och 0,5 kan inre defekter och en med tiden ökande vattenmättnadsgrad leda till makroskopisk islinsbildning. Detta givet att dammen utsätts för genomfrysning vintertid.

LÅNGTIDA FROSTBESTÄNDIGHET

Genom tillsättandet av luftporbildande medel vid den färska betongens blandning kan betongens frostbeständighet förbättras. Vanligtvis eftersträvas en lufthalt mellan 4 och 5 % för vattenbyggnadsbetong avsedd för konstruktioner i sötvattenmiljö. Vad som tidigare varit okänt är hur betongens frostbeständighet står sig över tid. Kommer betongen att vara frostbeständig för all framtid eller kan den försämrats?

I samband med att betongkärnor borrades ut från uppströmssidan av betongdammen vid Ramsele kraftverk användes vissa av kärnorna till att bestämma betongens vattenmättnadsgrad. I kärnor tagna från 10,5 och 18,5 m djup var vattenmättnadsgraden närmast uppströmssidan nära 1; se Rosenqvist (2016). Resultaten visade att betongen nästintill var vattenmättad. Detta faktum betyder att betongens kritiska vattenmättnadsgrad över-skridits och att risken för frostsador ökat.

Betongprover studerades även med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM). Det kunde konstateras att en del av betongens luftporer var helt eller delvis fyllda med ettringit och kalciumhydroxid. Dessa iakttagelser indikerar att luftporerna varit vattenfyllda innan betongkärnorna borrades ut.

Summerat medför iakttagelserna att luftinblandad och frostbeständig betongs frostbeständighet kan försämrats över tid. Betong som ursprungligen varit frostbeständig kan under särskilda betingelser förlora den egenskapen. Med andra ord bör denna process tas i beaktning under förvaltningsskedet av vattenkraftsanläggningar. Det bör även nämnas att risken för frostsador kan minimeras genom att konstruktionerna skyddas från frysning.

SLUTSATSER

Successiv nedbrytning av betongytan längs vattenlinjen på vattenkraftsanläggningar i konstant kontakt med älvvatten orsakas av samverkande effekter mellan urlakning, frysning och nötning. Urlakning försvagar betongytan och öppnar upp för frostangrepp. Det skadade ytskiktet faller eller nöts sedan bort av is och drivgods. Därefter börjar processen om på nytt.

Det ovan beskrivna scenariot stämmer väl överens med gjorda observationer av successiv nedbrytning av betong längs vattenlinjen på verkliga konstruktioner. Resultat från utförda försök visar att betong med lågt vct har bättre beständighet mot urlakning än betong med högt vct. Följaktligen blir betongens beständighet mot frysning och nötning bättre vid användandet av betong med lågt vct.

Vidare har försök visat att makroskopisk islinsbildning kan inträffa i hårdnad betong under särskilda förhållanden. Således finns det risk för islinsbildning i tunna betongdammar utan isolering. Detta under förutsättning att dammarna utsätts för långa perioder av sträng kyla vintertid.

I betong med vct mellan 0,6 och 0,5 är risken låg för makroskopisk islinsbildning. Om betong av samma kvalitet har defekter i form av ofullständig kompaktering vid armeringsjärn eller att betongen uppnått hög vattenmättnadsgrad ökar risken för islinsbildning. Att betongens vattenmättnadsgrad ökar över tid har bekräftats genom mätningar på betong från Ramsele kraftverk. Det övergripande villkoret för att makroskopisk islinsbildning ska ske i tunna och oisolerade betongdammar är att de utsätts för långa perioder av sträng kyla vintertid.

Kunskap och förståelse kring hur vattenbyggnadsbetong bryts ned kan användas för att minska risken för förkortad livslängd på vattenbyggnader i sötvattenmiljö. Vid nybyggnation eller reparation kan materialval baseras på kunskap och förståelse för hur nedbrytningsmekanismerna verkar i syfte att välja material med god beständighet mot förekommande nedbrytningsmekanismer.

FINANSIÄRER

Genomförandet av aktuellt doktorandprojekt har möjliggjorts tack vare tilldelning av forskningsmedel från Energiforsk, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Svenskt VattenkraftCentrum (SVC), Skanska och Vattenfall.

REFERENSER

Drugge, E., 2001, *Geokemin längs Luleälven samt påverkan av vattenkraftutbyggnaden*, Rapport 2001:208, Luleå Tekniska Universitet

Pham, L.-W., Terzic, A., 2013, *Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet - En experimental studie om synergiefekter*, Rapport TVBM-5093, Lunds Universitet

Rosenqvist M (2016) Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures: Interactions between water absorption, leaching and frost action, TVBM-1036, Lunds Universitet

Rosenqvist M, Bertron A, Fridh K, Hassanzadeh M (2017) Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterisation, Cement and Concrete Research, Vol.92, s.110-120

Rosenqvist M, Fridh K, Hassanzadeh M (2016) Macroscopic ice lens growth in hardened concrete, Cement and Concrete Research, Vol.88, s.114-125

Rosenqvist M, Oxfall M, Fridh K, Hassanzadeh M (2015) A test method to assess the frost resistance of concrete at the waterline of hydraulic structures, Materials and Structures, Vol.48, s.2403-2415