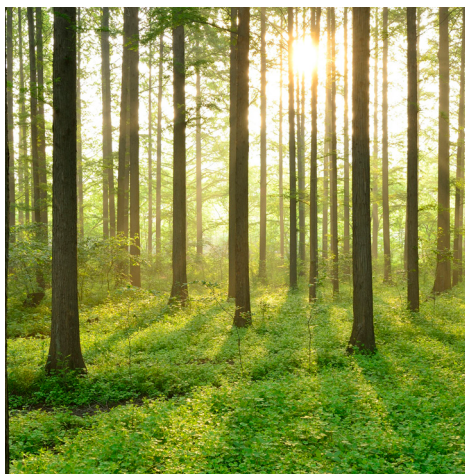


UPPFÖLJNING AV REPARATIONER PÅ SKIBORD AV BETONG

RAPPORT 2019:585



VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Energiforsk

Uppföljning av reparationer på skibord av betong

MARTIN ROSENQVIST

Förord

Skibord är en av de konstruktionsdelar som slits mest vid ett vattenkraftverk, och står därmed också för en stor del av underhållskostnaderna. I ett tidigare projekt har reparationer från 1990-talet undersökts, och i detta projekt görs en ny uppföljning av dessa för att undersöka långtidsegenskaperna hos olika reparationsmetoder.

Syftet med detta projekt är att öka kunskapen om vilka metoder för att reparera skibord som fungerar bra respektive mindre bra i vattenkraftsmiljö i ett längre tidsperspektiv. Studien har utförts av Martin Rosenqvist, teknologie doktor och seniorkonsult vid ÅF.

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

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

I föreliggande studie har skibordsreparationer utförda under 1990-talet undersökts med avseende på reparationernas beständighet. Skibord vid tre kraftverk har ingått i studien. Skiborden reparerades ursprungligen på grund av frostnedbrytning av betongen.

Skador på vattenkraftens skibordskonstruktioner är vanligt förekommande. Dessa konstruktioner utsätts regelbundet för olika kombinationer av mekaniska, kemiska och fysikaliska påfrestningar. Över tid leder dessa påfrestningar till skador och nedbrytning av betongen. Dessa skador påkallar i sin tur reparationer för att bromsa konstruktionens nedbrytning och säkerställa dess funktion.

En första uppföljning av skibordsreparationernas beständighet genomfördes år 2000. Eftersom större reparationer förväntas ha en livslängd om minst 25–30 år ansågs det betydelsefullt att låta utföra en ny uppföljning av samma skibordsreparationer när dessa började närma sig denna ålder.

Under 2018 genomfördes den andra uppföljningen, vilken i huvudsak omfattade okulär besiktning, bomknackning, samt uttag av betongkärnor för bestämning av både reparationsmaterialens och den underliggande konstruktionsbetongens egenskaper. De egenskaper som bestämdes var frostbeständighet, densitet, tryckhållfasthet, samt reparationsmaterialets vidhäftningshållfasthet.

Vad som har tydliggjorts i föreliggande studie är att även reparationer drabbas av nedbrytning över tid. Hastigheten på nedbrytningen skiljer sig däremot åt mellan olika reparationsmetoder. Faktorer som påverkar nedbrytningen kan vara allt från reparationsmetod, till det praktiska utförandet i samband med reparationerna och den rådande exponeringsmiljön vid konstruktionen.

En slutsats som kan dras utifrån denna studie är att läckande vatten från utskovsluckornas tätningar är lika skadligt för reparationsmaterialen som det var för konstruktionsbetongen. I övrigt har det inte varit möjligt att dra några generella slutsatser baserat på denna studie då antalet undersökta skibordsreparationer varit relativt få. Däremot antas det att noggrannheten vid arbetsutförandet bör ha stor betydelse för reparationernas beständighet.

Att anlita entreprenörer med god erfarenhet av reparationsarbeten minskar risken för misslyckade åtgärder. Det är även viktigt att avverka all skadad och försvagad betong innan reparationsmaterialet påförs. Anledningen till detta är att frilägga en yta med frisk betong, vilket bör minska risken att reparationsskiktet spjälkas loss till följd av fortsatt nedbrytning i konstruktionsbetongens övre skikt.

Summary

In this study, repairs on concrete spillways carried out in the 1990s have been examined in order to assess the durability of the repairs. Spillways at three hydro power plants have been part of the study. The concrete spillways were originally repaired due to frost damage.

Damage to concrete spillways at hydro power plants is common to see. Spillway structures are regularly exposed to different combinations of mechanical, chemical and physical stresses. Over time, these stresses result in damage and deterioration of the concrete. In turn, the damage requires repairs to be made to slow down the deterioration of the structure and secure its function.

An initial follow-up study on the durability of the spillway repairs was conducted in 2000. Because major repairs are expected to have a service life of at least 25–30 years, it was considered important to carry out a new follow-up study when the repairs in question were approaching this age.

In 2018, the second follow-up was carried out and it comprised ocular inspection, hammer tapping and extraction of drill cores for determination of properties of both the repair materials and the substrate concrete. The properties determined were frost resistance, density, compressive strength and bond strength between repair material and substrate concrete.

In this study, it has become clear that also repairs suffer from deterioration over time. However, the rate of deterioration varies between different repair methods. Factors that affect deterioration are assumed to range from the repair method to the execution of the repair work and the prevailing exposure conditions at the site.

One conclusion that can be drawn from this study is that leaking water from gate seals is as detrimental to the repair materials as it was to the structural concrete. Otherwise, it has not been possible to draw any general conclusions from this study as too few spillway repairs were examined. However, it is assumed that proper execution of the repair work is essential to the durability of the repairs.

Hiring contractors with long-term experience of repair work should reduce the risk of unsuccessful measures. It is also important to remove all damaged and depleted concrete before the repair material is applied. The reason is to expose a surface of sound concrete. This should reduce the risk of debonding of the repair material as a result of continued deterioration of the upper layer of the substrate concrete.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Avgränsningar	8
2	Utförda skibordsreparationer	9
2.1	Kraftverk 1	9
2.2	Kraftverk 2	10
2.3	Kraftverk 3	11
3	Genomförande av uppföljning	13
3.1	Uppföljning år 2000	13
3.2	Uppföljning år 2018	13
3.3	Utborrning av betongkärnor	13
3.3.1	Kraftverk 1	13
3.3.2	Kraftverk 2	14
3.3.3	Kraftverk 3	15
3.4	Provningsmetoder	16
3.4.1	Frostbeständighet	16
3.4.2	Tryckhållfasthet	16
3.4.3	Densitet	16
3.4.4	Draghållfasthet	17
4	Resultat	18
4.1	Kraftverk 1	18
4.1.1	Observationer vid besiktning	18
4.1.2	Resultat från provtagning	22
4.2	Kraftverk 2	22
4.2.1	Observationer vid besiktning	22
4.2.2	Resultat från provtagning	27
4.3	Kraftverk 3	28
4.3.1	Observationer vid besiktning	28
4.3.2	Resultat från provtagning	33
5	Diskussion och slutsatser	34
6	Referenser	37

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Vattenkraftens utskovskonstruktioner exponeras över tid för mekaniska, kemiska och fysikaliska påfrestningar. Skiborden utsätts framförallt för mekaniska laster i samband med avbördning då stora vattenmassor strömmar över konstruktionen. Varierande temperaturer över året kombinerat med hög fuktbelastning resulterar dessutom i fysikaliska och kemiska påfrestningar. Till följd av samverkan leder dessa påfrestningar till hög sannolikhet för nedbrytning av betongmaterialet. Skador på skibordskonstruktioner är därför vanligt förekommande.

Rosenqvist (2018) angav att det i början av 1900-talet var vanligt att förse skibord i betong med en yttre stenbeklädnad för att skydda betongen mot mekaniskt slitage. Med successiva förbättringar av betongbyggnadstekniken under 1930-talet sjönk behovet av skyddande stenbeklädnader. Incitamenten att klä skiborden med sten försvagades ytterligare i takt med att nya problem uppstod på grund av bristande beständighet hos stenbeklädnader. Från och med 1940-talet uppfördes skiborden vanligtvis helt och hållet i betong. Med vetskap om förekommande påfrestningar användes i många fall betong av högre kvalitet än till övriga konstruktioner.

Skadade skibord har dock varit ett återkommande problem. Björkenstam (1999) uppgav att över 20 % av alla betongreparationer som utfördes på vattenkraftverk gällde utskovskonstruktionerna där framförallt skiborden var i fokus. Den mest vanliga skadeorsaken på skibord var frostangrepp, vilket lett till avskalning eller spjälkning av större betongsjok. Den mest förekommande reparationsmetoden var konventionell pågjutning med överform. Metoden användes huvudsakligen när hela skibordet skulle åtgärdas. Andra vanligt förekommande metoder var sprutbetonering och applicering av polymermodifierade lagningsbruk.

I en rapport av Nordström (1996) angående sprutbetongs beständighet presenteras en uppföljning av utförda sprutbetonglagningar på skibord till tre vattenkraftverk. Reparationsarbetena hade utförts runt år 1990. Sprutbetongen hade försetts med fibrer av stål eller polypropen. Vid sprutningsarbetet tillämpades torrmetoden.

Uppföljningen visade att uppkomna skador i sprutbetongen ofta påträffades i områden med förhållandevis tunna sprutbetongskikt (≤ 20 mm). I områden där sprutbetongen översteg 30 mm i tjocklek var resultaten bättre och god vidhäftning mot underlaget hade i regel erhållits. En annan slutsats från uppföljningen var att rengöring av ytan innan sprutning är av stor betydelse för vidhäftningen.

I en studie fokuserad på utförda skibordsreparationer genomförde Björkenstam (2001) besiktning och provtagning vid tre kraftverk år 2000. Olika metoder hade använts för reparation av skiborden mellan åren 1992 och 1997. Reparationerna utfördes medelst sprutbetong, konventionell pågjutning med vakuumbehandling, samt polymermodifierade lagningsbruk. Betongkärnor togs ut från de reparerade skiborden för bestämning av lagningsmaterialets frostbeständighet, tryckhållfasthet och vidhäftning mot underlaget.

Eftersom större reparationer förväntas ha en livslängd om minst 25–30 år ansågs det intressant att genomföra en ny uppföljning av samma skibordsreparationer i slutet av 2010-talet. Under 2018 har därför besiktning och provtagning genomförts vid samma tre kraftverk för att undersöka reparationernas tillstånd och jämföra observationer och provningsresultat med de från uppföljningen år 2000.

1.2 SYFTE

Det huvudsakliga syftet med föreliggande studie är att förbättra kunskapsläget med avseende på utförda reparationer av skadade skibord. Detta för att bygga vidare på de erfarenheter som sedan tidigare finns kring reparationer av skibord och vilka krav som rimligen kan ställas på reparationens förväntade livslängd.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Fokus för denna studie är att på nytt följa upp de skibordsreparationer som en gång tidigare följdes upp av Björkenstam (2001). Uppföljning av reparationer utförda på andra konstruktionsdelar ligger utanför ramen för denna studie. Detsamma gäller framtagning av generella rekommendationer för val av metod inför reparation av skadade skibord. Istället kommer för- och nackdelar med avseende på respektive reparationsmetod att översiktligt diskuteras.

2 Utförda skibordsreparationer

I föreliggande studie har valet av skibordsreparationer för uppföljning baserats på en tidigare studie av Björkenstam (2001). Till den första studien hade tre kraftverk valts ut för att olika typer av reparationsmetoder skulle kunna undersökas.

2.1 KRAFTVERK 1

Det första kraftverket i denna studie ligger utmed Norsälven i södra Värmland. Kraftverk med tillhörande regleringsdamm började att byggas i början av 1940-talet och kraftverksbygget fullbordades år 1944. Åren 2006 och 2007 utfördes stabilitetshöjande åtgärder på dammen. Kraftverket ägs av Fortum.

Regleringsdammen vid kraftverket uppfördes i betong. Sett från vänster till höger består dammen av intag till kraftverket, flottningsutskov, fyra ytutskov och till sist en kröndamm. I likhet med Björkenstam (2001) benämns utskoven i denna rapport A, B, C och D (Figur 1). Riktningen är från vänster till höger i älvens flödesriktning.



Figur 1. Nedströmsvy över utskovspartiet i regleringsdammen vid kraftverk 1. I denna rapport benämns de fyra utskoven A, B, C och D med A närmast kraftverket och D närmast timmertraversen.

Enligt Björkenstam (2001) utfördes reparationsarbeten på skiborden till samtliga utskov vid ett och samma tillfälle 1992. Dock valdes olika reparationsmetoder för de fyra skiborden. Metoderna var konventionell pågjutning, Densit-lagning, samt sprutbetonglagning med och utan glasfibrer. Densit var enligt Rådman (2000) ett lagningsbruk bestående av cement och silika med tillsats av kvarts/kvartsit eller korundhaltig kalcinerad bauxit. Syftet att använda olika reparationsmetoder på skiborden var att kunna följa upp och utvärdera lagningarnas beständighet.

Information om skadeorsak, valda reparationsmetoder och praktiskt utförande återfinns i Björkenstam (2001) och presenteras i korthet i Tabell 1.

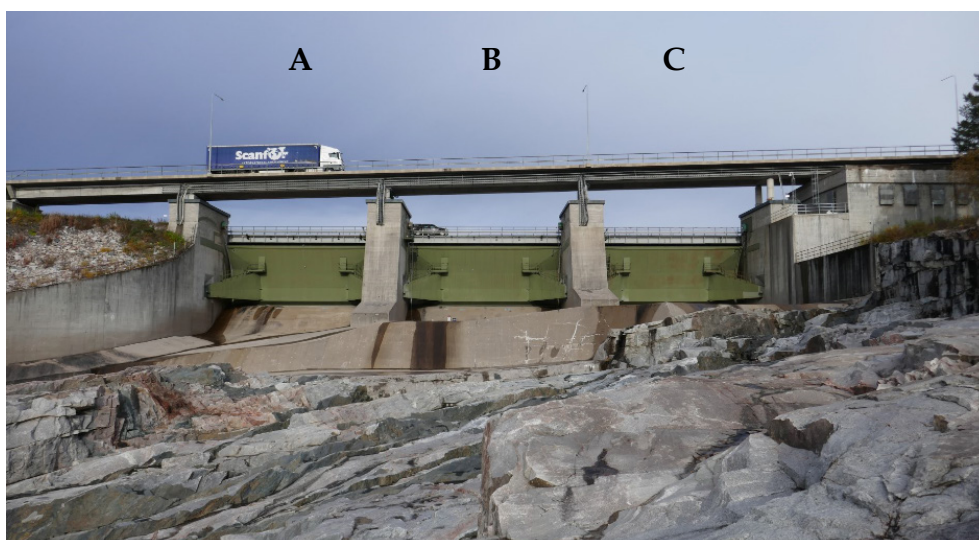
Tabell 1. Information om skadeorsak och tillvägagångssätt vid reparationer av skibord vid kraftverk 1.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C	Skibord D
År för reparation:	1992			
Typ av skada:	Skibordsytorna var skadade och rostig armering var delvis synlig.			
Skadeorsak:	Orsaken till skadorna bedömdes bero på frostnedbrytning.			
Typ av reparation:	Lagningsbruk	Sprutbetong	Betonggjutning	Sprutbetong
Material:	Densit	Sprutbetong 0-8 mm (glasfibrer)	Betong K 40	Sprutbetong 0-8 mm
Metod:	Applicering	Torrspjutning	Gjutning (form)	Torrspjutning
Förarbeten:	Lös betong avlägsnades medelst handhållen mekanisk bilning. Ytan sandblåstrades därefter och tvättades med vatten.			
Efterarbeten:	Vattenhärdning.			
Förutsättningar:	Väderförutsättningarna var goda. Reparationerna utfördes i maj/juni.			
Kontroll:	Inga synliga skador noterades vid avsyning. Ingen provtagning utfördes.			

2.2 KRAFTVERK 2

Det andra kraftverket i föreliggande studie ligger utmed Stora Lule älv i mellersta Lappland. Kraftverk med tillhörande regleringsdamm började att byggas år 1951 och färdigställdes 1954 då kraftverket togs i drift. Kraftverket ägs av Vattenfall.

Regleringsdammen vid kraftverket är huvudsakligen uppförd av fyllningsmassor. Sett från vänster till höger i älvens flödesriktning består dammanläggningen av en intagsbyggnad och tre ytutskov i betong, samt kröndamm av fyllningsmassor. Utskoven benämns A, B och C (Figur 2).



Figur 2. Nedströmsvy över utskovspartiet i regleringsdammen vid kraftverk 2. I denna rapport benämns de tre utskoven C, B och A med C närmast kraftverkets intagsbyggnad.

Enligt Björkenstam (2001) reparerades de tre skiborden vid olika tillfällen. Utskov C åtgärdades 1991, utskov A 1994 och utskov C 1997. Reparationsmetoden som användes var konventionell pågjutning med efterföljande vakuumbehandling. Reparationen av skibord C beskrivs översiktligt i en rapport av Täljsten (1991).

Information om skadeorsak, vald reparationsmetod och praktiskt utförande återfinns i Björkenstam (2001) och presenteras i korthet i Tabell 2.

Tabell 2. Information om skadeorsak och tillvägagångssätt vid reparationer av skibord vid kraftverk 2.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C
År för reparation:	1994	1997	1991
Typ av skada:	Avskalning med frilagd ballast på skibordsytorna.		
Skadeorsak:	Orsaken till skadorna bedömdes bero på frostnedbrytning.		
Typ av reparation:	Konventionell pågjutning med kantform.		
Material:	Betong K 40: vct 0,5, stenmax 32 mm, sättmått 60–70 (150) mm.		
Metod:	Gjutningarna delades upp i etapper. Vibrering med vibratorbalk.		
Förarbeten:	Skadad betong avverkades medelst vattenbilning. Motgjutningsytan högtryckstvättades därefter. Enstaka armeringsjärn i underliggande konstruktionsbetong drabbade av korrosionsskador ersattes med nya.		
Efterarbeten:	Vakuumbehandling, stålglättning, täckning med plast i fyra dygn, vattenbegjutning efter ett dygn.	Vakuumbehandling av enstaka ytor på grund av mycket varmt väder. I övrigt som för skibord A och C.	Vakuumbehandling, stålglättning, täckning med plast i fyra dygn, vattenbegjutning efter ett dygn.
Förutsättningar	Bra.	Mindre bra – mycket varmt och soligt.	Bra – reparationerna utfördes i september.
Kontroll:	Kontrollant närvarade under arbetsutförandet.		

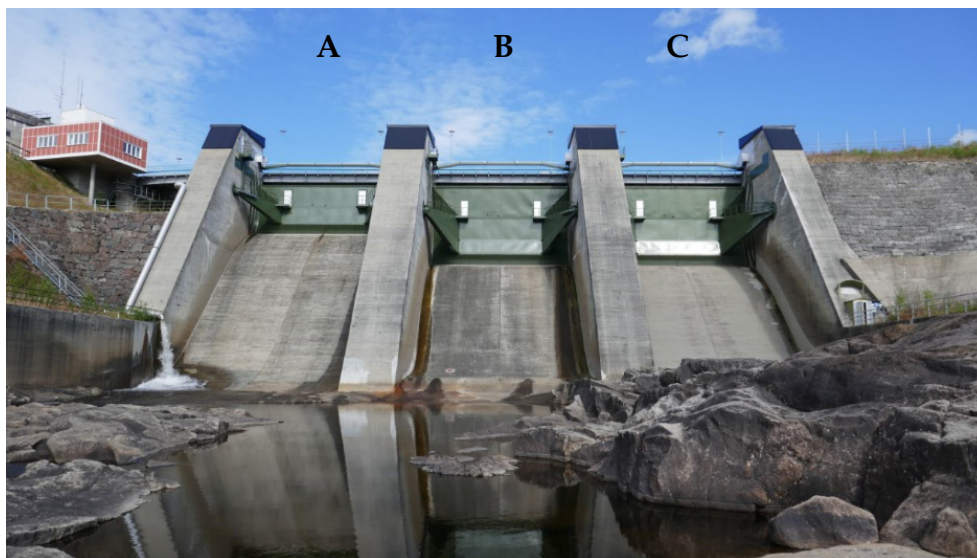
2.3 KRAFTVERK 3

Det tredje kraftverket i denna studie ligger utmed Ångermanälven i den västra delen av Ångermanland. Kraftverk och tillhörande regleringsdamm började att byggas 1952 och fullbordades 1956. Kraftverket ägs av Vattenfall.

Regleringsdammen vid kraftverket är huvudsakligen uppförd av jord- och sten-fyllningsmassor. Sett från vänster till höger i älvens flödesriktning är dammen sammansatt av en kröndamm bestående av fyllningsmassor, samt därefter tre ytutskov och en intagsbyggnad i betong. Utskoven benämns A, B och C (Figur 3).

Enligt Björkenstam (2001) reparerades skibord C och delar av skibord A år 1995 med Chesterton-bruk. Det Chesterton-bruk som användes var en kvartsförstärkt polymerkomposit med bindemedel i form av epoxi, cement eller en kombination av dessa. År 2014 reparerades även kanterna på skibord B med Chesterton-bruk.

Information om skadeorsak, vald reparationsmetod och praktiskt utförande återfinns i Björkenstam (2001) och presenteras i korthet i Tabell 3.



Figur 3. Nedströmsvy över utskovspartiet i regleringsdammen vid kraftverk 3. I denna rapport benämns de tre utskoven A, B och C med A närmast kraftverkets intagsbyggnad.

Tabell 3. Information om skadeorsak och tillvägagångssätt vid reparationer av skibord vid kraftverk 3.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C
År för reparation:	1995	2014	1995
Typ av skada:	Lokala skador vid plats där vatten för minimi-tappningen släpps ut.	Friläggning av grov ballast utmed skibordets kanter.	Omfattande friläggning av grov ballast och armering. Liknande skador på pelarsidor.
Skadeorsak:	Orsaken till skadorna bedömdes bero på frostnedbrytning.		
Typ av reparation:	Lagningsbruk.		
Material:	Chesterton ARC 790 H	Chesterton ARC 791	Chesterton ARC 790 H
Metod:	Applicering för hand med murslev. Större och djupare skador fylldes först i innan ett 20 mm tjockt sammanhängande och jämnt skikt applicerades. Applicering av bruket utfördes i tvärgående fält med cirka 0,6 m bredd.		
Förarbeten:	Vattenfräsning för avverkning av ett 3–5 mm tjockt övre skikt. Vid grövre skador avverkades betong upp till ett djup av 10 cm.		
Efterarbeten:	Inget.		
Förutsättningar	Goda – reparationerna både år 1995 och 2014 utfördes under augusti.		
Kontroll:	Slutbesiktning i september 1995. Draghållfastheten var i medeltal 0,98 MPa för skibord A och 0,87 MPa för skibord C. Brott i betongen. Lagningsens tjocklek var i medeltal 17 mm för skibord A och 9 mm för skibord C.		

3 Genomförande av uppföljning

3.1 UPPFÖLJNING ÅR 2000

En första uppföljning av de utförda skibordsreparationerna vid de tre kraftverken genomfördes år 2000. Uppföljningen omfattade huvudsakligen okulär besiktning, bomknackning, sprickviddsmätning, samt uttag av betongkärnor för bestämning av reparationsmaterialens egenskaper. Dessa egenskaper var frostbeständighet, tryckhållfasthet, samt draghållfasthet/vidhäftningshållfasthet.

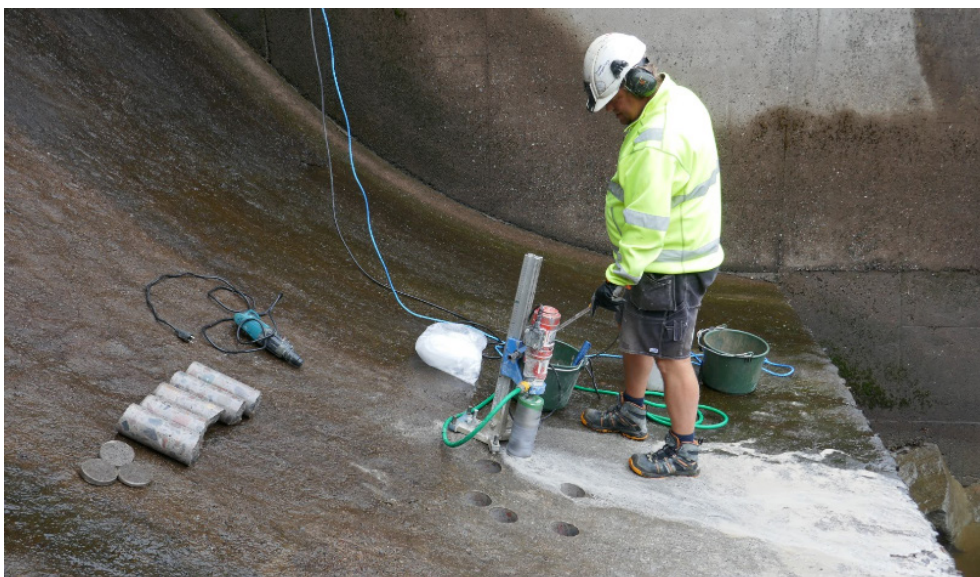
3.2 UPPFÖLJNING ÅR 2018

En andra uppföljning genomfördes år 2018 då snittåldern på reparationerna var drygt 25 år. Uppföljningen omfattade okulär besiktning, bomknackning, samt uttag av betongkärnor för bestämning av både reparationsmaterialets och den underliggande betongens egenskaper. De egenskaper som bestämdes var frostbeständighet, densitet, tryckhållfasthet och draghållfasthet.

3.3 UTBORRNING AV BETONGKÄRNOR

3.3.1 Kraftverk 1

För utborrning av betongkärnor anlätades Vattenfalls betonglaboratorium. Arbetet utfördes 14 augusti 2018. Från skibord A borrades sex kärnor ut (Figur 4) och från skibord B fem kärnor (Figur 5). Borrkärnornas placering valdes med avseende på tillgänglighet och personsäkerhet. Inga betongkärnor borrades ut från skibord C och D på grund av att dessa ej bedömdes åtkomliga vid tillfället. De utborrade betongkärnorna hade en diameter av 96 mm och var upp till 250 mm långa.



Figur 4. Utborrning av betongkärnor från den nedre delen av skibord A vid kraftverk 1.



Figur 5. Plats för utborrning av betongkärnor från den övre delen av skibord B vid kraftverk 1.

3.3.2 Kraftverk 2

För utborrning av betongkärnor anlätades Arctic Betonghåltagning. Borrningen utfördes 27 september 2018. Från skibord C borrades sex kärnor ut (Figur 6) och från skibord B sex kärnor (Figur 7). Borrkärnorna placerades i närheten av hålen från den föregående studien. De utborrade kärnorna hade en diameter av 94 mm och var upp till 350 mm långa. Inga betongkärnor borrades ut från skibord A då förutsättningarna vid reparationstillfället hade varit likartade de för skibord C. Borrningsarbetet avbröts ifall armeringsjärn påträffades.



Figur 6. Inringat område markerar platsen för sex utborrade betongkärnor från den övre delen av skibord C vid kraftverk 2. Det inringade området inrymmer även borrhål från 2000 års uppföljning.



Figur 7. Inringat område markerar platsen för sex utborrade betongkärnor från den övre delen av skibord B vid kraftverk 2. Det inringade området inrymmer även borrhål från 2000 års uppföljning.

3.3.3 Kraftverk 3

För utborrning av betongkärnor anlätades Sollefteå såg & borrar teknik SBT. Arbetet utfördes 7 augusti 2018. Från skibord C borrades sex kärnor ut (Figur 8). Placering av betongkärnorna valdes med hänsyn till tillgänglighet och personsäkerhet. De utborrade kärnorna hade en diameter av 95 mm och var upp till 210 mm långa. Inga betongkärnor borrades ut från skibord A och B.



Figur 8. Plats för utborrning av sex betongkärnor från den nedre delen av skibord C vid kraftverk 3.

3.4 PROVNINGSMETODER

3.4.1 Frostbeständighet

I den mån det var möjligt bestämdes reparationsskiktets frostbeständighet både i ytan och i ett snitt 50 mm från överytan. Dessutom bestämdes den underliggande konstruktionsbetongens frostbeständighet. Frostbeständigheten bestämdes både i närvaro av sötvatten och saltvatten (3 % NaCl-lösning).

Valet att bestämma frostbeständigheten i närvaro av NaCl-lösning grundar sig på att Rosenqvist (2016) experimentellt visade att betong med vct upp till 0,7 och utan inblandning av luftporbildande tillsatsmedel kan uppvisa god frostbeständighet i närvaro av sötvatten i laboratoriemiljö. Erfarenheter från verkligheten har dock visat att betong med vct upp mot 0,7 och utan extra luftinblandning vanligtvis ej har tillräckligt god frostbeständig över tid i vattenkraftsmiljö.

Vid redovisning av resultaten anges det provade snittets position på följande vis; provning av reparationsskiktets överyta benämns "*Frostprovn. ö.yta*", provning av ett snitt i reparationsmaterialet benämns "*Frostprovn. rep*" och provning av ett snitt i underliggande konstruktionsbetong benämns "*Frostprovn. K-btg*".

Frostbeständigheten bestämdes i enlighet med provningsmetod SS 13 72 44:2005 med avsteget att endast ett prov användes för respektive provningsförfarande.

Betongens frostbeständighet bedöms som *Mycket god* ifall avflagningarnas medelvärde efter 56 fryscykler är mindre än 0,10 kg/m². Frostbeständigheten bedöms som *God* ifall avflagningarnas medelvärde är mindre än 0,20 kg/m² efter 56 cykler. Ifall avflagningarnas medelvärde är mindre än 1,0 kg/m² efter 56 frostcykler bedöms betongens frostbeständighet som *Acceptabel*. I händelse av att avflagningarna är än större är frostbeständigheten *Inte acceptabel*.

3.4.2 Tryckhållfasthet

Om möjligt bestämdes reparationsskiktets och den underliggande konstruktionsbetongens tryckhållfasthet. Vid redovisning av resultaten anges provets position på följande vis; provning av reparationsmaterialet benämns "*Tryckhållf. rep.*" och provning av konstruktionsbetongen benämns "*Tryckhållf. K-btg*". En provkropp från respektive material genomgick provning.

Tryckhållfastheten bestämdes i enlighet med provningsmetod SS-EN 12390-3:2009.

3.4.3 Densitet

I den mån det var möjligt bestämdes reparationsskiktets och den underliggande konstruktionsbetongens densitet. Vid redovisning av resultaten anges provets position på följande sätt; provning av reparationsmaterialet benämns "*Densitet rep.*" och provning av konstruktionsbetongen benämns "*Densitet K-btg*". En provkropp från respektive material genomgick provning. Bestämningen av densiteten var en del av provningsförfarandet vid bestämning av betongmaterialets tryckhållfasthet (avsnitt 3.4.2).

Densiteten bestämdes i enlighet med provningsmetod SS-EN 12390-7:2009.

3.4.4 Draghållfasthet

För bestämning av reparationsskiktets vidhäftningshållfasthet mot underliggande konstruktionsbetong genomgick minst två provkroppar från respektive skibord provning. Reparationsskiktets vidhäftningshållfasthet bestämdes i laboratoriet genom provning av de utborrade provkropparnas draghållfasthet.

Draghållfastheten bestämdes i enlighet med provningsmetod SS 13 72 31:2005 med avsteget att provkropparnas längd ej alltid var större än dubbla diametern. Avsteget gällde endast provkropparna med tunna reparationsskikt.

Provkropparna förbereddes genom att ändytorna slipades så att kraven på planhet enligt SS-EN 12390-1 uppnåddes. Därefter limmades stålplattor mot ändytorna. Stålplattorna är konstruerades så att de kan monteras i provningsmaskinen.

Utöver draghållfastheten noterades även läget för brottet. Följande förkortningar används för att beskriva läget för brottet; vidhäftningszon (*vhz*), reparationsskikt (*rep*) och konstruktionsbetong (*K-btg*). Rekommenderade värden på reparations-skiktets vidhäftningshållfasthet är $\geq 1,5$ MPa alternativt brott i den underliggande konstruktionsbetongen.

4 Resultat

I följande avsnitt redovisas resultaten från utförda provningar på reparationsskikt och underliggande konstruktionsbetong från skiborden tillhörande de tre kraftverken. Dessutom presenteras gjorda observationer från de okulära besiktningar som utfördes i samband med utbörningen av betongkärnor.

Provningsresultat och gjorda observationer från 2018 års uppföljning jämförs med motsvarande resultat och observationer från 2000 års uppföljning.

4.1 KRAFTVERK 1

4.1.1 Observationer vid besiktning

Skibord A

Skibordet har belagts med ett lagningsbruk av typ Densit. Vid 2000 års uppföljning såg lagningen bra ut och ingen bom förekom. Det som noterades var att fogmassan i den förmodade rörelsefogen mitt på skibordet nästintill hade försvunnit. Till följd av läckage från luckorna noterades påväxt av mossor och alger på skibordet.

Vid 2018 års uppföljning kvarstod läckaget från luckorna, vilket leder till att stora delar av skibordets yta utsätts för hög fuktbelastning året runt (Figur 9). Utmed rännilarna förekom fortsatt påväxt av mossor och alger. Mindre släpp i lagningen noterades framförallt på skibordets nedre delar (Figur 10). Dessutom förekom det mindre områden med bom på skibordet. Vid utbörningen av två betongkärnor lossnade dessutom Densit-bruket från konstruktionsbetongen. Densit-lagningens tjocklek bedömdes i medeltal variera mellan 10 och 15 mm (Figur 11). Eventuell sprickbildning i bruket kunde ej noteras till följd av skibordets blöta tillstånd.



Figur 9. Nedströmsvy över skibord A vid kraftverk 1. Skibordet har reparerats med Densit-bruk. Området inom vilket betongkärnorna borrades ut är markerat av en ring.



Figur 10. Skibord A vid kraftverk 1. Mindre släppor i Densit-lagningen. 1 m tumstock som referens.



Figur 11. Tjockleken på Densit-lagningen varierade mellan 10 och 15 mm med enstaka djupare partier.

Skibord B

Skibordet har belagts med sprutbetong innehållande glasfibrer. Vid uppföljningen år 2000 noterades det att mindre stenar hade släppt från ytan. Endast en mindre skada kunde noteras. Ingen bom upptäcktes vid tillfället. I likhet med skibord A hade fogmassan i den förmodade rörelsefogen nästintill försvunnit.

Vid 2018 års uppföljning noterades det att en stor del av sprutbetongen på de övre delarna av skibordet uppvisade sprickbildning och kalkutfällningar (Figur 12). Mosspåväxt förekom på skibordets hjässa och nedre delar där de senare även var blöta, varför eventuella sprickor inte syntes. Ingen bom upptäcktes på skibordets övre delar. Sprutbetongens tjocklek bedömdes i medeltal vara 10 mm (Figur 13). En liten skada har lagats längst ned på skibordet till höger om rörelsefogen.



Figur 12. Nedströmsvy över skibord B vid kraftverk 1. Skibordet har lagats med sprutbetong.



Figur 13. Sprutbetonglagningens tjocklek var i medeltal 10 mm med enstaka djupare partier.

Skibord C

Skibordet har reparerats genom en konventionell pågjutning som överbrygger den förmodade rörelsefogen. Vid 2000 års uppföljning påträffades ingen bom. Däremot noterades det att ojämnheter i pågjutningens yta förekom i skibordets nedre delar. Några följdskador av detta kunde ej konstateras.

Vid 2018 års uppföljning var skibordet ej tillgängligt för besiktning. Anledningen var att luckan ej slöt tätt mot tröskelbalken varför skibordet överströmmades.

Skibord D

Skibordet har belagts med sprutbetong. Vid 2000 års uppföljning noterades det att mindre stenar hade lossnat från sprutbetongen, vilket orsakat en något ojämn yta. Vidare förekom det läckage från luckan, vilket resulterade i en blöt skibordsyta. I likhet med skibord A och B hade fogmassan i den förmodade rörelsefogen nästan försvunnit. Vid utbörning av betongkärnor noterades det att vidhäftning ej fanns över hela kontaktytan.

Vid 2018 års uppföljning besiktades skibordet ej på nära håll till följd av tidsbrist. Vad som däremot noterades okulärt från håll var att det förefaller som att olika slags sprutbetong kan ha använts på respektive sida om rörelsefogen. Detta kan ses i Figur 14 genom skillnaden i kulör i det fuktiga området. Påväxt av mossor förekommer på skibordets hjässor, nedre delar, samt kanter mot pelarna. Mindre växtlighet förekommer dessutom längs med rörelsefogen. Små områden med sprickbildning och kalkutfällningar finns utspridda över skibordet med viss koncentration vid de nedre delarna. Längst ned mot skibordets slut har sprutbetong längs kanten släppts från underliggande konstruktionsbetong.



Figur 14. Nedströmsvy över skibord D vid kraftverk 1. Skibordet har lagats med sprutbetong.

4.1.2 Resultat från provtagning

I Tabell 4 presenteras provningsresultaten från 2018 års uppföljning av skibordsreparationerna utförda vid kraftverk 1. För jämförelse skall återges även resultat från 2000 års uppföljning. Resultat av större betydelse är att den underliggande konstruktionsbetongens frostbeständighet är undermålig, vilket även gäller för sprutbetongen på skibord B. Vidare indikerar resultaten att Densit-lagningens vidhäftningshållfasthet försämrats sedan uppföljningen år 2000.

Tabell 4. Provningsresultat från 2018 och 2000 års uppföljning av skibordsreparationer vid kraftverk 1. Resultat från frostprovnings som överskrider acceptabla mängder har markerats med röd färg.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C	Skibord D
Material:	Densit	Sprutbetong 0-8 mm (glasfibrer)	Betong K 40	Sprutbetong 0-8 mm
Btg-kärnor 2000:	Såg bra ut.	Såg bra ut.	Såg bra ut.	Skiktningar i sprutbetongen.
Btg-kärnor 2018:	Lagning släppte från två kärnor.	Såg bra ut.	Provades ej.	Provades ej.
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2000:	Provades ej.	2,30 kg/m ²	0,06 kg/m ²	Provades ej.
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2018:	0,10 kg/m ²	1,51 kg/m ²	Provades ej.	Provades ej.
Frostprovn. ö.yta (3 % NaCl) 2018:	0,18 kg/m ²	1,27 kg/m ²	Provades ej.	Provades ej.
Frostprovn. K-btg (sötvatten) 2018:	0,02 kg/m ²	0,14 kg/m ²	Provades ej.	Provades ej.
Frostprovn. K-btg (3 % NaCl) 2018:	9,63 kg/m ²	8,91 kg/m ²	Provades ej.	Provades ej.
Tryckhållf. K-btg 2000:	40 MPa	Provades ej.	40 MPa	Provades ej.
Tryckhållf. K-btg 2018:	78 MPa	59 MPa	Provades ej.	Provades ej.
Densitet 2018:	2 440 kg/m ³	2 600 kg/m ³	Provades ej.	Provades ej.
Vidhäftnings- alt. draghållf. 2000:	1,5 MPa (K-btg) 2,4 MPa (K-btg)	1,15 MPa (K-btg)	Provades ej.	1,23 MPa (K-btg) 0,95 MPa (K-btg)
Draghållf. 2018:	0,05 MPa (vhz) 0,10 MPa (vhz) 0,35 MPa (vhz)	0,70 MPa (vhz) 1,60 MPa (rep) 1,55 MPa (rep)	Provades ej.	Provades ej.

4.2 KRAFTVERK 2

4.2.1 Observationer vid besiktning

Skibord A

Skibordet har reparerats genom konventionell pågjutning med direkt efterföljande vakuumbehandling. På grund av en något ojämn yta efter gjutningarna diamant-slipades delar av ytan, varför grov ballast är synlig på ett flertal platser. Vid 2000 års uppföljning ansågs skibordet se bra ut med överlag jämna ytor och enbart ett

fåtal sprickor som uppvisade sprickvidder på någon enstaka tiondels millimeter. Vid utbörning av betongkärnor avbröts arbetet då armering påträffades i underliggande konstruktionsbetong. Ingen armering påträffades i pågjutningen.

I samband med 2018 års uppföljning konstaterades det att skibordet fortfarande såg bra ut överlag. Däremot noterades det att det förekom ett flertal tvärgående sprickor med ungefärligt inbördes avstånd om tre meter. I skibordets nedre delar påträffades sprickor med varierande orientering. Sprickvidden bedömdes i snitt vara någon tiondels millimeter.

Vidare noterades det att läckage från luckan rann tvärs över skibordet från vänster till höger kant (Figur 15). Utmed rännilen sker successiv nedbrytning av betongen i form av att grov ballast friläggs (Figur 16). Nedbrytningstakten accelereras vid de platser där rännilen korsas av en spricka eller gjutfog, vilket framgår av Figur 16.



Figur 15. Nedströmsvy över skibord A vid kraftverk 2. Längsgående gjutfog syns mitt i bilden.



Figur 16. Nedbrytning av betongytan runt en rännil som korsas av en spricka. 50 cm tumstock som referens.

Skibord B

Skibordet skulle repareras genom en konventionell pågjutning med efterföljande vakuumbehandling. Till följd av varmt väder accelererade betongens tillstyvnad, varför vakuumbehandling endast utfördes i begränsad omfattning. Vid 2000 års uppföljning påträffades sprickbildning över stora delar av skibordsytan. Sprickbildningen ansågs värre i de partier som inte hade vakuumbehandlats. Generellt bedömdes sprickvidden variera mellan 0,1 och 0,3 mm. Vidare noterades det att något enstaka parti hade lagats på grund av förmodade frostskador.

Vid 2018 års uppföljning noterades ett flertal tvärgående sprickor med ungefärligt inbördes avstånd om tre meter. Likaså påträffades sprickor utmed de längsgående gjutfogar som finns på vardera sida om den mellersta gjutfogen (Figur 17). Övriga sprickor noterades i något större omfattning vid jämförelse med skibord A. Precis som för skibord A pågår det accelererad nedbrytning av betongens yta där läckage från luckan rinner över skibordet. Vid utborrning av betongkärnor påträffades inga armeringsjärn i den cirka 200 mm tjocka pågjutningen (Figur 18).



Figur 17. Nedströmsvy över skibord B vid kraftverk 2. Tre längsgående gjutfogar finns i skibordet.



Figur 18. Betongkärna där övergång mellan pågjutning och konstruktionsbetong kan skimras vid 190 mm djup.

Skibord C

Skibordet reparerades genom konventionell pågjutning med direkt efterföljande vakuumbehandling. Reparationsarbetet beskrivs i Täljsten (1991). I samband med 2000 års uppföljning noterades en del sprickbildning med sprickvidder varierande mellan 0,2 och 0,3 mm. Vidare bedömdes betongkvaliteten vara ojämn över ytan.

Vid 2018 års uppföljning noterades framförallt tvärgående sprickor, men även en del sneda sprickor i skibordet. Inbördes avstånd mellan de tvärgående sprickorna varierade mellan höger och vänster halva av skibordet. Precis som för skibord A och B pågår det accelererad nedbrytning av betongens yta där läckage från luckan rinner över skibordet (Figur 19). På övriga ytor är nedbrytningstakten betydligt långsammare och endast fint ballastmaterial har frilagts (Figur 20). Vid uttag av betongkärnor påträffades ingen armering i den cirka 200 mm tjocka pågjutningen (Figur 21). Två av kärnorna placerades rakt över en spricka, vilken kunde följas ned till den underliggande konstruktionsbetongen (Figur 22 och Figur 23).



Figur 19. Nedströmsvy över skibord C vid kraftverk 2. Vatten blir stående på den närmast horisontella ytan.



Figur 20. Representativt utseende på betongens yta där endast fint ballastmaterial har frilagts.



Figur 21. Betongkärna där övergång mellan pågjutning och konstruktionsbetong kan skimras vid 180 mm djup.



Figur 22. Längsgående spricka i betongkärnan markeras av det mörka stråket som uppkommer till följd av att det tar längre tid för vattnet att torka ut från sprickan än från kärnans mantel.



Figur 23. Betongkärnans brottyta nedtill som visar sprickans utseende i underliggande konstruktionsbetong.

4.2.2 Resultat från provtagning

I Tabell 5 presenteras provningsresultaten från 2018 års uppföljning av skibordsreparationerna utförda vid kraftverk 2. För jämförelse skall återges även resultat från 2000 års uppföljning. Resultat av större betydelse är att den underliggande konstruktionsbetongens frostbeständighet är undermålig. Vidare kan vakuumbehandlad betong eventuellt ha något sämre frostbeständighet än ej behandlad.

Tabell 5. Provningsresultat från 2018 och 2000 års uppföljning av skibordsreparationer vid kraftverk 2. Resultat från frostprovningen som överskrider acceptabla mängder har markerats med röd färg.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C
Material:	Vakuumsugen btg K 40: vct 0,5, stenmax 32 mm, sättmått 60–70 (150) mm.		
Btg-kärnor 2000:	Såg bra ut.	Såg bra ut.	Såg bra ut.
Btg-kärnor 2018:	Såg bra ut.	Såg bra ut.	Såg bra ut.
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2000:	0,07 kg/m ²	0,05 kg/m ²	0,05 kg/m ²
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2018:	Provades ej.	0,02 kg/m ²	0,04 kg/m ²
Frostprovn. ö.yta (3 % NaCl) 2018:	Provades ej.	0,14 kg/m ²	1,54 kg/m ²
Frostprovn. rep. (sötvatten) 2018:	Provades ej.	0,02 kg/m ²	0,02 kg/m ²
Frostprovn. rep. (3 % NaCl) 2018:	Provades ej.	0,12 kg/m ²	0,09 kg/m ²
Frostprovn. K-btg (sötvatten) 2018:	Provades ej.	0,03 kg/m ²	0,03 kg/m ²
Frostprovn. K-btg (3 % NaCl) 2018:	Provades ej.	8,31 kg/m ²	2,27 kg/m ²
Tryckhållf. rep. 2000:	45 MPa	53 MPa	50 MPa
Tryckhållf. rep. 2018:	Provades ej.	57 MPa	53 MPa
Densitet rep. 2018:	Provades ej.	2 200 kg/m ³	2 320 kg/m ³
Tryckhållf. K-btg 2018:	Provades ej.	104 MPa	49 MPa
Densitet K-btg 2018:	Provades ej.	2 440 kg/m ³	2 220 kg/m ³
Draghållf. 2000:	2,1 MPa (vhz)	2,1 MPa (pågjutning)* 0,4 MPa (över spricka)	2,6 MPa**
Draghållf. 2018:	Provades ej.	1,40 MPa (vhz) 1,70 MPa (vhz)	1,65 MPa (vhz) 2,00 MPa (vhz)

* Det framgår inte i Björkenstam (2001) till vilket djup hålen borrades eller om borrararbetet utfördes till fullt djup innan vidhäftningshållfastheten bestämdes. Detta gäller framförallt med avseende på skibord B där brott har inträffat i betongkärnorna runt 50 mm djup. Samtidigt var längden på kärnorna cirka 200 mm, vilket sammanfaller med pågjutningens tjocklek.

** Det saknas information om vid vilket djup brottet inträffade.

4.3 KRAFTVERK 3

4.3.1 Observationer vid besiktning

Skibord A

Skibordet har reparerats i dess nedre del, medelst applicering av Chesterton-bruk, vid platsen där vattnet för minimitappningen släpps ut. Vid 2000 års uppföljning utfördes ingen besiktning eller provtagning på skibordet då flödessituationen i älven ej medgav avstängning av utskovsluckan.

I samband med 2018 års uppföljning noterades det att Chesterton-lagningen hade lagats i ett mindre område i dess övre del (Figur 24). En skada noterades även på Chesterton-lagningen på den nästintill horisontella skibordsförlängningen.



Figur 24. Nedströmsvy över skibord A vid kraftverk 3. Längsgående rörelsefog syns mitt i bilden. Vatten för minimitappningen släpps ut ned till höger där skibordet har reparerats med Chesterton-bruk. En skada i Chesterton-bruket har vid ett senare tillfälle lagats intill höger pelare (ljus område – se pil).

Skibord B

Skibordet reparerades år 2014 med Chesterton-bruk utmed kanterna mot pelarna där läckaget från utskovsluckan rinner ned (Figur 25). Vid uppföljningen år 2000 utfördes ingen besiktning eller provtagning på skibordet då flödessituationen i älven ej medgav avstängning av utskovsluckan.

I samband med 2018 års uppföljning konstaterades det att cirka 1 m av skibordet utmed respektive kant hade belagts med Chesterton-bruk vid reparationsarbetet. Chesterton-bruket hade dessutom dragits upp cirka 0,2 m på pelarsidorna. Det noterades vidare att frilagd grov ballast (stenmax 40 mm) fortfarande finns i ett stråk utmed Chesterton-lagningen på skibordets nedre del (Figur 26). Mindre släppor förekommer i lagningen där vatten tenderar att bli stående (Figur 27).



Figur 25. Nedströmsvy över skibord B vid kraftverk 3. Skibordet har lagats med Chesterton-bruk utmed kanterna mot pelarväggarna. Längsgående rörelsefog syns mitt i bilden.



Figur 26. Frilagd grov ballast i ett stråk intill den 1 m breda Chesterton-lagningen. 1 m tumstock som referens.



Figur 27. Mindre släppa i Chesterton-lagningen (t.v. i bilden) intill en plats där vatten troligtvis lätt blir stående. Tjockleken på den avbildade släppan uppskattas till cirka 5 mm.

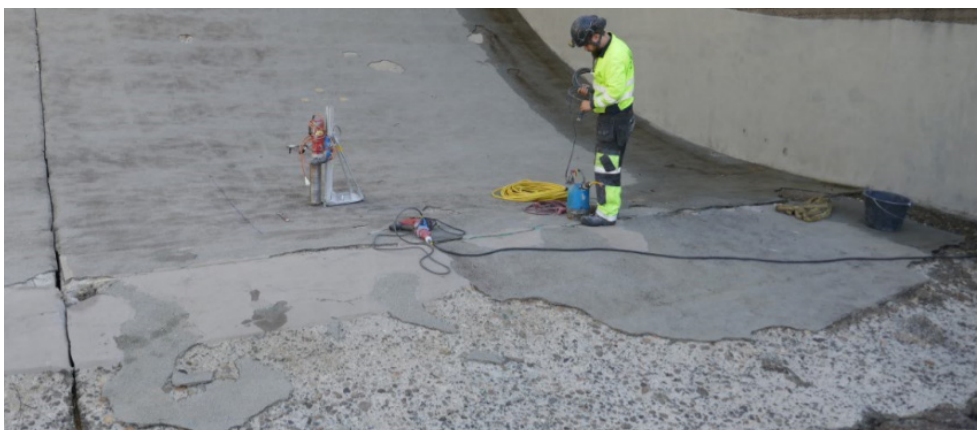
Skibord C

Skibordet har reparerats utmed hela dess längd och bredd genom applicering av Chesterton-bruk. Dessutom har cirka 2 m av pelarnas sidor nedtill också belagts med lagningsbruk. Vid uppföljningen 2000 ansågs skibordet se bra ut i sin helhet. Däremot noterades ett krackeleringsmönster över skibordsytan, men där sprickvidden bedömdes som ringa. Endast den övre delen av skibordet kunde besiktas på handnära avstånd till följd av att den nedre delen ej fick beträdas.

Vid uppföljningen år 2018 noterades det att släppor i Chesterton-bruket förekom utmed framförallt kanterna på skibordet (Figur 28). Trots att släpporna hade lagats hade nya släppor uppkommit både på nya platser och intill lagningarna. Dessutom hade stora sjok av Chesterton-bruk lossnat från skibordsförlängningen (Figur 29). Platserna där lagningsbruket har lossnat verkar huvudsakligen sammanfalla med platser där hög fuktbelastning råder till följd av rinnande eller stående vatten.



Figur 28. Nedströmsvy över skibord C vid kraftverk 3. Skibordet har lagats med Chesterton-bruk utmed hela dess längd och bredd. Uppkomna släppor i lagningen har fyllts i med nytt bruk (ljusa områden i bilden).



Figur 29. Mindre släppor i Chesterton-lagningen kan ses utmed vänster kant på skibordet. Dessutom har större sjok av Chesterton-bruk lossnat från skibordsförlängningen. Ljusare partier är lagningar som har utförts.

Begränsade lagningar har utförts för att bromsa nedbrytningen, vilket framgår av både Figur 28 och Figur 29. Nedanför skibordsförlängningen påträffades mindre bitar av Chesterton-lagningen. Vad som framkom vid undersökning av bitarna var att brottytan låg i den underliggande konstruktionsbetongen och inte i Chesterton-bruket eller vidhäftningszonen (Figur 30). Betongskiktet som satt på undersidan av Chesterton-bruket var däremot endast upp till någon millimeter tjockt.



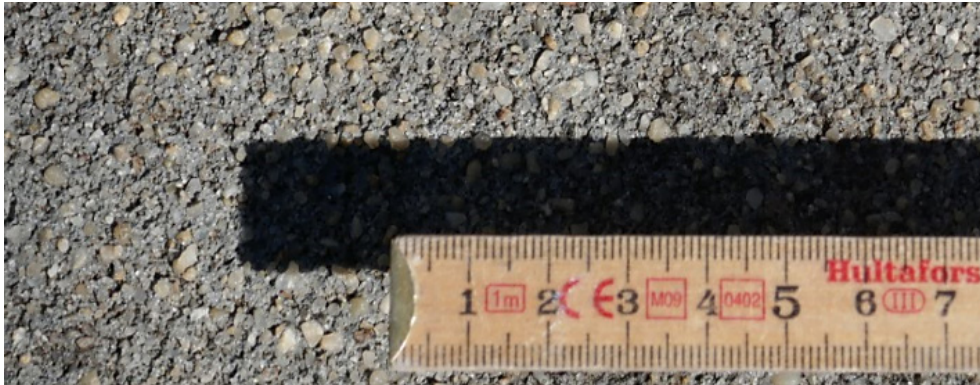
Figur 30. En 20 mm tjock släppa med det gråfärgade Chesterton-bruket överst. Under bruket återfinns ett par millimeter tjockt skikt med svagt gulfärgad betong.

Det krackeleringsmönster i Chesterton-lagningen som nämndes i den föregående uppföljningen påträffades även 2018. Det som noterades var att koncentrationen av sprickor varierar mellan olika områden på skibordet. Områden med förhållandevis många sprickor behövde inte uppvisa några bompartier (Figur 31).

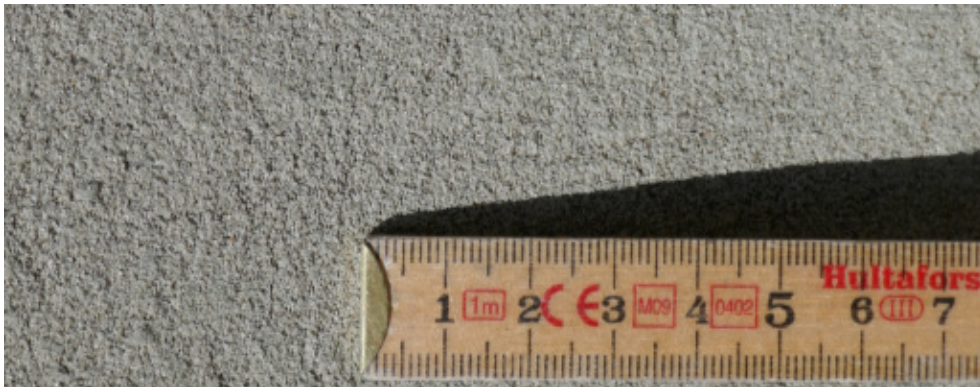
Utseendet på Chesterton-bruket på skibordet respektive pelarsidorna framgår av Figur 32 och Figur 33. Bruk av typ Chesterton ARC 790 H användes på skibordet och bruk av typ Chesterton ARC 791 V på pelarväggarna.



Figur 31. Krackeleringsmönster i Chesterton-bruket på skibord C vid kraftverk 3. Tumstock som referens.

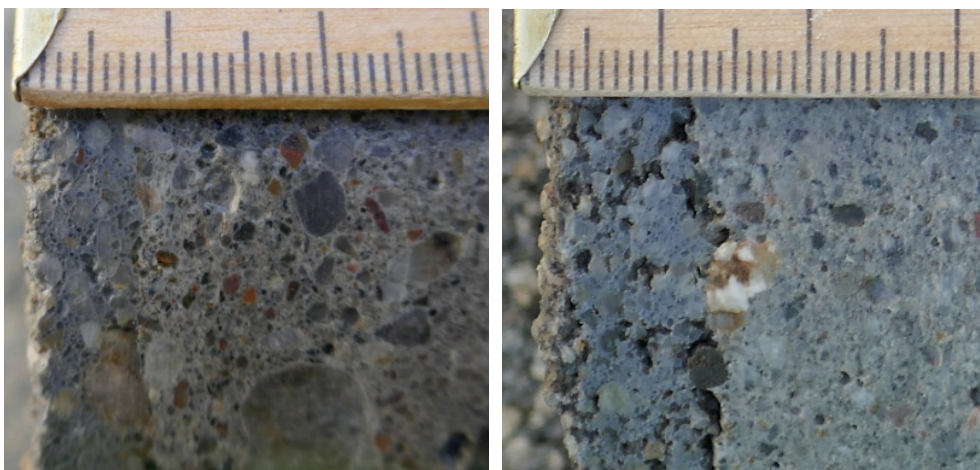


Figur 32. Närbild på ytan hos det Chesterton-bruk som användes på skibordet. Tumstock som referens.



Figur 33. Närbild på ytan hos det Chesterton-bruk som användes på pelarväggarna. Tumstock som referens.

Vid uttag av de sex betongkärnorna uppmättes tjockleken på Chesterton-bruket till mellan 6 och 15 mm. Vad som också noterades för en del av kärnorna var att det förekom en hel del porer i bruket och längs med vidhäftningszonen (Figur 34).



Figur 34. Närbilder på vidhäftningszonen i två av de uttagna betongkärnorna. Bilderna visar exempel på låg (t.v.) respektive hög (t.h.) andel synliga porer i Chesterton-bruket. Tumstock som referens.

4.3.2 Resultat från provtagning

I Tabell 6 presenteras provningsresultaten från 2018 års uppföljning av skibordsreparationerna utförda vid kraftverk 3. För jämförelse skall återges även resultat från 2000 års uppföljning. Resultat av större betydelse är att den underliggande konstruktionsbetongens frostbeständighet är mycket god i både närvaro av söt- och saltvatten. I övrigt skiljde sig inte resultaten från föregående uppföljning.

Tabell 6. Provningsresultat från 2018 och 2000 års uppföljning av skibordsreparationer vid kraftverk 3.

	Skibord A	Skibord B	Skibord C
Material:	Chesterton ARC 790 H	Chesterton ARC 791	Chesterton ARC 790 H
Btg-kärnor 2000:	Provades ej.	Provades ej.	Bruket såg poröst ut.
Btg-kärnor 2018:	Provades ej.	Provades ej.	Varierande porositet i bruket. Betongen OK.
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2000:	Provades ej.	Provades ej.	0,05 kg/m ²
Frostprovn. ö.yta (sötvatten) 2018:	Provades ej.	Provades ej.	0,03 kg/m ²
Frostprovn. ö.yta (3 % NaCl) 2018:	Provades ej.	Provades ej.	0,04 kg/m ²
Frostprovn. K-btg (sötvatten) 2018:	Provades ej.	Provades ej.	0,02 kg/m ²
Frostprovn. K-btg (3 % NaCl) 2018:	Provades ej.	Provades ej.	0,07 kg/m ²
Tryckhållf. K-btg 2018:	Provades ej.	Provades ej.	54 MPa
Densitet K-btg 2018:	Provades ej.	Provades ej.	2 290 kg/m ³
Draghållf. 2000:	Provades ej.	Provades ej.	0,6 MPa (vhz) 0,9 MPa (vhz) 2,0 MPa (vhz)
Draghållf. 2018:	Provades ej.	Provades ej.	2,05 MPa (K-btg) 0,45 MPa (vhz) 1,45 MPa (vhz)

5 Diskussion och slutsatser

I föreliggande studie har reparationer på skibord, utförda under 1990-talet, undersökts med avseende på reparationernas beständighet. De reparationsmaterial som har undersökts är sprutbetong, konventionell pågjutning med vakuumbehandling och olika typer av polymermodifierade lagningsbruk. 2018 års uppföljning har utförts medelst besiktning och betongprovtagning med efterföljande analyser. Resultaten har jämförts med motsvarande resultat från uppföljningen år 2000.

Samtliga skibord i utskovsdammarna vid kraftverk 1 och kraftverk 2 genomgick omfattande reparationsarbeten under 1990-talet. Vid kraftverk 3 utfördes också reparationer, fast i mindre omfattning. Vid bestämningen av den ursprungliga konstruktionsbetongens frostbeständighet uppvisade alla prover *Mycket god* eller *God* frostbeständighet i kontakt med sötvatten. I närvaro av saltlösningen innehållande 3 % NaCl uppvisade däremot endast betong från kraftverk 3 *Mycket god* frostbeständighet. Resultaten för kraftverk 1 och 2 var *Inte acceptabel*.

Resultaten från frostprovnings tyder på att endast konstruktionsbetong vid kraftverk 3 har ett luftporsystem med en tillräckligt hög andel mycket små luftbubblor. Dessa luftbubblor fungerar som expansionskärl vid vattnets fasomvandling och skyddar därmed betongen från sönderfrysning. Även om det i vattenkraftsmiljö vanligtvis inte ställs krav på god frostbeständighet i kontakt med saltlösning kan de erhållna resultaten till viss del förklara varför det krävdes mer omfattande reparationer av skiborden vid kraftverk 1 och 2 jämfört med kraftverk 3.

Undersökningen av skiborden tillhörande kraftverk 2, vilka hade reparerats med konventionell pågjutning och vakuumbehandling, visade att reparationernas tillstånd överlag är bra efter cirka 25 år. Fullständig vakuumbehandling utfördes för skibord C medan den utfördes i mindre omfattning för skibord B. Det provningsresultat som avviker från förväntningarna är att överytans frostbeständighet vid kontakt med saltlösning var *Inte acceptabel* för skibord C. Motsvarande resultat för skibord B var *God*. Om skillnaden är av generell karaktär mellan skiborden kan ej avgöras baserat på den begränsade provning som utfördes. Vakuumbehandling ska dock normalt leda till att betongens vattencementtal reduceras, att betongens krympning minskar, att betongens nötningsmotstånd ökar och att betongens frostbeständighet förbättras. Frostbeständigheten i närvaro av sötvatten var däremot *Mycket god* för betongen från skibord B och C.

Draghållfastheten mellan pågjutning och underliggande konstruktionsbetong kan anses vara godkänd för både skibord B och C. Den sprickbildning som noterades i överytan kan eventuellt härledas till den underliggande konstruktionsbetongen. Betongens sammandragning till följd av utkorkningskrympning kan också ha koncentrerats till enstaka sprickor på grund av avsaknaden av sprickfördelande armering i pågjutningen. Sprickorna verkar däremot inte ha orsakat accelererad nedbrytning av reparationsbetongen. Den märkbara skillnad som identifierades gällande skibordens tillstånd mellan uppföljningarna år 2000 respektive 2018 är nedbrytningen av betongens överyta som pågår utmed rännilarna av läckande vatten från utskovsluckornas tätningar. Sammanfattningsvis har föreliggande undersökning visat att reparationerna har god beständighet vid kraftverk 2.

Undersökningen av skibord B vid kraftverk 1, vilket reparerades med sprutbetong innehållande glasfibrer, visade att reparationens tillstånd är av varierande karaktär efter drygt 25 år. Det är framförallt sprutbetongens frostbeständighet i närvaro av sötvatten som är undermålig. Sprutbetongens frostbeständighet var både vid uppföljningen 2000 och 2018 *Inte acceptabel*. Trots resultaten ser sprutbetonglagningen förhållandevis intakt ut även om mosspåväxt och sprickbildning med kalkning förekommer. Vid bestämning av sprutbetongens vidhäftningshållfasthet mot den underliggande konstruktionsbetongen uppmättes god vidhäftning för två av tre prover. Inget läckage från utskovsluckans tätningar kunde noteras, varför fuktbelastningen på skibordet är gynnsam för reparationens beständighet.

Undersökningen av skibord A vid kraftverk 1, vilket har reparerats med Densit-bruk, visade att lagningens tillstånd försämrats sedan uppföljningen 2000. Det är framförallt lagningsbrukets vidhäftningshållfasthet mot konstruktionsbetongen som har reducerats till låga nivåer. Dessutom förekom det bom i små områden. Vidare lossnade Densit-bruk från konstruktionsbetongen vid uttag av ett flertal betongkärnor. Vad som också noterades vid platsbesöket 2018 var att skibordet delvis överströmmas av läckande vatten från luckornas tätningar. Om läckaget tränger ned till underliggande konstruktionsbetong kan det leda till frostsador utmed vidhäftningszonen, vilket bör reducera reparationens beständighet. Ett sådant händelseförlopp skulle kunna förklara den försämring som noterats.

Undersökningen av skibord C vid kraftverk 3, vilket reparerades med Chesterton-bruk, visade att lagningens tillstånd hade försämrats något sedan den föregående undersökningen 2000. Det är framförallt släppor i lagningen utmed kanterna mot pelarsidorna som har uppkommit. Lägena för släpporna sammanfaller ofta med rännilarna av läckande vatten från utskovsluckans tätningar. Ett fåtal släppor har även uppkommit på platser långt från rännilarna. Undersökning av små bitar av Chesterton-bruk visade att brottytan huvudsakligen låg i konstruktionsbetongen. Denna iakttagelse indikerar att Chesterton-reparationens beständighet kan vara beroende på tillståndet i det betongskikt som lagningsbruket appliceras på.

En reflektion baserad på föreliggande studie är att tunna reparationsskikt av typ Chesterton och Densit kan vara känsligare för nedbrytning jämfört med tjockare reparationsskikt av konventionell betong eller sprutbetong. Huruvida detta är generellt för tunna respektive tjocka reparationsskikt går inte att bedöma utifrån det ringa antalet undersökta skibord och reparationsmetoder. En möjlighet är att små defekter i ett tunt reparationsskikt lättare leder till skador än motsvarande defekter i ett tjockt reparationsskikt. För att kunna bedöma denna risk krävs det ytterligare undersökningar av genomförda skibordsreparationer.

En aspekt som inte har hanterats i denna studie, men som bedöms ha stor inverkan på en reparations beständighet, är arbetsutförandet. Att anlita entreprenörer med god erfarenhet av reparationsarbeten bör minska risken för misslyckade åtgärder. Det är även viktigt att avverka all skadad och försvagad betong innan reparationsmaterialet påförs. Anledningen är att frilägga en yta med frisk betong, vilket bör minska risken för att reparationsskiktet spjälkas loss till följd av fortsatt nedbrytning i betongen direkt under reparationsskiktet.

Förhoppningar om en förväntad livslängd motsvarande minst 25–30 år är vanligt förekommande vid betongreparationer inom vattenkraften. De reparationer som har ingått i denna studie är samtliga nära att uppnå detta riktvärde. Vad som har tydliggjorts i denna uppföljning är att även reparationer drabbas av skador och nedbrytning över tid. Takten på nedbrytningsprocessen skiljer sig dock åt mellan olika reparationsmetoder. Faktorer som påverkar nedbrytningens hastighet kan vara allt från det praktiska utförandet i samband med reparationerna till den rådande exponeringsmiljön vid den aktuella konstruktionen.

En slutsats som kan dras utifrån de genomförda undersökningarna är att läckande vatten från utskovsluckornas tätningar är lika skadligt för reparationsmaterialen som det var för den ursprungliga konstruktionsbetongen. I övrigt är det svårt att dra några generella slutsatser baserat på de utförda undersökningarna då antalet reparerade skibord som ingått i studien varit förhållandevis få.

6 Referenser

- [1] Björkenstam E (1999) *Inventering av betongreparationer utförda på svenska vattenkraftsanläggningar*, Elforsk rapport 99:28
- [2] Björkenstam E (2001) *Studie och uppföljning av reparationer utförda på utskov/skibord*, Elforsk rapport 01:29, Elforsk
- [3] Nordström E (1996) *Sprutbetongs beständighet – Inventering*, SveBeFo Rapport 26 / Elforsk rapport 96:18, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning / Elforsk
- [4] Rosenqvist M (2016) *Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures*, TVBM-1036, Lunds Universitet
- [5] Rosenqvist M (2018) *Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*, Energiforsk rapport 2018:481, Energiforsk
- [6] Rådman J (2000) *Sammanställning av materialdata för lagningsbruk*, Elforsk rapport 00:02, Elforsk
- [7] Täljsten B (1991) *Reparation av skibord vid Ligga kraftstation*, Rapport nr VU-S 91:34, Vattenfall Utveckling

UPPFÖLJNING AV REPARATIONER PÅ SKIBORD AV BETONG

Här visar resultaten att också reparationer av betongen drabbas av skador och nedbrytning över tid. Faktorer som påverkar nedbrytningens hastighet kan vara allt från hur reparationen har utförts till vilken miljö den aktuella konstruktionen har exponerats för.

Här har reparationer som utfördes under 1990-talet på skibord vid tre kraftverk undersökts. Det är vanligt att större betongreparationer förväntas ha en livslängd på minst 25–30 år, vilket de undersökta reparationerna är nära att nå. Skiborden reparerades ursprungligen på grund av frostnedbrytning av betongen.

Uppföljningen omfattar okulär besiktning, bomknackning och utborrning av betongkärnor för att bestämma reparationsmaterialens och den underliggande konstruktionsbetongens egenskaper som frostbeständighet, densitet, tryckhållfasthet och reparationsmaterialets vidhäftningshållfasthet.

En slutsats från studien är att läckande vatten från utskovsluckornas tätningar är lika skadligt för reparationen som det var för den ursprungliga konstruktionsbetongen.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se