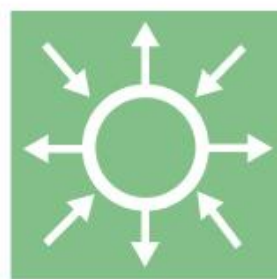
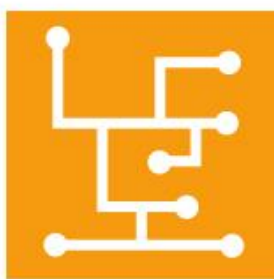




Undervattensgjuten betong

Litteraturstudie om beständighet i
vattenvägar

Elforsk rapport 10:72



Tomas Sandström, Bojan Stojanović, Mikael Persson

Juni 2010

ELFORSK

Undervattensgjuten betong

Litteraturstudie om beständighet i
vattenvägar

Elforsk rapport 10:72

Förord

Vattenkraftföretagen*) har via Elforsk stöttat forskning och utveckling inom det betongtekniska området sedan början av 90-talet.

Programmet är inriktat på ett kostnadseffektivt förvaltande av vattenkraftindustrins betongkonstruktioner. Syftet är att ge ett kvalificerat stöd till vattenkraftföretagen.

Målet är att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och teknik som fyller industrins behov. Målet är också att bygga kompetens. En uttalad ambition är att samarbeta med övrig industri och landets tekniska högskolor.

Programmet administreras med hjälp av en styrgrupp med följande ledamöter:

Malte Cederström, Vattenfall AB Vattenkraft

Johanna Feldtman, E.ON Vattenkraft Sverige AB

Martin Hansson, Statkraft Sverige AB

Erik Nordström, Vattenfall AB Vattenkraft

Markus Eriksson, Skellefteåkraft

Karin Persson, Fortum

Stefan Norberg, Fortum

Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen

Marcus Hautakoski, Vattenregleringsföretagen

Cristian Andersson, Elforsk AB

Stockholm augusti 2010



Cristian Andersson

Elforsk AB

*)Vattenfall AB Vattenkraft, Fortum Generation, E.ON Vattenkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Statkraft Sverige AB, Jämtkraft AB, Sollefteåforsens AB, Karlstads Energi AB, Jönköping Energi AB deltar i treårsperioden (2007-2009) av ramprogrammet "Underhåll och förnyelse av betongkonstruktioner".

Sammanfattning

Rapporten är en litteraturstudie som primärt behandlar nötning (hydromekanisk erosion) av betongkonstruktioner belägna under vattenlinjen i vattenvägar. I litteraturstudien sammanställs kunskap och erfarenheter av materialval, då främst hur undervattensgjuten betong, innehållande antiutvaskningsmedel, (UV-betong) står sig mot konventionell betong gjuten vid torrläggning. Den bakomliggande litteraturen är primärt från Nordamerika och Norden. Målsättningen med litteraturstudien är att sammanställa de mekanismer som orsakar det som vanligtvis kallas för nötning (hydromekanisk erosion), samt att sammanfatta de främsta materialegenskaper som påverkar betongens beständighet mot detta.

Betongkonstruktioner kan utsättas för flera olika typer av nedbrytningsmekanismer som initialt skadar ytskiktet. De i detta sammanhang vanligaste mekanismerna är; erosion (och ev. kavitation i vissa fall), urlakning och frostsprängning, där de två förstnämnda är de mest dominerande. Troligt är dock att synergier av ovanstående mekanismer är det som sker i de verkliga fallen.

Slutsatsen från studien kan sammanfattas som att de flesta skador, på utskov och snarlika konstruktioner, uppkommer primärt på grund av hydromekanisk erosion eller kavitation (i vissa specifika fall).

Beträffande hydromekanisk erosion och/eller kavitation (vid speciella förutsättningar), är det inte materialvalet som har störst inverkan på konstruktionens nedbrytning samt uppkomsten av skada, utan snarare konstruktionens geometri och utformning; detta med avseende på strömningsförhållandena. Uppkomsten och fortskridningen av erosions och skador har dessutom också en direkt korrelation gentemot betongens beskaffenheter. En betong med lågt vct och en hög halt ballast har bäst förutsättningar att klara erosion. I litteraturen framgår även att iblandning av silikastoft, alternativt polymerer i betong, ökar materialets motståndskraft. Även vakuumbehandling är en metod som ökar materialets beständighet. Något som bör poängteras är att alla konstruktioner oundvikligen utsätts för erosion (nötning) vid tillräckligt hög och långvarig exponering.

Traditionellt sett utförs reparationer med konventionell betong vid torrläggning. Problemet med den lösningen är att torrläggningen är ett kostsamt arbetsmoment, samt att denna inte är praktiskt genomförbar i ett flertal fall. Resultatet, jämfört med att reparera med UV-betong, är i många avseende bättre, inte minst gällande motståndskraften mot erosion. Den främsta anledningen är att UV-betongens yta oftast blir svagare än materialets kärna, p.g.a.: utvaskning och erosion av den färska betongens yta, samt varierad kompaktering och separation vid gjutning. Försök visar dock att tillsatsen av: antiutvaskningsmedel, högre halt finmaterial samt silikastoft eller polymer, ökar betongens motståndskraft vid gjutning samt nötning över tid. Resultaten är dock lägre än vid gjutning med konventionell betong i torrhet. Frågan är om en kostnadsökning på mellan 40-50 % (vilket framgår i denna litteraturstudie), på grund av torrläggning, är försvarbart i all avseenden med tanke på en större livslängd hos konventionell betong som gjuts i torrhet. Inom ramen för denna studie har dock kunskap och information om livslängd och dess variation ej kunnat erhållas, vilket indikerat att vidare studier samt experimentella försök måste utföras.

Summary

This report is a literature study that primarily deals with erosion (hydro-mechanical erosion) of concrete structures located below the waterline of a waterway. The study summarises knowledge and experiences of concrete material properties, mainly with regards to the durability of underwater-cast concrete, containing anti washout admixture, (UW-concrete) in comparison to conventional concrete cast at dry conditions. The study is preliminary based on literature from North America and Scandinavia. The aim of this study is to summarise the mechanisms that cause what is commonly known as erosion (hydro-mechanical erosion), but also to summarise the main concrete material properties that affect durability in this context.

Concrete can be exposed to various types of degradation mechanisms, which initially degrades the concrete surface. In this context, the most common mechanisms are: erosion (and in some cases cavitation), leaching and frost, where the first two are the most dominate. It is probable that these mechanisms act in synergy when degrading concrete during these conditions.

The study concludes that the prime damages on spillways, and other structures located below the waterline of a waterway, arise primarily due to hydro-mechanical erosion, or cavitation (in some specific cases).

Regarding the rise of hydro-mechanical erosion and/or cavitation (during special circumstances); it is not preliminary the choice of concrete material composition that has the greatest impact on concrete durability, but rather the design and geometry in terms of flow conditions. However, the: initiation, progression and level of erosion is also directly linked to concrete material properties. Concrete containing a low water to cement ratio and having a high content of aggregates displays the best properties in withstand erosion. The literature also shows that the incorporation of silica fume or polymers in concrete also increases the durability of concrete in this particular context. Vacuum treatment is yet another method that improves the durability of the concrete, by strengthening the surface. Something that should be taken into consideration is that all structural designs will eventually degrade by erosion at sufficiently high and prolonged exposure.

Repairs on hydro-mechanically eroded concrete structures are commonly performed in the dry by using conventional concert. The problem is that this procedure is costly due to the drainage operation, and also some times not practically possible due to hydropower plant operations. The quality of a repair made by a conventional concrete cast in the dry, compared with repairs made by UW-concrete, is in many respects better, not least the ability to withstand erosion. The main reason is that the UW-concrete usually displays a weaken surface compared to the core, due to washout and erosion of the fresh concrete surface, and also due to varied consolidation and segregation of the concrete when casting. Trials have shown that the addition of: anti washout admixture, higher content of fine aggregate and silica fume or polymers, will increasing the durability of the concrete and improve the washout resistance of fresh concrete. The durability results are however lower than if conventional concrete is cast in the dry. The question is whether a cost increase of between 40-50% (as shown in this study), due to the drainage operation, is justifiable in all respects in view of a greater service life. Within the scope of this study, knowledge and information about service life and its variation could not be obtained, which indicates that further studies and experimental research must be conducted.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Definitioner	1
2	Faktorer som påverkar nedbrytning	3
2.1	Erosion	3
2.2	Kavitation	5
2.3	Urlakning	7
2.4	Frostangrepp	7
2.5	Synergieffekter	8
2.6	Miljö och exponering	8
3	Praktikfall hämtad från litteraturen	11
3.1	Kavitations- och erosionsskador på vattenkraftskonstruktioner	11
3.2	Erosionsskador på vattenkraftskonstruktioner	13
3.3	Sammanfattning av praktikfallen.....	15
4	Laborativa studier av undervattensgjuten betong innehållande tillsatser	16
5	Materialegenskapers inverkan på motståndskraften mot nedbrytning	21
5.1	Erosion	21
5.2	Kavitation	22
5.3	Urlakning	22
5.4	Frostangrepp	22
5.5	Sammanställning av materialsammansättnings inverkan på nedbrytning.....	23
5.6	Materialval enligt EN 206-1	25
6	Utförande och efterbehandling	27
7	Kostnad	28
8	Provningsmetoder	29
9	Sammanfattning av litteraturstudien	30
10	Förslag på fortsatt arbete	32
11	Referenser	33

1 Inledning

Denna rapport är en litteraturstudie som behandlar nötning av betongkonstruktioner belägna under vatten, samt reparationer av dessa. Den bakomliggande litteraturen är hämtad från Nordamerika och Norden. Målsättningen med litteraturstudien är att sammanställa de mekanismer som orsakar det som vanligtvis kallas för nötning, samt att sammanfatta de främsta materialegenskaper som påverkar betongens motstånd mot dessa. Studiens fokus ligger på att utvärdera och jämföra reparationer utförda med undervattensgjuten- samt konventionellt gjuten betong i torrhet.

När de bakomliggande mekanismerna, samt de materialtekniska faktorerna som påverkar motståndsegenskaperna, är kända kan metoder för att kvantifiera, men även prediktera, nötning tas fram. Med relevanta provningsmetoder blir det möjligt att kontrollera lämpligheten av olika material ämnade för reparation eller nyproduktion av vattenkraftskonstruktioner, i miljöer som är krävande i detta avseende.

1.1 Definitioner

I en amerikansk betonghandbok, **ASTM (2006)**, definieras nötning som "nedbrytning orsakad av hårda partiklar, eller krafter, som träffar en yta" fritt översatt. Nötningsmotstånd definieras som "en ytas förmåga att motstå nedbrytning orsakad av det ovanstående". Nötning kan delas in i olika kategorier beroende på de bakomliggande mekanismerna som orsakar nedbrytningen.

I detta sammanhang kan nötningsmekanismerna delas in i kategorierna erosion, kavitation och enligt **ACI 210 (2008)** bör även kemiska attacker såsom urlakning medräknas. För vissa typer av undervattenskonstruktioner, trots att de vanligtvis är belägna under vattenytan¹, bör även effekter av frostangrepp beaktas. Enligt **Fagerlund (2004)** kan det räcka med en frysning för att ett material helt eller delvis ska kollapsa, förutsatt att den kritiska vattenmättnadsgraden har uppnåtts.

Av just nämnda anledningar är det tänkbart att skador som vanligtvis bedöms vara orsakade av mekanisk nötning (erosion), i själva verket kan vara en konsekvens av summan av olika nedbrytningsfenomen.

Vidare definieras här en vattenkraftskonstruktion som "en betongkonstruktion som tillhör yttre eller inre vattenväg och som har minst en yta som står, helt

¹ Till skillnad mot konstruktioner som alltid är belägna på ett frostfritt djup under vattenytan

² Enkelt beskrivet så är vattenmättnadsgraden ett mått på hur mycket av det givna materialets "öppna" porvolym som är fyllt av avdunstningsbart vatten, med avseende

eller delvis, i kontakt med vatten". Dämmande konstruktioner murar luckstöd/pelare, energiomvandlarbassäng och skibord är några exempel på olika typer av vattenkraftkonstruktioner, se också Figur 2.4 senare i rapporten.

2 Faktorer som påverkar nedbrytning

Betongkonstruktioner kan utsättas för flera olika typer av nedbrytningsmekanismer som initialt skadar ytskiktet. Det är ett vanligt förekommande antagande att mekanisk nötning är den dominerande bakomliggande orsaken. Nedan presenteras några, mer eller mindre, vanliga typer av nedbrytningsmekanismer som kan orsaka skador.

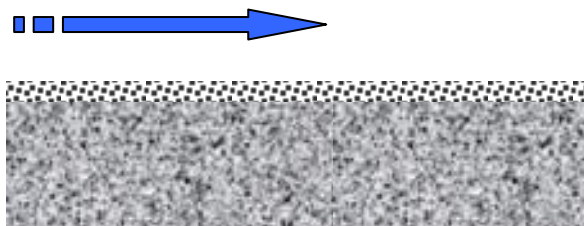
2.1 Erosion

Med erosion menas mekanisk nötning. Nötning kan orsakas av små eller stora partiklar som färdas med strömmen, på eller under vattenytan. Denna skademekanism angriper främst matrisen, dvs. betongens cementpasta och inte den grövre ballsten, då nötningsmotståndet hos den senare vida överskrider detsamma hos den tidigare. Vid kraftig nötning kan emellertid även grövre ballastkorn slitas loss från betongkonstruktionen vilket leder till en ökad ytråhet. En ökad ytråhet leder i sin tur till att arean som angrips blir större samtidigt som friktionen också ökar, denna kombination leder till en ökad nedbrytningshastighet. Enligt **Neville (2008)** så beror nedbrytningshastigheten av betongens kvalitet, nötningspartiklarnas hårdhet och form, hastighet med vilken partiklarna transporteras samt eventuella strömningseffekter, t.ex. rent vatten som på grund av ojämnheter på ytan kan erodera betongens ytskikt.

Popovics och McDonalds (1989) beskriver en kategorisering av hydromekanisk erosion, eller med andra ord erosion av betongkonstruktioner i vattenvägar, som orsakas av strömmande vatten med inhysta partiklar. Denna består av: avskrapande/-slipande erosion (engelska: abrasive erosion), direktinverkande erosion (engelska: impact/impingement erosion) och kombinerad erosion (engelska: differential erosion).

- Avskrapande/-slipande erosion

Denna består primärt av att strömmande vatten med inhysta partiklar som i princip har en parallell strömningsriktning gentemot (i detta fall) en betongyta (se Figur 2.1). Storleksordningen av erosionen styrs av (förutom betongens materialegenskaper): vattenhastigheten, typ av partiklar samt dess omfattning och storlek, vattenvägens generella utformning (m.a.p. strömningsförhållanden), och vinkeln mellan det strömmande vattnet och betongytan. Erosionens (nedbrytningens) verkan på betongen kännetecknas av att, relativt sett, en större yta av betongen i princip blir likformigt nedslipad, vilket resulterar i en någorlunda jämn och slät betongyta. I dessa fall indikerar nedbrytningsförloppet att mängden ballast och dess hårdhet är avgörande för betongens beständighet.

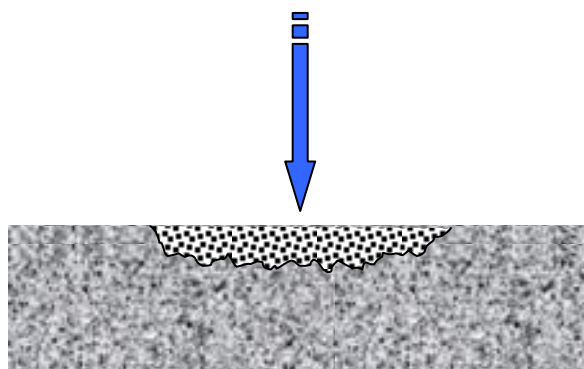


Figur 2.1 En schematisk exemplifiering av avskrapande/-slipande hydromekanisk erosion av betong.

En ökad vinkel, mellan det strömmande vattnet och betongytan, medför att erosionen successivt övergår till direktinverkande erosion.

- Direktinverkande erosion

När vinkeln mellan betongytan och det strömmande vattnet i princip är vinkelrätt, klassificeras erosionen som direktinverkande (se Figur 2.2). I detta fall kännetecknas betongens nedbrytning av att matrisen (dvs. betongens cementpasta) i princip blir sönderslagen, vilket medför att ballast lossnar. Detta nedbrytningsförlopp orsakar generellt relativt lokala håligheter i betongen. I dessa fall indikerar nedbrytningsförloppet att matrisens hårdhet är avgörande för betongens beständighet.

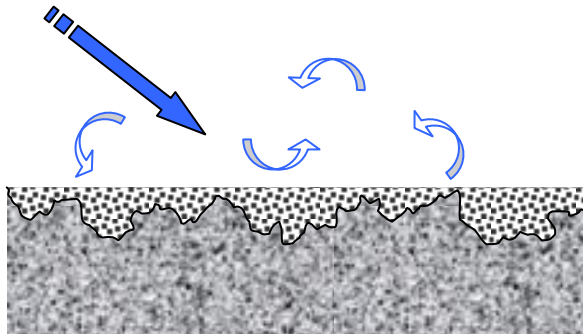


Figur 2.2 En schematisk exemplifiering av direktinverkande hydromekanisk erosion av betong.

- Kombinerad erosion

I de flesta fallen samverkar de ovanstående beskrivna erosionsscenarierna; med andra ord en kombination av avskrapande/-slipande och direktinverkande erosion (se Figur 2.3), där någon av dessa har en dominerande inverkan. Denna kännetecknas av att betongytan får en ojämnt försliten yta, där hårdare delar (ballast) är synligt utskjutna

från det övriga materialet. I dessa fall indikerar nedbrytningsförloppet att kombinationen av mängden ballast samt dess och matrisens hårdhet, är avgörande för betongens beständighet.



Figur 2.3 En schematisk exemplifiering av kombinerad hydromekanisk erosion av betong.

2.2 Kavitation

Neville (2008) beskriver kavitation enligt följande. Bubblor av ånga som i strömmande vatten imploderar när ett särskilt tryckförhållande infinner sig. Bubblor bildas vid en tryckförändring (minskning) som leder till en volymökning av det strömmande vattnet. Om det omgivande trycket senare ökar tillräckligt mycket imploderar bubblorna och ger upphov till en jetstråle som skadar materialet. Denna process sker mycket snabbt, och om den sker vid eller mot en yta utsätts denna för extrema krafter. Det är viktigt att understryka att kavitation inte handlar om luft som inblandats i strömmande vatten, som t ex vid tappning.

Enligt **Prior (1966)** är förekomsten av kavitationsskador ovanlig i öppna betongledningar, om flödet underskrider 40 fps (ca 12,2 m/s). I slutna ledningar ligger denna gräns på 25 fps (ca 7,6 m/s). Vid högre flöden kan skador på grund av kavitation uppkomma redan efter kort tid och då även i betong av hög kvalitet.

Ett, av få, exempel på en plats där kavitation kan uppstå är i området som är beläget direkt efter sugrör. Enligt **ACI (2008)** beror kavitation på förhållandet/förändringen mellan det statiska och dynamiska trycket i ett givet system. Förändringen av det statiska trycket $P_{\Delta s}$, i vattnet, kan beskrivas som:

$$P_{\Delta s} = P_0 - (P_c + \gamma(z_c - z_0)) \quad (1)$$

I ekvation (1) är P_0 det statiska trycket i en referenspunkt (0) där ingen risk för kavitation föreligger och P_c är det statiska trycket i en punkt (c) där förutsättningar för kavitation finns. Ett exempel kan vara en ledning som vid c avsmalnas med en ökad strömningshastighet som följd. Vidare är γ vätskans

densitet gånger gravitation ($\rho \cdot g$) och $(z_c - z_0)$ är en eventuell höjdskillnad mellan de två punkterna.

Det dynamiska trycket P_d beräknas enligt:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 \quad (2)$$

I ekvation (2) är ρ vattnets densitet och v flödets hastighet, i referenspunkten. Förhållandet mellan $P_{\Delta s}$ och P_d benämns som kavitationsindex (alt. tryckkoefficient) och betecknas med σ .

$$\sigma = \frac{P_0 - (P_v + \gamma(z_c - z_0))}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2} \quad (3)$$

I de fall när skillnaden i det statiska trycket mellan referenspunkten, 0, och den godtyckliga punkten, c, blir tillräckligt stor uppstår kavitation. Just när kavitation uppstår är trycket i en ångbubbla lika stort som i det närmast omgivande vattnet. Detta tryck är ångtrycket (P_v) för vattnet vid den aktuella temperaturen. Detta innebär således; för att kavitation skall kunna uppstå krävs minst ett tryckfall beskrivet enligt nedan.

$$P_{\Delta s} = P_0 - (P_v + \gamma(z_c - z_0)) \quad (4)$$

Om det just beskrivna tryckförhållandet för kavitation sätts in i ekvation (3) fås kriteriet för kavitationsindex:

$$\sigma_c = \frac{P_0 - (P_v + \gamma(z_c - z_0))}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2} \quad (5)$$

Om det givna system befinner sig i ett intervall där $\sigma > \sigma_c$ kommer tryckförhållandet att vara sådant att kavitation inte kan uppstå. Om detta förhållande inte infrias, dvs. för fall då $\sigma < \sigma_c$, kan kavitation inträffa. Desto lägre σ för systemet desto kraftigare kavitation uppstår. Vid dimensionering bör således en hög säkerhetsmarginal till σ_c erhållas.

Författarna i **ACI (2008)** anger att motståndet mot kavitation i viss mån kan förbättras genom ett i sammanhanget korrekt materialval, men då endast marginellt. Materialsammansättningen inverkan på nötningsmotståndet behandlas senare i rapporten. Det mest effektiva sättet att reducera skador orsakade av kavitation anses emellertid vara att geometriskt utforma konstruktionerna på ett sådant sätt att kavitation undviks. Detta kan, förslagsvis, uppnås genom att konstruera geometrier i vattenvägar som tar hänsyn till ovan nämnda analytiska samband. Även **Prior (1966)** påstår att en geometrisk anpassning av konstruktionen samt att undvika ojämnheter är det enskilt effektivaste sättet att minska uppkomsten och omfattningen av skador orsakade av kavitation.

2.3 Urlakning

Enligt **Ekström (2001)** är urlakning den kemiska processen där vatten löser upp och transporterar bort delar av den sammanhållande cementmatrisen i materialet. Ekström hänvisar till en tidigare utförd studie som delar upp urlakning i olika typer, dessa är:

- Urlakning genom porösa material
- Urlakning genom sprickor
- Urlakning från ytor

Oavsett typ av urlakning leder den till en försvagning som orsakas av den fysiska transporten av ämnen från materialet. Urlakning leder, med tiden, till en ökad porositet hos det angripna materialet. En ökad porositet leder i sin tur till ytterligare försvagning av materialet i avseendet att permeabiliteten ökar samt att motståndskraften mot andra nedbrytningsmekanismer såsom frostangrepp reduceras. Vidare menar Ekström att några av de faktorer som påverkar urlakningshastigheten är:

- Materialets permeabilitet
- Mängd kemiskt urlakbart material (hydratiserad cement och joner i porvattnet)
- Vattnets hårdhet

För ytterligare information om kemiska samband samt teoretiska modeller rörande urlakning av cementbaserade material hänvisas läsaren till **Ekströms (2003)** avhandling.

2.4 Frostangrepp

Områden belägna kring vattenlinjen (både över och under) kan utsättas för skador helt eller delvis orsakade av frostangrepp. De bakomliggande mekanismerna som orsakar skador på grund av frysning har studerats under lång tid och är i princip kända. Enkelt beskrivet så skadas ett poröst material av effekter kopplade till isbildningen av kapillärvattnet i materialet. Två kriterier måste uppfyllas för att frostangrepp ska leda till skada. De två kriterierna är frystemperatur och graden av vattenmättnaden hos det aktuella materialet.

För varje poröst material finns det en kritisk vattenmättnadsgrad med avseende på frystemperatur. Storleken och strukturen hos materialets porer påverkar absorptionsegenskaperna samt fryspunkten hos det absorberade vattnet. Detta betyder att för varje frysgrad finns det en korresponderande mängd frysbart vatten i materialet. Det vill säga, att vid en låg

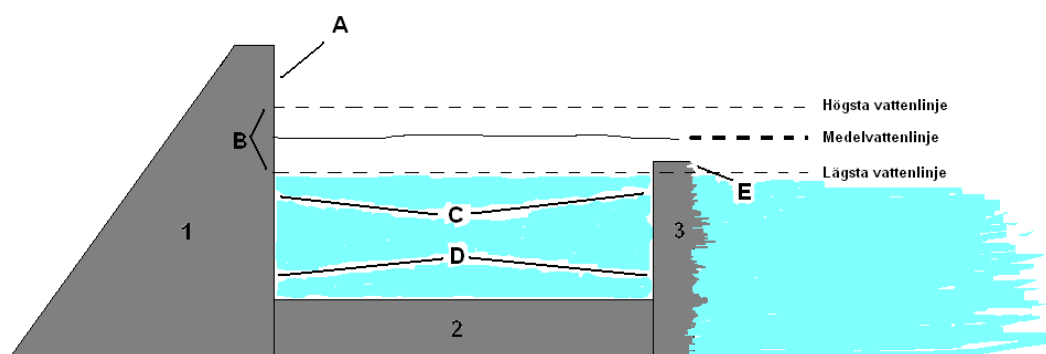
frystemperaturen kan en större volymandel av det absorberade vattnet frysa jämfört med mängden frysbart vatten vid en högre temperatur vid samma vattenmättnadsgrad. Om mängden frysbart vatten överskrider den kritiska volymen för en given frystemperatur skadas det porösa materialet. Om läsaren önskar en mer utförlig genomgång av de bakomliggande mekanismerna så hänvisas denne till **Fridh (2005)**.

2.5 Synergieffekter

Vilket redan nämnts finns det ett flertal situationer där delar av givna konstruktioner samtidigt kan utsättas för mer än en av de nedbrytande mekanismerna. Det är sannolikt så att synergieffekter genererar ett snabbare nedbrytningsförlopp än vad som vore fallet om endast en enskild nedbrytningsmekanism skulle verka åt gången. Utöver ett snabbare förlopp blir sannolikt även skadorna mer omfattande vid synergi än vid summering av de olika mekanismerna. Det har emellertid inte påträffats någon litteratur som beskriver dessa synergieffekter. I det följande avsnittet "miljö och exponering" redovisas exempel på olika situationer där synergier verkar.

2.6 Miljö och exponering

Nedan, i Figur 2.4, beskrivs olika principiella typer av konstruktioner samt de aktuella nedbrytningsmekanismerna.



Figur 2.4 En enkel beskrivning av olika konstruktioner och korresponderande miljöer där ytskador kan uppstå. Figuren föreställer, 1) en dämmande konstruktion där vissa delar alltid är i kontakt med luft. 2) en bottenkonstruktion som alltid är omgiven av icke frysbart vatten. 3) En godtycklig konstruktion som sällan är i kontakt med luft, se också tabell 1.

- A Delar av en konstruktion som är belägna ovan högsta vattenlinjen. Dessa delar kan utsättas för mekanisk nötning främst orsakad av "drivis" och annan flytande bråte. Urlakning och kavitation är inte möjliga i dessa områden.
- B Området är beläget mellan högsta och lägsta vattenlinjen och kallas skvalpzonen. I detta område kan mekanisk nötning, enligt A, och urlakning uppstå. Enligt observationer och laboratorieförsök gjorda av **Persson och Rosenqvist (2009)** är ytavskalning orsakad av

frostangrepp även möjlig. Erosion kan här även uppstå genom friktion orsakad av små partiklar som transporteras med strömmen samt att nötning orsakad av kavitation också kan uppstå.

- C Områden som är belägna under den lägsta vattenlinjen kan utsättas för frostangrepp som kan föranleda ytskador på konstruktioner. Här kan också mekanisk nötning och frostangrepp uppstå på liknande sätt som i (B). Erosion kan här även uppstå genom friktion orsakad av små partiklar som transporteras med strömmen, dessutom finns risk för kavitation.
- D Området inkluderar bottenområden samt väggarna närmast botten. Området är ständig under vatten, de dominerande nedbrytningsmekanismerna är erosion av partiklar, kavitation, samt urlakning. Konstruktionsdelarna i detta område kan utsättas för frostangrepp om konstruktionen är sådan utformad att materialet kyls utifrån.
- E Konstruktioner belägna i älvsfåran, som mestadels är belägna under vattenlinjen, kan utsättas för urlakning, mekanisk nötning samt kavitation. På grund av att konstruktionen mestadels är belägen under vattenytan är det ett rimligt antagande att konstruktionen/materialet här har en relativt hög vattenmättnadsgrad², speciellt vid konstruktionens ytor, och kan således också utsättas för frostangrepp om delar torrläggs vid en tidpunkt då frysning kan ske.

I Tabell 2.1, sammanställs nedbrytningsmekanismer och de korresponderande konstruktionerna som presenterades i Figur 2.4.

Tabell 2.1 Sammanställning av möjliga orsaker till ytskador i olika situationer som tidigare har beskrivits i Figur 2.4.

Del av konstruktion	Urlakning	Frostangrepp	Erosion	Kavitation ³
1A	-	x	x	-
1B	X	x	x	X
1C	X	x	x	X
1D	X	- ⁴	x	X
2	X	- ⁴	x	X
3C	X	- ⁵	x	X
3D	X	-	x	X
3E	X	x	x	X

² Enkelt beskrivet så är vattenmättnadsgraden ett mått på hur mycket av det givna materialets "öppna" porvolym som är fyllt av avdunstningsbart vatten, med avseende till frostangrepp menas i regel volymen frysbart vatten

³ Kavitation kräver att konstruktionen är belägen på ett sådant ställe där de fysikaliska förutsättningarna infrias

⁴ Beroende på den aktuella konstruktionens tjocklek, utformning och den lokala temperaturen variationen (årsbasis)

⁵ Beroende på hur lång tid konstruktionens övre yta är belägen ovan vattenlinjen samtidigt som den tillåts frysa

Som det beskrivs i Tabell 2.1 så är de flesta delarna av betongkonstruktioner, som utgör de yttre vattenvägarna, föremål för erosion, kavitation samt urlakning i högre utsträckning än frostangrepp. Anledningen till detta är att förutsättningarna för de tre är lättare att uppnå i älvmiljö, då främst erosion och urlakning. Dessa två behöver framför allt tillgången på vatten och för erosion även strömmande vatten med inhysta partiklar. Gällande kavitation krävs utöver höga flöden sådana geometriska förutsättningar att tryckvariationer kan uppstå. Frostangrepp på konstruktioner ständigt under vatten kan också inträffa, det kräver dock en ihållig kyla som kyler ner omkringliggande konstruktioner eller grunden. Från Tabell 2.1 går det att särskilja tre stycken huvudgrupper med avseende på nedbrytningsmekanismer, vilka presenteras nedan:

1. Frost/Erosion
2. Urlakning/Erosion/Kavitation⁶
3. Urlakning/Frost/Erosion/Kavitation

Enligt sammanställningen ovan så existerar det i detta sammanhang alltså inte någon situation där endast en bakomliggande mekanism orsakar skador. Genom att välja en för ändamålet passande materialsammansättning med avseende på den rådande miljön kan det vara möjligt att påverka (reducera eller fördröja) effekterna av nedbrytningsmekanismerna.

⁶ Kan endast uppstå på särskilda platser där de specifika fysikaliska parametrarna uppfylls

3 Praktikfall hämtad från litteraturen

I detta avsnitt sammanfattas ett antal av de artiklar som anses vara relevanta i detta sammanhang.

3.1 Kavitations- och erosionsskador på vattenkraftskonstruktioner

Hopping och Mass (1987) rapporterar om omfattande kavitationsskador (ca 700 m² x 0,5 m) som uppstod på tre skibord under en period med stora flöden. Under nio dagar spilldes vatten med ett flöde mellan 350-750 m³/s från två av de tre vattenvägarna. Under nästkommande 5 dagarna spilldes i genomsnitt 700 m³/s (max 1160 m³/s) från den kvarvarande. Skiborden är cirka 270 meter långa och det vertikala avståndet från krönet till den nedströms belägna bassängen är cirka 110 meter. Skiborden tillhörde ett och samma utskov men väggar avskilde de från varandra.

Skadorna på respektive skibord var belägna på de nedre delarna. Skadorna som uppstod av kavitation genererade földeffekter med ytterligare erosion i de tidigare skadade områdena på grund av ogynnsamma strömningsförhållanden. Vidare så orsakade också kavitationskrafterna att armeringsjärn frilades. Det kraftiga flödet fick armeringsjärnen att vibrera vilket bidrog till en ökad nedbrytning av skiborden.

Skiborden var byggda med en betong som bestod av krossad ballast med $D_{\max} = 38$ mm och hade den ungefärliga tryckhållfastheten 28 MPa. Betongen innehöll även luftporbildande tillsatsmedel. Författarna anser att betongens kvalitet inte var en bidragande faktor, utan att den främsta orsaken var att ytorna tillhörande skiborden inte uppfyllde kraven på jämnhet. Ojämnheterna bedömdes bero på ett icke tillfredställande arbetsutfarande gällande bl.a. ytavjämning och gjutfogar som i kombination med höga strömningshastigheter orsakade kavitation, se analytisk modell i tidigare avsnitt.

Skadorna reparerades genom att först avverka skadad betong genom bilning och sågning.

Efter avverkningen användes epoxiprimers och fiberarmerad betong för att pågjuta skadorna. Förutom reparationsåtgärderna så lades ett stort arbete ned på att skapa jämna ytor, dels på icke skadade delar och dels på de reparerade delarna. Resultaten av reparationer och ytfinish bedömdes som lyckade.

Efter nästkommande period med liknande flöden uppstod liknande skador, med dock i något mindre omfattning. Sammanfattningsvis, detta fall antyder att om geometrin är sådan att kavitation kan uppstå är det svårt skydda de utsatta delarna för skador, samt att kavitation kan uppstå i kanalströmningsliknande förhållanden om geometrin och strömningshastigheten medger detta.

Burgi och Eckley (1987) berättar också om stora skador i cirka 300 meter långa avbördningstunnlar som orsakats av kavitation och erosion. Även dessa skador uppkom vid höga flöden. I de skadade delarna av tunnlarna hade kavitation och erosion skalat av cirka tre fjärdedelar av "tunnellinningen" och helt frilagt armeringen. Den enskilt största erosionskadan som observerades var hela 10 meter djup, 40 meter lång och 15 meter bred (se Figur 3.1). Skadan hade således eroderat bort all betong samt gått ner i berget. Båda typerna av skador reparerades med betong.



Figur 3.1 Bild som visar den omfattande kavitation- och erosionskadan i den 300 m långa avbördningstunneln.

För att minimera effekten av framtida kavitation så byggdes slitsar in i tunnlarnas bottenplattor. Syftet med slitsarna var att tillföra luft till det strömmande vattnet. Enligt författarna så har forskningsresultat indikerat att inblandning av luft i snabbt strömmande vatten kan reducera effekterna av kavitation, något som också har påvisats genom experiment. Tyvärr lämnas inga referenser rörande detta. Författarna menar att resultatet av reparationerna samt tillbyggnaden av slitsarna blev lyckat. Den totala kostnaden för entreprenaden uppgick till cirka USD 31.000.000.

Popovics (1989) beskriver skador uppkomna i en energiomvandlarbassäng på Chief Joseph Dam i Colorado River, Washington. Bassängen mäter ca 280*67 m (920*220 ft). Skadorna upptäcktes under en undervattensinspektion redan två år efter att anläggning tagits i bruk (1955). Skadorna var omfattande och påträffades både på plattan samt på vattenklyvarna, i båda fallen påträffades exponerad armering. Skadorna fanns framför allt i direkt anslutning till vattenklyvarna samt vid ändklacken. I genomsnitt hade ca 30 cm av betongen eroderats ner. Två mindre hål, med ett djup på ca 1,5 meter (5 ft) påträffades mellan vattenklyvarna och ändklacken. Under en inspektion 1960 påträffades ytterligare skador, men inte i samma omfattning som 1957. De uppkomna skadorna har uppkommit på grund av erosion från större stenar i kombination med svåra strömningsförhållanden i området runt vattenklyvarna och vid ändklacken. Stundom har energiomvandlarbassängen haft ett flöde på ca 30 m/s (100 fps), ett sådant flöde kan utöver erosion även ge upphov till kavitation. Den efterföljande reparationen som gjordes var att betongplattor placerades på den befintliga konstruktionen. Under montaget var bassängen vattenfylld. Uppgifter om resultatet från reparationen saknas i rapporten.

3.2 Erosionsskador på vattenkraftkonstruktioner

McDonald och Liu (1987) skriver om reparationsarbeten av energiomvandlarbassängar, tillhörande fyra olika dammar. Samtliga skador i dessa fall bedöms bero på erosion orsakad av att material, såsom större stenfraktioner, block och övrigt skrot har "fastnat" i bassängerna och väl där, nöter på konstruktionerna då de transporteras runt av strömmarna.

Författarna hävdar att materialen transporteras från platser belägna nedströms i förhållande till bassängerna. Detta fenomen antas bero på icke harmoniserat flöde i bassängen som skapas av obalanserat eller icke symetriskt flöde till bassängen. Detta genererar strömvirvlar som är så kraftiga att de kan transportera nedströms beläget material upp till bassängen.

Skador som beskrivs i denna artikel är omfattande och repareras med konventionell betong efter att bassängerna torrlagts. Även här framgår det också att skadorna, oberoende av materialval, vanligtvis återkommer om inte orsaken till nedbrytningen åtgärdas. Här utgick man från modellförsök för att finna ett konstruktionsalternativ som förhindrade eller reducerade transporten av eroderande material till bassängen. Trots detta förespråkar författarna vikten av att använda slitstarka material för att öka livslängden på dessa typer av konstruktioner. Slutligen förslås metoden ASTM C 1138 (ASTM, 1997) som en lämplig provningsmetod för betong ämnad till detta ändamål. Denna metod redovisas i kapitel 8.

Smoak (1991) skriver om fall där små partiklar av silt, sand och liknade eroderar betong. Författaren menar att det länge varit känt att rent strömmande vatten inte kan skada betong, medan vatten innehållande partiklar, även väldigt små partiklar, gör det motsatta. I artikeln presenteras

resultat från ett experiment där traditionell betong jämför med andra betongmaterial, vissa innehållande silkastoft och andra en sort polymerisk tillsats.

I experiment provades nötningsbeständigheten hos de tre materialen. Metoden som användes var ASTM C 1138 (ASTM, 1997), vilken enligt även denna författare är den metod som är mest lämplig att använda vid provning för material ämnade för detta ändamål. Kortfattat fungerar metoden så att en provbit belägen under vatten utsätts för en nötning av järndankar i rörelse. För en utförligare beskrivning se kapitel 8.

Nötningsmotståndet hos betong som innehåller tillsatser av polymer eller silkastoft visade sig ha ett avsevärt bättre nötningsmotstånd, och då främst betongen innehållande polymer. För vissa blandningar innehållande polymer var det en förbättring med över faktor tio. För de blandningarna innehållande silkastoft låg denna förbättring runt en faktor fem. I artikeln refererades till en tidigare studie utförd av Wallace vilken visade på en förbättring med faktor fyra-fem. Vidare presenteras fyra lyckade praktikfall där reparationer med material innehållande silkastoft eller polymer användes. I tre av praktikfallen påvisades ingen eller en låg erosion efter en till två säsonger. För den sista påträffades erosionskador med ett djup på ca 5 mm efter en säsong, skadeutveckling avstannade dock med tiden. Författaren menar att de högre kostnaderna för tillsatsmaterialen silkastoft och polymer snabbt kan räknas hem om man ställer dessa till det ökade nötningsmotståndet, den kortare härdningstiden (polymer) och den bättre arbetbarheten (polymer). Författaren poängterar dock att även en betong innehållande polymerer eller silkastoft kommer att erodera.

Mather (1994) menar att det är möjligt att sammansätta och gjuta betong innehållande antiutvaskningsmedel (AUV) som har jämförbara nötningsegenskaper med traditionell betong som är gjuten i torrhet. Svårigheterna med undervattengjuten betong ligger mycket i materialsammansättningen och utförandet.

Neeley, Saucier och Thornton (1990) skriver om ett fall då ändklacken på en energiomvandlare reparerades efter att ha utsatts för erosion. Skadornas djup var i snitt mindre än ca 1,5 m (5 ft). Den aktuella dammen, Red Rock Dam, är belägen i Des Moines River, Iowa. Reparationen utfördes 1988 och bestod i en undervattensgjutning med betong innehållande AUV. Detta var innan AUV började användas i stor skala i USA och det fanns ingen produkt på den Amerikanska marknaden. Man fick dock tillåtelse, från en tillverkare, att använda ett tillsatsmedel som var under utveckling. Erfarenheterna från reparationen var att AUV inverkan var tydlig, trots ett högt sättmått var betongmassan sammanhängande. Utföraren hade inget problem att pumpa betongen och den var lätt hanterlig. Betongen utjämnades inte direkt vid gjutningen utan det tog ca 5 min, vilket även var resultatet från laboriestudier. Vid ett par tillfällen hamnade slangen ovanför betongen under gjutningen, men även då var betongen sammanhängande och förlorade små mängder finmaterial. Sammanfattningsvis ansåg utförarna att reparationen var lyckad och att AUV:n var en fördel för operationen. Genom

att använda AUV ökar chansen för att få en lyckad undervattensgjutning då det för operatören kan vara svårt att alltid ha slangen i betongmassan på grund av bl.a. det dåliga siktdjupet. Inga resultat från inspektioner efter reparationen delgavs i rapporten.

Under försök utförda i VRD's laboratorium (**Sandström 2009**), har det observerats att det kan vara svårt att kombinera arbetbarhets- och hållfasthetsegenskaper vad det gäller betong innehållande AUV. Vidare så finns det fler aspekter som gör att Mathers's påstående att betong innehållande AUV som gjuts under vatten kan uppvisa jämförbara nötningssegenskaper med traditionell betong som gjuts i torrhet är tveksam, detta behandlas senare i rapporten.

3.3 Sammanfattning av praktikfallen

Skadorna som beskrivs i litteraturen är omfattande och kostsamma att reparera. För att förhindra kavitation samt kraftig erosion krävs mer än korrekt materialsammansättning av reparationsmaterialet. Utformningen av de aktuella konstruktionerna måste då samtidigt vara sådan att risken för att dessa fenomen kan uppstå kraftigt reduceras, eller i bästa fall helt elimineras. När det gäller skador orsakad av en viss typ av erosion (inte fullt lika kraftig som ovan) verkar det emellertid som att materialval kan ha en viss betydelse. Vad som skiljer kraftig erosion från en viss, mindre kraftig, typ av erosion samt vart går gränsen för effekterna av materialval framgår ej av litteraturen.

I den studerade litteraturen har merparten av reparationerna gjorts i torrhet. Det finns dock exempel på reparationer med prefabricerade betongplattor samt ett fall med undervattens gjutning. Det finns även fler som menar att med en undervattensgjutning är det möjligt att uppnå tillfredställande nötningsmotstånd hos undervattengjuten betong innehållande AUV. Litteraturen är dock entydig vad det gäller orsakerna till skador. Ingen av författarna nämner frostangrepp eller urlakning som en bidragande orsak till de beskrivna skadorna. Avslutningsvis, i litteraturen utpekas metoden ASTM C 1138 (**ASTM, 1997**) som den metod som är den mest tillämpbara betongprovningmetoden i detta sammanhang (se sid 29).

4 Laborativa studier av undervattensgjuten betong innehållande tillsatser

I detta kapitel presenteras litteraturstudien av laborativa tester på undervattensgjuten betong (uv-betong) innehållande tillsatser.

För mer ingående information om dessa tester, hänvisas läsares till de refererade arbetena.

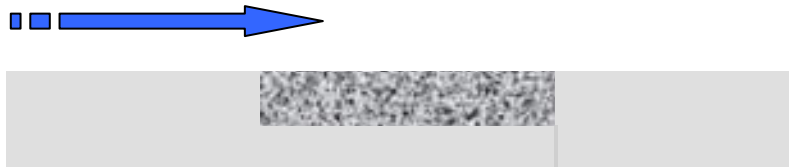
Sonebi & Khayat (1999) och **Sonebi & Khayat (2003)** presenterar en laborativ studie av att gjuta betong i strömmande vatten. Den testade betongen hade ett konstant utbredningsmått (0.5 m), men varierade i vbt (vattenbindemedeltal) och mängden: AUV, silikastoft och flytmedel. Författarna inleder med att påpeka att framsteg har gjorts i att förbättra uv-betongens materialegenskaperna och -prestanda vad gäller gjutning i stillastående vatten. Men lite är känt gällande gjutning i strömmande vatten, med avseende på effekten av: vattenhastighet, betongens sammansättning och dess flytegenskaper.

För att kunna utföra studier i strömmande vatten, byggdes en testrigg, bestående av en kanal där vattenhastigheten var reglerbar.

Studien bestod av ett antal delar:

1. Att studera inverkan av: vbt, AUV och silikastoft på cementutvaskning. Två utvaskningstester utfördes. Det ena baserades på det standardiserade **CRD C 61 (1949)** testet, där i princip en trådkorg fylld med ca 2.2 kg färskbetong släpps 3 ggr igenom 1.7 m hög cylinder fylld med vatten. Efter varje släpp väntades det i 15 s innan korgen sakta lyftes för att sedan upprepa släppet. Efter utförd test vägs korgen (innehållande betong) och jämförs i procent av ursprungsvikten. I en jämförelse med **CRD C 61 (1949)** testet, släpptes samma korg, innehållande samma mängd färskbetong, igenom ett 0.40m vattendjup, som dessutom strömmade med en hastighet från 0.60 m/s till 1.1 m/s. Även i detta fall väntades det i 15 s innan korgen sakta lyftes, varpå proceduren upprepas 3 ggr.
2. Att studera inverkan av strömmande vatten (varierad vattenhastighet) på färskt gjuten betong, med avseende på yterosion. Testet baserades på att betong med två olika utbredningsmått (obs. i detta deltest varierade utbredningsmättet; i övriga tester var måttet konstant) och utvaskning, enligt CRD C 61, (0.4m och 0.42m, resp. 3.9 % och 5.0 % av ursprungsvikten) göts i, sett relativt kanalens botten, ett nedsänkt utrymme på botten av kanalen ($L=0.55\text{m}$ x $b=0.2\text{m}$ x $h=0.04\text{m}$). Den gjutna betongens yta var i nivå med kanalens nedersta kant (se Figur 4.1). Betongytan var täckt tills vattenflödet i kanalen erhållit önskad hastighet, varpå ytan frilades. Erosionen av den exponerade färska

betongytan observerades över tid, 20 s resp. 120 s, vid hastigheter av 0.6 och 1.8 m/s.



Figur 4.1 En schematisk exemplifiering av labbtestet enligt punkt 2.

3. Att studera inverkan av strömmande vatten (varierad vattenhastighet) på uv-betong innehållande tillsatser (vbt=0.41, 8 % silikastoft av massan bindemedel, 0.15 % flytmedel av massan bindemedel), med avseende på materialets hållfasthet (tryck- och spräckhållfasthet) och densitet. Ca 1 m³ betong göts i kanalen, vid varje test, via ett gjutrör för undervattensgjutning. Änden på gjutröret placerades ca 0,38 m från kanalens botten, för att simulera ett fritt fall av betong igenom vatten. Hela betongvolymen göts kontinuerligt, varefter vattenhastigheten stoppades direkt efter gjutning. Detta för att förhindra erosion av den färska betongen. Den resulterande betongkakans geometri var ca: L=5.00m * b=0.47m * h=0.30m. Efter gjutning vilade betongen ca 1 dag i vattnet, varpå betongkakan togs upp ur kanalen och inlindades i våt säckväv. Efter 6 dagar togs borrkärnor för att kunna fastställa betongens tryck- och spräckhållfasthet samt densitet. Innan provningen förvarades borrkärnorna i kalkmättat vatten i 28 dagar.

Resultatet av studierna visar på att:

1. Det standardiserade utvaskningstestet **CRD C 61** ger liknande utvaskningsresultat som de som erhålls när färsk betong läpps igenom 0.4m vatten, med en strömningshastighet mellan ~0.75-1.0 m/s.
 - a. Utvaskningen kan signifikant reduceras genom ökad mängd AUV, trots behovet av ökad mängd flytmedel för att upprätthålla önskat utbredningsmott (0,5 m).
 - b. Att ersätta 10 % cement med silikastoft samt att reducera betongens vbt från 0.47 till 0.41 reducerade utvaskningen signifikant – i synnerhet när vattnets strömningshastighet var > 0.7 m/s.
2. Den färska betongen med ett större utbredningsmått (0.42m) och utvaskning (5.0%), erhöll större yterosion än betong med lägre värden (utbredningsmått=0.4m, utvaskning=3.9%).
3. En signifikant minskning i betongens tryck- och spräckhållfasthet samt densitet detekterades – med avseende på ökad strömningshastighet. Tryckhållfastheten erhöll den största förändringen.

Khayat (1995) presenterar en laborativ studie av att prova frostbeständigheten hos betong (uv-betong) innehållande: AUV, luftporbildare, flytmedel och varierat vct samt sättmått. De olika betongblandningarnas frostbeständigheten utvärderades med hjälp av två standardiserade provningsmetoder: **ASTM C 666** (ASTM, 2008) och **ASTM C 672** (ASTM, 2003).

Studien bestod av tre delar:

1. Att studera inverkan på betongblandningens luftporsstruktur med avseende på inblandningssekvens av tillsatsmedel (luftporbildare, AUV och flytmedel). Den studerade betongblandningens vct och sättmått var 0.45 och omkring 0.2m.
2. Att studera inverkan på betongblandningars frostbeständighet (enligt **ASTM C 666** och **ASTM C 672**), som har varierat: **vct** (0.45 - 0.49), sättmått (0.11m - 0.24m) och luftinblandning, med avseende på tillsatsen av AUV.
3. Att studera inverkan på betongblandningars frostbeständighet (enligt **ASTM C 666** och **ASTM C 672**), som har varierat **vct** (0.32, 0.40 och 0.45) och sättmått (0.16m - 0.23m), med avseende på tillsatsen av AUV och flytmedel.

Resultatet av studien visar på att:

1. Att tillsätta luftporbildare till betongblandningen efter att AUV och flytmedel har tillförts, kan säkerställa att en mindre luftporsradie samt avståndsfaktor mellan porerna uppnås. Detta är sett i relation utifrån att luftporbildare tillsätts betongen innan AUV och flytmedel har tillförts.
2. Frostbeständigheten hos betong (enligt **ASTM C 666**) med vct: 0.45-0.49, innehållande AUV, kan uppvisa en frostbeständighet som överstiger 75 %, vilket motsvarar en betongblandning utan AUV. Detta förutsätter dock att betongblandningen, innehållande AUV, erhåller en luftporsavståndsfaktorn som är begränsad till 400 μm . Vid lägre avståndsfaktorer erhålles högre frostbeständighet.
3. Betongblandningar med ett vct: 0.32 och 0.40, samt en luftporsavståndsfaktor som är lägre än 260 μm , uppvisar 100 % frostbeständighet (enligt **ASTM C 666**) oavsett tillsatsen av AUV.
 - a. Lättflytliga betongblandningar, med vct: 0.32, 0.40 och 0.45 samt AUV och flytmedel, uppvisar en undermålig frostbeständighet med avseende på avskalning (enligt **ASTM C 672**). Detta tros bero på den troligt höga porositeten i betongblandningarnas yttre betongskikt.

Nakhla & Abou-Zeid (2005) presenterar en laborativ studie av att utvärdera betong med ett lågt sättmått innehållande: AUV, flytmedel och silikastoft (10 % av cementvikt). Betongblandningens vct var 0.40 och 0.45.

Blandningar som innehöll AUV erhöll ett sättmått som ej översteg 0.03m, vilket var signifikant lägre än blandningar utan AUV.

Betongprover göts i torrhet samt i vatten med två djup: 0.3 och 0.5 m. Ett av studiens mera intressanta resultat är att undervattensgjuten betong, i detta fall innehållande: AUV, flytmedel och silikastoft, uppvisade en signifikant lägre ythårdhet – i jämförelse med betong som är mer centralt belägen in i provkroppen. Resultaten erhöles via förstörande och oförstörande provning.

Betongens ythårdhet utvärderades med hjälp av studsvärde (engelska: rebound, "Schmidt", hammer), medan betongprovkroppens centralare delar analyserades med ultraljud. Ultraljudsanalysen, i kombination med spräck- och böjhållfasthets provning, uppvisade en god korrelation, vilket visade att betongens ythårdhet var signifikant lägre (studsvärde) i jämförelse med provkroppens mer centralt belägna betong.

Liu (2006) presenterar en laborativ studie av att utvärdera hydromekanisk erosion (strömmande vatten med inhysta partiklar) på betongprovkroppar (med och utan sprickor) som är gjutna i torrhet. Dessa innehöll: silikastoft (0%, 5%, 10% av cementvikt), vct (0.36, 0.38, 0.40), samt vattenreducerandemedel (superplacticerare) för att upprätthåll ett konstant sättmått (0.2m).

Författaren inleder med att påpeka att krackelering och hydromekanisk erosion av betong/betongkonstruktioner i vattenvägar är ett stort problem. För att uppnå en lång livslängd på betongkonstruktioner i vattenvägar krävs att betongen har hög beständighet och högt hydromekaniskt erosionsmotstånd. Vidare påpekas att ett flertal strategier för att öka betongens motstånd mot hydromekanisk erosion är kända.

Dessa är att:

- Öka betongens tryckhållfasthet (med andra ord vct)
- Öka betongens innehåll av grov samt hård ballast
- Att tillföra betongen: polymerer, fiberarmering eller silikastoft

Avslutningsvis påpekas att betongens motstånd mot hydromekanisk erosion, inte primärt är en egenskap hos betongkroppen, utan snarare en egenskap hos betongytan.

Den laborativ studie baserades på att en testrigg utformades för att generera en vattenstråle, med en hastighet på 10 m/s, som skall simulera kraftigt strömmande vatten. Provkropparnas yta besprutades med denna vattenstråle vid tre olika vinklar gentemot ytans tangent: 0°, 45° och 90°. För att simulera samt utvärdera hydromekanisk erosion av betong med sprucken yta infördes en springa/spricka i provkropparna vid gjutning. Provkropparnas springa/spricka varierade i bredd: "ingen", 1, 2 och 3 mm. Dessutom utvärderades effekten av att anbringa vattenstrålen direkt på sprickan, jämfört med en bit ovanför.

Resultatet av studien visade på att:

- Den hydromekanisk erosion av betong ökade när vattenstrålen anbringades direkt mot sprickan, jämfört med en bit ovanför.

- Ökad sprickbredd (1–2–3mm) medförde en ökning i betongens hydromekaniska erosion. Denna inverkan var (i relativa belopp) störst när vattenstrålen anbringades en bit ovanför sprickan, jämfört med direkt mot.
- Ökad vinkel mellan betongytan och vattenstrålen (jet), medförde ökad hydromekanisk erosion av betongen. Denna inverkan var störst när vattenstrålen anbringades direkt mot sprickan, jämfört med en bit ovanför.
- Tillsatsen och mängden av silikastoft medförde ökat motstånd mot hydromekanisk erosion hos betongen. Denna inverkan var relativt sett störst för betong med spricka, jämfört med utan. Tillsättningen av silikastoft med 5 % och 10 % (av cementvikten), när betongprovkroppen hade en sprickbredd på 1 mm, minskade betongens hydromekanisk erosion med 13 % och 25 %.

Laborativa samt litterära studier av undervattensgjuten betong innehållande tillsatser har även rapporterats i tidigare Elforskrapporter av: **Hansson (1995), Bernstone (2000), Björkenstam (2003) och Sandström (2008).**

5 Materialegenskapers inverkan på motståndskraften mot nedbrytning

Förutom den rådande miljön så påverkar sammansättningen hos det cementbundna materialet dess beständighet mot nedbrytning. Vad det gäller betong ämnad för gjutning vid och under vattennivån finns det vissa motsatsförhållanden som tvingar fram en situation där prioriterade egenskaper måste väljas. Vidare, förutom materialsammansättning och den rådande miljön påverkar själva arbetsutförandet det cementbundna materialets beständighet.

5.1 Erosion

Enligt **Möller (1994)** så påverkar hållfastheten, och därmed också vct, motståndet mot erosion. Vidare påverkar också volymförhållandet mellan bruk (cement, vatten och sand) och ballast också motståndet mot erosion, ju lägre andel bruk desto motståndskraftigare material. Tidigare studier gällande effekten av stenstorlekens ($D_{\max}$) och inblandning av stålfiber framställs som motstridiga, medan inblandning av silikastoft (10-20% av cementvikten) anses vara positivt i avseende på hydromekanisk erosion. Tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel sägs inte påverka motståndskrafter mot erosion mer än den effekt den har på hållfastheten.

I **ASTM (2006)** hävdar författarna att vct inte bör överstiga 0.45 för betong ämnad till konstruktioner tillhörande vattenvägar, vilket också överensstämmer med vad som står skrivet i **ACI (2008)**. Vidare påpekas att det inte är hållfastheten i sig som är det centrala när det gäller motståndskraften emot erosion, utan att det snarare är vct samt kvaliteten hos ballasten som är belägen närmast ytan som påverkar nötningsmotståndet. I klartext, säger tryckhållfastheten hos en cylinder eller kub inte mycket om vilket erosionsmotstånd som kan förväntas i en given situation. Som tillägg till det som redan beskrivits ovan nämns här att tillsatser av kolflygaska inte påverkar betongens motståndskraft nämnvärt.

Neville (2008) menar att cementhalten bör vara mindre än 350 kg/m^3 (vilket reglerar pastavolymen) för att inte helt äventyra motståndskraften mot erosion. Vidare menar författaren att vid konstant cementhalt genererar ett lägre sättningsmått ett bättre motstånd. Avslutningsvis menar författaren att betong, oavsett hur väl sammansatt den är, till slut kommer att brytas ner av erosionskrafterna. Hur mycket vi antas kunna påverka livslängden hos en konstruktion som utsätts för erosion genom att göra mer korrekta materialval lämnas tyvärr okommenterat.

5.2 Kavitation

Enligt **Price (1947)** kan inte betong motstå krafterna som uppstår vid kavitation. Enligt **ACI (2008)** påverkar endast materialsammansättningen effekter av kavitation marginellt därav är geometriska/fysiska förändringar av den existerande vattenvägen den mest effektiva metoden för att förhindra skador orsakade av kavitation.

5.3 Urlakning

Enligt **Ekström (2003)** så är den enskilt mest betydande materialtekniska parametern som påverkar urlakningsmotståndet materialets permeabilitet, vilken för cement bestäms av främst vct, hydratationsgrad samt sprickfrekvensen. Även betongens ballast har en viss permeabilitet som är beroende av dess mineralsammansättning och kapillärporer. Nedan, i Tabell 5.1, redovisas en jämförelse mellan permeabiliteten hos olika ballastmaterial och cementpasta med olika vct. Trots att ballasten har en i jämförelsevis låg porositet (ca 3 %) är alltså permeabiliteten likvärdig den för cementpasta. Anledningen till detta är att kapillärporerna är större än hos cementpasta, vilket således ger ett mindre motstånd. Permeabiliteten hos en betong är dock ca 100 gånger så hög som för cementpasta (permeabiliteten hos betong varierar mellan 10^{-14} m/s - 10^{-8} m/s för låga respektive höga vct). Detta beror främst på området kring ballastkornen som har en högre porositet, förekomsten av kristaller ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) och en högre halt mikrosprickor. I avseende på ballastens kornstorleks påverkan på permeabiliteten (se Nilsson 1997) så är ett litet $D_{\max}$ mest fördelaktigt, då den porösa gränzonen mellan ballast och cementpasta är mer påtaglig vid stort $D_{\max}$.

Tabell 5.1 Permeabilitet hos olika ballastmaterial och vct enligt Ekström (2003).

Material	Motsvarar permeabiliteten hos cementpasta med vct
Kvarts diorit	0,42
Marmor	0,48-0,71
Granit	0,70-0,71
Sandsten	0,71

Förutom det ovannämnda finns det också faktorerna som härrör resultatet från utförandet av gjutningen vilket påverkar permeabiliteten betydligt. Utförandets påverkan behandlas senare i kapitlet.

5.4 Frostangrepp

Generellt sett så finns det två sätt att skydda en konstruktion från frostangrepp. Det ena sättet är att skydda konstruktionen från vattenupptag, alternativt reducera vattenupptaget. Detta går att uppfylla genom att använda en tät betong med lågt vct, företrädesvis inte mer än 0,40 i

kombination med någon form av ytskydd (impregnering). Det andra sättet är att använda luftporbildande tillsatsmedel som genererar ett i detta avseende skyddande porsystem, gärna i kombination med ett så lågt vct som möjligt. Det senare är det lämpligare alternativet inte minst för vattenkraftens behov.

Enligt vad som går att finna i **Fagerlund (1994)** så påverkar inte ballasten frostbeständigheten, i normala fall. Det finns undantag då ballastens porstruktur är sådan att den medger sönderfrysning, detta är emellertid mycket ovanligt för svenska förhållanden.

Lindmark (1998) menar att zonen som skiljer ballasten och matrisen av cementpasta har en lägre motståndskraft mot frostangrepp jämfört med cementpastan, något som **Sandström (2009)** experiment delvis stödjer. Det bör således vara mer fördelaktigt att använda ballast med större kornstorlek jämfört med mindre, vilket delvis leder till ev. viss motstridighet då det omvända gäller för motståndskrafter mot urlakning. Förutom de just nämnda faktorerna finns det också faktorer som härrör resultatet från utförandet av gjutningen vilket påverkar materialets motstånd mot frostangrepp. Utförandets påverkan behandlas senare i kapitlet.

5.5 Sammanställning av materialsammansättnings inverkan på nedbrytning

Vilket framgår från avsnitten ovan så finns det mycket att finna i litteraturen vad det gäller materialsammansättnings inverkan på materialets motståndskraft mot de olika nedbrytningsmekanismerna. Nedan, i Tabell 5.2, sammanställs dessa med syftet att framställa eventuella motsatsförhållanden.

Tabell 5.2 Principiell sammanställning av hur materialsammansättningen bör vara, för att på ett positivt sätt påverka motståndskraften mot de, i detta sammanhang, aktuella nedbrytningsmekanismerna.

Nedbrytningsmekanism	D_{max}	vct	Pastavolym	Tillsatsmedel /-material	Kommentar
Erosion	↑/-	↓	↓	Ja	Tillsats av t ex silikastoft (högpresterande betong) har visat sig öka motståndet mot erosion. Inverkan av D _{max} är motstridig i litteraturen
Kavitation	-	↓/-	↓/-	Nej/-	Enligt litteraturen kan inte betong motstå kavitationskrafter
Urlakning	↓	↓	↓/-	Ja	Tillsatsmedel som kan binda hydratationsprodukter reducerar urlakning, t.ex. silikastoft Pastavolymen påverkar betongens totala porositet vilket torde vara negativt i detta avseende. Å andra sidan medger en ökad pastavolym en större "buffert" av urlaknings-bart material vilket borde vara positivt. Vad det gäller D _{max} , se kommentar nedan
Frostangrepp	↑/-	↓	↓/-	Ja	Luftporbildande tillsatsmedel kan skydda betong mot frostangrepp förutsatt att den artificiella porstrukturen blir sådan att detta medges. Ballastens effekt är något oklar då den enligt litteraturen har motsatt effekt jämfört med urlakning, detta anses vara motstridigt

Förklaring av beteckningar:

- ↑ Ju högre desto bättre
- ↓ Ju lägre desto bättre
- Mindre betydande effekt / motstridig litteratur / ej framgått

Enligt Tabell 5.2 så är det fördelaktigt, oavsett miljö, att sträva efter låga vct och små pastavolymer. Ballastens inverkan varierar beroende på nedbrytningsmekanism. Det existerar tillsats-/material medel som kan leda till en ökad motståndskraft mot respektive nedbrytningsmekanism.

5.6 Materialval enligt EN 206-1

När krav ställs på betongmaterial används idag vanligtvis de exponeringsklasser som definieras i den Europeiska standarden EN 206-1. Nedan, i Tabell 5.3, redovisas de olika situationerna som tidigare beskrivits, samt de korresponderade exponeringsklasserna med några av de, i detta sammanhang, viktigaste kraven.

Tabell 5.3 Tolkning av tidigare beskrivna situationer enligt Svenska betongföreningens rapport nr 11 (2002), se Figur 2.4 och Tabell 2.1.

Del av konstruktion	Motsvarande exponeringsklasser enligt EN-206-1	Högsta tillåtna vct	Lägsta tillåtna Cementmängd	Övrigt
1A-C, 3C, 3E ⁷	XC4+XF3	0,55	200 kg/m ³	För XF3 ställs krav gällande materialets frostbeständighet samt på erforderlig lufthalt. För XC4 ställs inget övrigt krav.
1D, 3D, 2	XC1	0,90	200 kg/m ³	

Exponeringsklassen är graderad från 1 till 4 där 4 är den mest krävande miljön i det aktuella avseendet. Beteckningen XC betyder att konstruktionen är utsatt för korrosionsrisk som är föranledd av karbonatisering. Beteckningen XF betyder att konstruktionen är utsatt för frostangrepp. Tillsatsmaterial

⁷ I rapporten skriven av svenska betongföreningen innefattas denna kategori av samtliga delar som är belägna mellan 1 m under lägsta lågvattennivå upp till 2 m över högsta högvattennivå

såsom t ex flygaska, slagg och silikastoft är, med viss restriktion, tillåtna i båda fallen som beskrivs ovan. För ytterligare information hänvisas läsaren till refererad litteratur.

Som går att tyda av exponeringsklasserna i Tabell 5.3 så tar standarden varken hänsyn till erosion eller urlakning för de aktuella konstruktionerna. Vid en jämförelse med vad som går att finna i litteraturen så är kraven på lägsta cementmängd samt högsta tillåtna vct minst sagt liberala i ett beständighetsavseende (vct). Det framgår också av Tabell 5.3 att det i princip inte ställs några krav på betong ämnade för "undervattenskonstruktionerna" 1D, 3D och 2. Enligt litteraturen kan dessa konstruktioner under vissa perioder vara utsatta för kraftigt strömmande vatten som transporterar eroderande material vilka genererar kraftigt nedbrytande effekter.

6 Utförande och efterbehandling

Utförandet har i de allra flesta fallen en stor inverkan på beständigheten, framförallt efterbehandlingen/härdningen har en stor inverkan på materialets livslängd.

Ekström (2003) understryker vikten av ett korrekt härdningsutförande. Ett korrekt härdningsutförande reducerar sprickrisken och ökar därmed motståndskraften betydligt. För att reducera urlakningseffekter bör betong vattenhärdas. I betonghandboken (**Fagerlund 1994**) går det att finna att vattenhärdning har negativ inverkan på frostbeständigheten, här förespråkas istället membranhärdning eller att betongen får chansen att torka ut innan frysning, ett förfarande som kan förbättra frostbeständigheten markant. Sprickbildningar (oavsett anledning) har en negativ effekt på frostbeständigheten, denna negativa effekt kan reduceras i de fall där betongen innehåller luftporbildande tillsatsmedel.

Vad det gäller motstånd mot nötning (erosion) är en slitstark yta alltid att föredra, av den anledningen är resultatet av utförandet också viktigt. **Neville (2008)** hänvisar till den Europeiska Standarden EN 206-1 där härdningstiden för betong ämnad för konstruktioner som utsätts för nötning rekommenderas vara cirka två gånger längre än för någon annan typ av konstruktion. Förstärkning av ytskikt genom vakuumbehandling eller liknande har en positiv inverkan på motståndet gentemot samtliga nedbrytningsmekanismer.

REMR (1991) sammanställer ett antal punkter som är av stor betydelse för att uppnå en god kvalitet vid undervattensgjutning. Konsensus från texten är att noggrannhet, både under förarbetet (bl.a. rengöring av ytan och installation av bergsankare) och gjutningsskedet, är av yttersta vikt för en lyckad gjutning. Dessutom understryks att genom inblandning av AUV ökar chanserna för ett bra resultat.

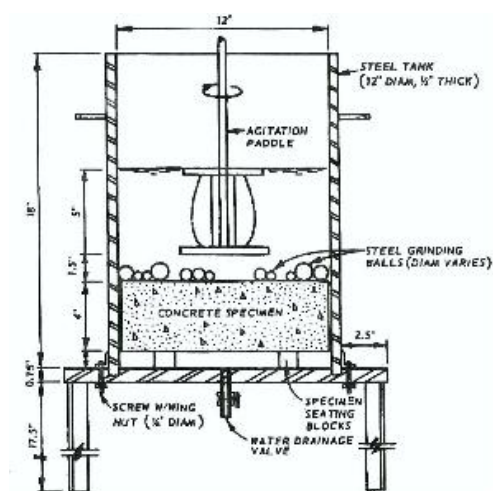
Sammanfattningsvis bör noteras att för att öka motståndet mot effekterna orsakade av de aktuella nedbrytningsmekanismerna bör arbetsutförandet vara sådant att sprickbildning och yterrosion av den färska betongen förhindras. Ju längre betongytorna förblir skyddade efter gjutning, desto bättre blir motståndet mot nedbrytning. I de fall det är möjligt bör även ytskiktet förstärkas genom vakuumbehandling eller annan "ytförstärkande" åtgärd för att öka dess motstånd.

7 Kostnad

Kostnadsskillnaden mellan att utföra en undervattensgjutning jämfört med en konventionell gjutning, inklusive torrläggning, är framförallt kostanden att torrlägga det område som skall gjas. Vid vattenkraftsdammen Rusfors i Umeålv utfördes en reparation av energiomvandlaren genom att torrlägga och gjuta med traditionell betong. Entreprenören uppskattade kostnadsökningen, på grund av torrläggningen, till 50 % högre jämfört med en undervattensgjutningsreparation **Hejll (2009)**. Under ett samtal med Fred Lindholm, projektledare på Vattenfall Services AB, som var inblandad i projektet vid Rosfors, framkom samma uppgift om kostnadsökning vid valet av torrläggning och konventionell gjutning. **Neeley (1988)** tar bland annat upp samma tema. I det fallet talas det om att vid en konventionell gjutning med torrläggning så står torrläggningen för ca 40 % av den totala reparationskostnaden. Det är dock känt att en undervattensgjutning inte ger samma kvalitet i betongen eller framför allt i betongens yta. Den frågan som är intressant att ställa är om en konventionell gjutning ger en i storleksordningen 40-50% bättre betong, med avseende på bl.a. nötningsmotståndet och hållfasthet, och en motsvarande ökad livslängd. Det finns, som framgår av denna rapport, ett flertal sätt att öka en UV-betongs nötningsmotstånd. Genom inblandning av: silikastoft, att använda en betong med lågt vct, samt att alternativt använda polymerbetong. Det som behövs utredas, kring detta, är hur inblandningen av tillsatsmedel, eller alternativa betongblandningar, påverkar kostnaden för UV-betongen och framförallt dess livslängd.

8 Provningsmetoder

I litteraturen presenteras metoden ASTM C 1138 (ASTM, 1997) som den metod som är bäst lämpad för provning av betong ämnad för vattenkraftskonstruktioner utsatta för nötning. I **ASTM (2006)** presenteras den, och andra i detta avseende mindre lämpade metoder. Nedan i Figur 8.1 presenteras en sketch av provningsapparaten tillhörande ASTM C 1138.



Figur 8.1 Apparat för provning av materials nötningsbeständighet i vatten enligt ASTM C 1138, ASTM (2006).

I ASTM C 1138 placeras provkroppar av önskad ålder och kvalitet i provningsapparaten. På provkroppens yta placeras sedan ett antal järndankar av varierande storlek, och propellern startas med en viss hastighet. Efter 72 timmar avslutas provningen och förändringen av provkroppens volym eller massa noteras. Den eventuella förändringen anses vara ett mått på materialets motståndskraft mot erosion av vattenburna partiklar. I litteraturen framgår det att det är mycket svårt att efterlikna de förlopp som sker när betong nöts. Av den anledningen kan endast jämförande provning användas. Vidare så är detta den enda provningsmetod där provkroppen utsätts för nötning samtidigt som den är nedsänkt i vatten.

9 Sammanfattning av litteraturstudien

Betongkonstruktioner utsätts för olika typer av nedbrytningsmekanismer som initialt skadar ytskiktet. Det är ett vanligt förekommande antagande att mekanisk nötning är den bakomliggande orsaken, vilket i de flesta fallen inte är helt sant. Anledning till nedbrytningen kan bero på ett flertal olika mekanismer.

Det finns också ett flertal situationer där delar av en given konstruktion samtidigt kan utsättas för mer än en typ av nedbrytande mekanismer. Det är sannolikt så att synergieffekter renderar i ett snabbare och mer omfattande nedbrytningsförlopp än vad som vore fallet om endast en enskild nedbrytningsmekanism skulle verka. Det har emellertid inte påträffats någon litteratur som beskriver dessa synergieffekter. De nedbrytningsmekanismer som i denna studie anses vara aktuella är mekanisk nötning, kavitation, frostangrepp och urlakning.

Skadorna som beskrivs i litteraturen är omfattande och kostsamma att reparera. För att förhindra kavitation samt kraftig erosion krävs mer än en korrekt materialsammansättning av reparationsmaterialet. Utformningen av de aktuella konstruktionerna måste då också vara sådan att dessa fenomen inte kan inträffa. När det gäller skador orsakad av en mindre kraftig erosion verkar det emellertid som att materialval kan ha en viss betydelse. Vad som skiljer kraftig erosion från en mindre kraftig typ av erosion, samt vart gränser för effekterna av materialval går är oklart.

För vattenkraftskonstruktioner som exponeras för de potentiellt kraftigt nedbrytande miljöerna, som behandlats i denna rapport, ställs i princip inga krav via de exponeringsklasserna som definieras av EN 206-1. Vid en jämförelse med vad som går att finna i litteraturen så är kraven på lägsta cementmängd samt högsta tillåtna vct minst sagt liberala i ett beständighetsavseende. För att öka motståndet mot effekterna orsakade av de aktuella nedbrytningsmekanismerna bör arbetsutförandet vara sådant att sprickbildning förhindras. Ju längre betongytorna förblir skyddade efter gjutning, desto bättre blir motståndet mot nedbrytning. Utifrån litteraturen framgår det också att betong med lågt vct och en hög halt ballast har bäst förutsättningar att klara hydromekanisk erosion.

Det finns även andra metoder för att förstärka ytskiktets, t.ex. genom vakuumbehandling eller annan "ytförstärkande" åtgärd. Detta har dock ej utretts till fullo inom ramen för denna studie. Inblandning av silikastoft eller polymerbetong påvisas i flertalet av studierna som ett effektivt sätt att öka betongens motstånd mot hydromekanisk erosion, både i UV- och konventionell betong, samt till viss mån att minska UV-betongens utvaskning.

I litteraturen är det entydigt att dessa typer av skador repareras i torrhet, även om det finns de som menar att det är möjligt att uppnå tillfredställande nötningsmotstånd hos undervattengjuten betong innehållande AUV och tillsatser (t.ex. sillika och polymerer). Det kan emellertid vara svårt att uppnå önskad kvalitet på ytskiktet hos undervattensgjuten betong, beroende på yttre omständigheter som t.ex. strömmande vatten och den ofrånkomliga cementutvaskningen trots inblandningen av AUV och andra tillsatser. Litteraturen är också entydig vad det gäller orsakerna till skador. Ingen av författarna av litteraturen nämner frostangrepp eller urlakning som den dominerande nedbrytningsmekanismen till de beskrivna nötningsskadorna. I litteraturen utpekas metoden ASTM C 1138 (ASTM 2006) som är den mest tillämpbara betongprovningssmetoden i detta sammanhang.

Frågan är om en kostnadsökning på mellan 40-50 % (vilket framgår i denna litteraturstudie), på grund av torrläggning, är försvarbart i all avseenden med tanke på en större livslängd hos konventionell betong som gjuts i torrhet. Inom ramen för denna studie har dock kunskap och information om livslängd och dess variation ej kunnat erhållas, vilket indikerat att vidare studier samt experimentella försök måste utföras.

10 Förslag på fortsatt arbete

I detta avsnitt presenteras tre olika, men delvis sammanhängande, förslag på fortsatt arbete.

- Via fältstudier och modellförsök fastställa orsaken till uppkomna skador i specifika fall, för att på så sätt kunna åtgärda de bakomliggande orsakerna till skadorna.
- Relativ-/jämförande provning av provkroppar som tillverkats på olika sätt, med olika material, representerande de befintliga alternativen som existerar i de verkliga fallen. Provningsmetod ASTM C 1138 (ASTM, 1997) och kompletteras med t.ex. framtagning av tunnslip för att detektera mikrosprickor, prova ytans draghållfasthet, ultraljudsmätningar och rebound, Schmidt hammer. Detta för att söka korrelationer. Efter detta kan framtida gjutningar och tillståndsbedömningar insamla den data som krävs för att empiriska korrelationer kan framställas.
- Försök i verkliga förhållanden. Samtidigt som reparationsarbeten utförs gjuts provkroppar bestående av förutbestämd materialsammansättning. Mindre provkroppar borrar ut vid lämplig tillfällen i framtiden. Provningsmetod ASTM C 1138 ingår också för att om möjligt kunna korrelera observationer i fält med desamma i labb.

11 Referenser

ACI Committee 201 "*Guide to Durable Concrete*", Report ACI 201.2R-08, June 2008

ACI Committee 210 "*Erosion of Concrete in Hydraulic Structures*", Report ACI 210R-93 Reapproved 2008

ASTM STP 169D, "*Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-making materials*", Ch 18, Bridgeport, NJ, ASTM STP 169D: 2006

ASTM C666/C666M – 03(2008), "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", ASTM C666/C666M – 03: 2008

ASTM C672/C672M – 03, "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals", ASTM C672/C672M – 03: 2003

ASTM C1138 – 97, "Historical Standard: ASTM C1138-97 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)", ASTM C1138 – 97: 1997

Bernstone, C., "Antiurvaskningsmedels inflytande på undervattensgjuten betongs frostbeständighet – En litteraturgenomgång", Elforskrapport 00:19. 2000

Björkenstam, E., "Studie av Undervattensbetong med antiutvaskningsmedel", Elforskrapport 03:16. 2003

Burgi, P. H., Eckley M., S., "*Repairs at Glen Canyon Dam*", Concrete International – Design & Construction, V. 9. No 3 Mars 1987

Ekström, T., "*Leaching of Concrete – Experiments and Modelling*", Lunds Tekniska Högskola avdelningen för byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3090, Lund 2001

Ekström, T., "Leaching of Concrete – The leaching process and its effects", Doktorsavhandling, Lunds Tekniska Högskola avdelningen för byggnadsmaterial, Rapport TVBM-1020, Lund 2003

Fagerlund, G., "Betonghandboken – Material – Frostbeständighet", Svenskbyggtjänst, andra utgåvan, kapitel 21, Stockholm 1994

Fagerlund, G., "A service life model for internal frost damage in concrete", Technical report TVBM-3119, Lund 2004

Hansson, P., "Undervattensgjuten betongs vidhäftning till gammal betong", Elforskrapport 95:5. 1995

Hejll, A., "Rusfors – torrläggning istället för undervattensgjutning", Nyhetsbrev från Elforsk, Anläggningsteknik, Nr.1, Mars 2009

Hopping, P. N., Mass, G. R., "Cavitation Damage on the Karun Dam", Concrete International – Design & Construction, V. 9. No 3 Mars 1987

Khayat, K. H., "Frost Durability of Concrete Containing Viscosity-Modifying Admixtures", ACI Materials Journal, Vol. 92 No. 6. November-December 1995

Lindmark, S., "Mechanisms of Salt Frost Scaling of Portland Cement-bound Materials: Studies and Hypothesis", Doctoral Thesis, Lund Institute of Technology, Report TVBM 1017, Lund 1998

Liu, Y-W., "Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume", Concrete and Building Materials, Vol. 21 Nr. 972-977. 2007

Mather, B., "High-Performance Concrete in the U.S. Army Corps of Engineers", International Workshop on High Performance Concrete, ACI SP-159, Bangkok, Thailand November 1994

McDonald, J. E., Liu, T. C., "Repair of Abrasion-Erosion Damage to Stilling Basins", Concrete International – Design & Construction, V. 9. No 3 Mars 1987

Möller, G., "Betonghandboken – Material – Nötningsmotstånd", Svenskbyggtjänst, andra utgåvan, kapitel 26, Stockholm 1994

Nakhla, D. A., Nagib Abou-Zeid N., "Performance of Low-Slump Underwater Concrete Incorporating Antiwashout Admixtures", Journal of the Transportation Research Board, No. 1914, pp. 61-70. 2005

Neeley, B., Saucier K., Thornton H., "Laboratory evaluation of concrete mixtures and techniques for underwater repairs" USAEWES, Rapport REMR-CS-34, USA (Mississippi), Vicksburg 1990

Neville, A. M., "*Properties of Concrete*", Fourth Edition, Ch. 10, Edinburgh Gate, 2008

Persson, M., Rosenqvist, M., "*Frostsprängning i betongdamm – Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen på betong i vattenkraftverk*", Examensarbete LTH, Rapport TVBM-5074, Lund 2009.

Popavics, S., McDonald W., "Inspection of the engineering conditions of under water concrete structures" USAEWES, Rapport REMR-CS-9, USA (Mississippi), Vicksburg 1989

Price, W. H., "*Erosion of Concrete by Cavitation and Solids in Flowing Water*", Journal of the American Concrete Institute, Vol. 19 No. 9, Detroit May, 1947

Prior, M. E., "Abrasion Resistance, Significance of Tests and Properties of Concrete Exposed to Sea Water", AMST Special Technical Publication No. 169-A, pp 246-260. 1966

REMR, Technical Note CS-MR9.3, "Specialized repair technique: Concrete underwater", Repair Evaluation Maintenance Rehabilitation – Research program, 1991

Sandström, T., "*Durability of Concrete Hydro Power Structures When Repaired With Concrete Overlays*", licentiatavhandling, Luleå Tekniska Universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad, avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå, december 2009, än inte publicerad rapport, datum 2009-11-01

Sandström, T., "Undersökning av frostbeständighet hos undervattensgjuten betong – Fullskaleförsök med betong innehållande antiutvaskningsmedel och luftporbildande tillsatsmedel", Elforskrapport 08:31. 2008

Sandström, T., Labbförsök "förprovning av undervattengjuten betong ämnad reparationsarbeten med betong innehållande AUV-medel" Vattenfall Research & Development AB, Älvkarleby 2009

Smoak W. G., *"Repairing Abrasion-Erosion Damage to Hydraulic Concrete Structures"*, Concrete International – Design & Construction, V?. No? Juni 1991

Sonebi, M., Khayat K H., "Effect of water Velocity on Performance of Underwater Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 5. September-October 1999

Sonebi, M., Khayat K H., "Performance of underwater concrete", For the construction Industry CONCRETE, Vol. 37 No. 3. March 2003

Svenska Betongföreningen, Betongrapport Nr 11, "Vägledning för val av exponeringsklass enligt SS-EN 206-1", Stockholm 2002

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se