

Fuktupptagning och Frostbeständighet hos Vattenbyggnadsbetong

Förekommande skador på betongkonstruktioner som står i ständig kontakt med sötvatten har i en del fall misstänkts bero på frostnedbrytning. Inom ramen för etapp 1 fram till licentiatexamen i doktorandprojektet 'Fuktupptagning och frostbeständighet hos vattenbyggnadsbetong' har bakomliggande nedbrytningsmekanismer till dessa typer av betongskador undersökts experimentellt genom laboratorieförsök.

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

Både ytliga och inre skador har observerats på betongkonstruktioner i vattenkraftverk runt om i landet. Dessa observationer har följaktligen väckt frågor om betongkonstruktionernas beständighet i vattenkraftmiljö. Exponeringsmiljön för ett vattenkraftverk kan i många fall dessutom likställas med exponeringsmiljön för hamnar och bropelare, vilka också står i ständig kontakt med sötvatten.

Inom ramen för doktorandprojektet 'Fuktupptagning och frostbeständighet hos vattenbyggnadsbetong' har bakomliggande nedbrytningsmekanismer till de observerade skadorna undersökts experimentellt genom laboratorieförsök. Den övergripande frågeställningen har varit om de observerade skadorna beror på brister i betongens ursprungliga frostbeständighet eller om de beror på att frostbeständigheten kan försämrats med tiden.

Avskalning i vattenlinjen

En vanligt förekommande skada på vattenbyggnader som står i ständig kontakt med sötvatten 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 andra fall till och med har orsakat friläggning av de ytligast belägna armeringsjärnen. Detta gäller främst för vattenkraftverk uppförda före 1950.

I några fall har en avskalningstakt på upp till 1 mm även observerats för vattenkraftverk uppförda efter 1950. Ett täckande betongskikt på 50 mm kan således delvis försvinna inom loppet av 50 år, vilket då leder till förtida reparationsinsatser.

Utseendemässigt påminner skadorna om avskalningar orsakade av tösaltning. I vattenkraftmiljö förekommer normalt sett inte tösalter varför avskalning till följd av tösaltning bör kunna 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 kraftigt strömmande vatten bidrar givetvis till avskalningen i närheten av intag och utskov. Invid dessa konstruktioner förekommer höga strömningshastigheter, 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, eftersom 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 påvisar att det råder 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 utsetts 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.

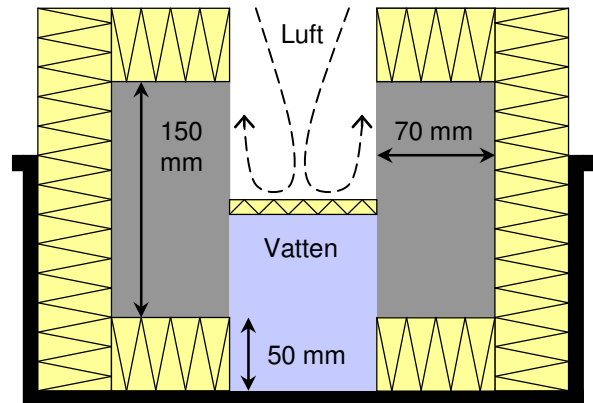
Betongytans frostbeständighet

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 Persson & Rosenqvist (2009). Försöksuppställningen till den senare metoden visas i Figur 3. Den grundläggande idén till metoden är att utsätta provkroppar för förhållanden lika de verkliga - den undre delen av provkroppen står i vatten medan den övre delen är 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



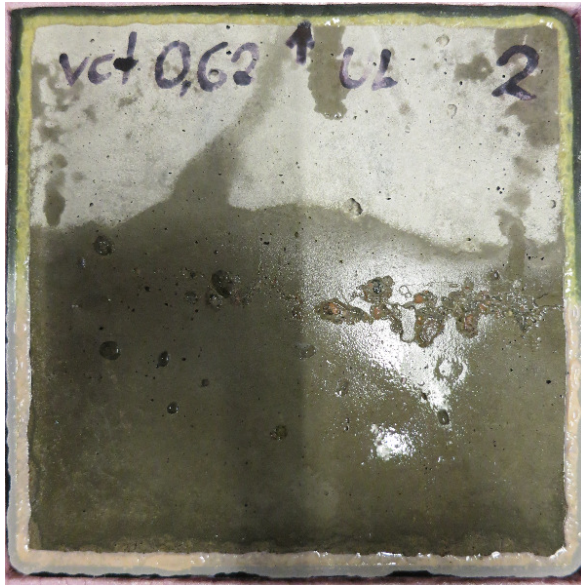
Figur 3. Försöksuppställning för frostprovning av provkroppar ståendes till hälften i vatten.

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 frysning och 4,5 timmar upptining. Den inledande halvtimmen av frys- 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.

Både 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 inte med verkligheten.



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

Betong i vattenbyggnader utsätts dock för fler nedbrytningsmekanismer än enbart frost. En möjlighet är att samverkan mellan olika nedbrytningsmekanismer har orsakat de iakttagna skadorna i vattenlinjen på vattenbyggnader i sötvatten.

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 något jämfört med motsvarande värden 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 de urlakade kalciumjonerna.

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 U+F+N inleddes försöket med en veckas urlakning i avjoniserat vatten. Därefter följde 7 fryscyklar enligt Boråsmetoden och slutligen utsattes provkropparna för nötning med stålborste. Denna tvåveckorscykel upprepades fyra gånger per försöksserie.

De provkroppar som uppvisade minst avskalningar var de som endast utsattes för F eller F+N. För både vct 0,62 och 0,54 var avskalningarna efter totalt 28 fryscyklar knappt märkbara. Avskalningarna för provkroppar som utsattes för U+F och U+F+N uppvisade större avskalningar. Störst avskalningar fick U+F+N, se Tabell 2 och Figur 5.

Scenario för avskalningar i vattenlinjen

Studien visar att en frostbeständig betong, det vill säga vct 0,54 i den här studien, kan skadas när den utsätts för urlakning innan frysning. Detta stämmer väl överens med observationer från verkligheten. Urlakning av betong leder till ökad kapillärporositet, vilket i sin tur ökar risken för frostsador.

Ett möjligt scenario för nedbrytningen av betong i vattenlinjen är att betongytan utsätts för urlakning under främst sommarhalvåret. Följaktligen försämras betongytans frostbeständighet och den kan frostsadras under det följande vinterhalvåret. Om så sker nöts det skadade skiktet bort på våren av is och drivgods. Processen kan sedan börja om.

Beskrivet scenario passar bra in på gjorda observationer av successiv avskalning av betongytan i vattenlinjen hos vattenbyggnader i sötvatten.

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.

Islinsbildning i betongdammar

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

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 6.



Figur 6. 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.

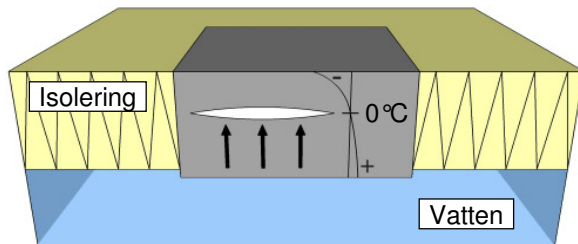
I en tunn betongdamm utan isolering utsätts nedströmssidan för frysning, medan uppströmssidan står i kontakt med vatten. Under vintern kan frysfronten vandra genom dammen och har i några fall orsakat genomfrysning med efterföljande isbildning på uppströmssidan. Av denna anledning har det varit av intresse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

Försök

En försöksuppställning utvecklades med syftet att utsätta provkroppar för frysning på ovansidan samtidigt som de har kontakt med tempererat vatten på undersidan, se Figur 7. Övriga ytor isolerades. Genom att hålla lufttemperaturen runt $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och vattentemperaturen runt $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ kunde det säkerställas att frysfronten hamnade i provkroppen.

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.



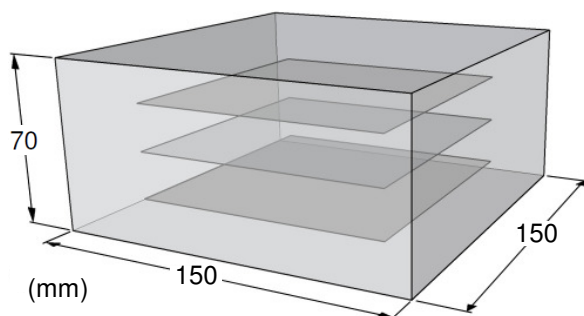
Figur 7. Försöksuppställning för makroskopisk islinsbildning i hårdnad betong.

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

Provkropparna med ingjutna pappersskikt av storlek 110 x 110 mm representerar betong med inre defekter, se Figur 8. Exempel på defekter i betongen är ofullständig kompaktering kring armeringsjärnen eller att reparationsåtgärder utförts slarvigt med bristande vidhäftningshållfasthet mellan reparationsmaterial och underliggande betong som följd. Den gemensamma faktorn för defekterna är att de resulterar i oönskade håligheter i betongen.

I provkropparna utan påverkan med betongkvalitet vct 0,9 eller högre inträffade makroskopisk islinsbildning. Provkropparna delades i två bitar av en horisontell och jämntjock islins, se Figur 9. Tiden till att provkropparna delades ökade med lägre 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 skadats av makroskopisk islinsbildning.

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



Figur 8. Provkropp försedd med tre pappersskikt i syfte att representera defekter i betongen.



Figur 9. Provkropp som har delats av en islins.

Även i provkropparna med ingjutna pappersskikt inträffade makroskopisk islinsbildning, 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.

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 frostska.
- Betongen har inre defekter.

Således kan det konstateras att det föreligger risk för makroskopisk islinsbildning i 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 tillåts utsättas för genomfrysning vintertid.

Slutsatser

Observerade avskalningar på betongytan i vattenlinjen på vattenbyggnader i sötvatten beror med stor sannolikhet på en kombination av nedbrytningsmekanismerna urlakning, frysning och nötning. Urlakning försvagar betongytan och öppnar upp för frostangreppet. Det skadade ytskiktet nöts

sedan bort av kolliderande is och drivgods. Processen kan sedan börja om på nytt. Detta scenario stämmer väl överens med gjorda observationer av successiv nedbrytning av betongen i vattenlinjen. Resultat från utförda försök visar att betong med lågt vct har bättre beständighet mot urlakning än betong med högt vct. Följaktligen blir även beständigheten mot frysning och nötning bättre.

Resultat från utförda försök har även visat att makroskopisk islinnsbildning kan inträffa i hårdnad betong. Således föreligger det risk för makroskopisk islinnsbildning 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 föreligger det normalt sett inte någon risk för makroskopisk islinnsbildning. Om samma betong däremot har defekter i form av exempelvis ofullständig kompaktering vid armeringsjärn eller att betongen har uppnått en hög vattenmättnadsgrad ökar också risken för makroskopisk islinnsbildning. Det övergripande villkoret för makroskopisk islinnsbildning är dock att betongdammarna är oisolerade och utsätts för långa perioder av sträng kyla vintertid.

Kunskap och förståelse kring hur betong bryts ned i vattenbyggnader i sötvatten kan användas för att minska risken för förkortad livslängd på konstruktionerna. Även vid reparationsinsatser kan exempelvis materialval baseras på kunskap och förståelse för hur nedbrytningsmekanismerna verkar i syfte att välja material med god beständighet mot förekommande nedbrytningsmekanismer.

Finansiärer

Fram till licentiatexamen har doktorandprojektet finansierats av Elforsk, SBUF och SVC.

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 synergieffekter*, Rapport TVBM-5093, Lunds Universitet

Persson, M., Rosenqvist, M., 2009, *Frostsprängning i betongdammar - Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk*, Rapport TVBM-5074, Lunds Universitet