

Lagningsbruk – önskade bruksegenskaper och provningsprogram



Elforsk rapport 02:31

.....

Lagningsbruk – önskade bruksegenskaper och provningsprogram



Elforsk rapport 02:31

Emma Björkenstam och Johanna Rådman

Sammanfattning

Idag föreligger problem i beställarleden att välja rätt lagningsbruk för den reparationsåtgärd som man står inför. Tilltron får i många fall ställas helt till representanter från materialtillverkare och försäljare samt tidigare erfarenheter. Aktuellt projekt har genomförts för att minska detta beskrivna problem och där finansiären är vattenkraften själv.

Projektets syfte var att ge beställare verktyg att bedöma lagningsbrukens kommande funktion och beständighet samt därmed kunna ställa krav på utförd provning och välja relevant produkt efter behov.

Projektets mål var att definiera önskade egenskaper hos lagningsbruk, ta fram lämpligt provningsprogram för lagningsbruk, verifiera detta provningsprogram med olika typer av lagningsbruk samt specificera fortsatt arbete inom området.

Projektarbetet har bestått i att studera litteratur som rör lagningsbruk samt relevanta provningsmetoder. Dessa studier har sedan resulterat i ett provningsprogram som även testats i laboratoriet på olika typer av lagningsbruk.

För att uppfylla ovan beskrivna syften och mål har önskvärda egenskaper och därefter krav hos lagningsbruk definierats.

Det övergripande kravet för ett reparationsmaterial är att det ska vara tillräckligt beständigt i den aktuella miljön, vilket i förlängningen betyder att eftersträvad livslängd uppnås. Kravet är också att materialet ska skydda underliggande betong och armering. Ytterligare ett viktigt krav som kan ställas är att materialet skall vara lätt att applicera. För att kunna uppfylla dessa övergripande krav behöver detaljkrav definieras vilket gjorts.

Exempel på detaljerade krav är mått på:

- ☐ Arbetbarhet
- ☐ Tryckhållfasthet
- ☐ Draghållfasthet / vidhäftning mellan gammalt och nytt material
- ☐ Frostbeständighet
- ☐ Vattentäthet
- ☐ Nötningsbeständighet.

Nötningsbeständighet har studerats närmare i en litteraturstudie med fokus på olika typer av nötning och tillhörande provningsmetoder. Studien konstaterar att en lämplig provningsmetod för svenska förhållanden inom vattenkraften inte existerar i dagsläget.

Vid genomförande av provningsprogrammet gjöts en referensprovkropp som aktuella lagningsbruk ska appliceras på. För att efterlikna en skada på en befintlig vattenkraftanläggning gjöts sex stycken 1m x 1m x 0.35 m stora block. Betongen var av

trög konsistens (T) med sättmått på 60 mm, utbredning 400 mm, lufthalt 3,8% samt en hållfasthet på ca. 40 MPa. Betongen hade även ett stenmax på 32 mm och var vattentät. Överytan på dessa referensblock sprayades med en ytretarder strax efter gjutning för att ett dygn senare kunna avlägsna ballast och cementpasta från överytan med en högtryckstvätt. All hantering av provkroppar och gjutning skedde utomhus (gjutning skedde under maj t.o.m. september).

Applicering av lagningsbruken skedde tre månader efter gjuttillfället.

Följande typer av material ingick i studien:

1. **Epoxibaserat (E)**¹ – Tvåkomponent bestående av polymertätning och därefter applicering av en kvartsförstärkt komposit. Bruket är avsett att skydda underliggande betong mot fysiska angrepp.
2. **Reparationsbetong med stålfiber (RbF)** - Innehåller anläggningscement, stålfibrer samt porfyriskt stenmaterial. Betongen är avsedd för ytor där hög hållfasthet och slitstyrka och sprickfrihet krävs.
3. **Material med syntetiskt ballast (SyB)** – Består av aluminatcement och ett syntetiskt ballastmaterial med hög hållfasthet. Avsedd för ytor som utsätts för nötning och kavitation, slag, frost etc.
4. **Specialcementbaserat material (SpC)** – Energimodifierat cement
5. **Cementbaserade material (CB)** – Reparationsbruk för mindre lagningar.
6. **Material med glasfibrer (Gf)** – Cementbaserat fiber- och polymerförstärkt lagningsbruk. Används till ytor där krav på hållfasthet, saltfrostbeständighet och slitstyrka finns.

Vid en granskning av framtaget provningsprogram innehåller det i stort sett de provningar som önskas. Dock bör man lägga till en vertikal reparation som också utvärderas. Dessutom är det av vikt att finna en lämplig metod för att prova nötningsbeständighet samt frostbeständigheten i skiktet mellan gammal betong och lagat material och lämplig vattentäthetskontroll.

Vid en analys av provade lagningsbruk anses samtliga material i studien lämpliga för applicering på horisontella ytor utgående från de erfarenheter av arbetbarheten och appliceringen av materialen som erhållits. Dock är det utifrån denna studie svårt att ge någon heltäckande bedömning eller rekommendation om vilka material som får anses mest lämpliga för reparation av vattenkraftanläggningar. Allt beror på aktuell konstruktionsdel, skadeorsak och valet av åtgärd.

¹ Beteckningarna används för att inte produktnamn och leverantör ska kunna spåras i studien.

Ytterligare studier krävs inom följande områden:

- ❑ Lämplig provningsmetod för nötningsbeständighet vilken är anpassad för svenska vattenkrafts förhållanden.
- ❑ Specificera konkreta krav till materialtillverkare vad gäller erforderliga provningsmetoder, önskade egenskaper samt kravnivåer.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND.....	2
2.1	SYFTE.....	2
2.2	MÅL	2
2.3	BEGRÄNSNINGAR	2
2.4	GENOMFÖRANDE	3
3	PROVNINGSPROGRAM	4
3.1	EGENSKAPER KOPPLADE TILL KONSTRUKTIONSDELAR	5
3.2	BESKRIVNING AV EGENSKAPER OCH TILLHÖRANDE PROVNINGSMETODER.....	7
3.3	PROVNINGSPROGRAM	8
4	LITTERATURSTUDIE – NÖTNINGSBESTÄNDIGHET OCH TILLGÄNGLIGA PROVNINGSMETODER	11
4.1	NÖTNINGSBESTÄNDIGHET	11
4.2	MATERIAL.....	12
4.3	PROVNINGSMETODER.....	12
4.4	REPARATIONSMATERIAL OCH UNDERLIGGANDE MATERIAL	13
4.5	ALTERNATIVA REPARATIONSMETODER MOT KAVITATION.....	13
4.6	NÖTNINGSBESTÄNDIGHET HOS LAGNINGSMATERIAL UTSATTA FÖR KAVITATION	14
5	UTVÄRDERING AV PROVNINGSPROGRAM.....	15
5.1	LAGNINGSBRUK/PROVNINGSMATERIAL	15
5.2	GENOMFÖRANDE	16
5.3	RESULTAT.....	17
5.4	KOMMENTARER TILL RESULTATEN	17
6	ANALYS OCH DISKUSSION.....	21
6.1	VERKTYGEN – PROVNINGSPROGRAM	21
6.2	LAGNINGSBRUKEN.....	21
7	RESULTAT	23
7.1	KOMMENTARERNA KRING GENOMFÖRDA FÖRSÖK	23
7.2	FORTSATTA FORSKNINGSBEHOV.....	23
8	REFERENSER	25
	PROVNINGSMETODER.....	1
	REKOMMENDATIONER	4

1 Inledning

Idag föreligger ett problem i beställarleden att välja rätt lagningsbruk för den reparationsåtgärd som man står inför. Tilltron får i många fall ställas helt till representanter från materialtillverkare och försäljare. På uppdrag av Elforsk har Vattenfall Utveckling AB, inom verksamhetsområdet "Effektiva energilösningar", genomfört en inledande studie av problematiken kring val och utvärdering av lagningsbruk.

Projektarbetet har bestått i att studera litteratur som rör lagningsbruk och de provningsmetoder som finns tillgängliga. Dessa studier har sedan resulterat i ett provningsprogram som även utvärderats i laboratoriet på olika typer av lagningsbruk.

Rapporten börjar med att redogöra för bakgrunden till projektet. Detta följs sedan av en studie av provningsmetoder och önskade bruksegenskaper tillsammans med framtaget provningsprogram. Därefter följer en litteraturstudie kring egenskapen nötningsbeständighet och tillhörande provningsmetoder. Sist verifieras provningsprogrammet via provningar i laboratoriet. Rapporten avslutas med en presentation av resultaten samt en analys och diskussion. Sist finns förslag på fortsatt arbete inom området.

2 Bakgrund

Projektet grundar sig på detta faktum att fler betongreparationer utförs. Allteftersom befintliga betongkonstruktioner blir allt äldre ökar behovet av underhåll. I många fall rör det sig om mindre ytreparationer med någon typ av lagningsbruk. Antalet och typerna av lagningsbruk är stor på marknaden och det är inte lätt för beställare / ägarrepresentant att välja rätt.

Tidigare projekt inom ramprogrammet "Betongreparationer" har bestått i att inventera lagningsprodukter och provningsmetoder [1]. Dessutom har olika inventeringar utförts där olika reparationer följts upp i fält [2]. En fortsättning på dessa projekt blir nu att ta fram provningsprogram och prova olika egenskaper hos lagningsbruk genom laborieförsök. (Egenskaperna som ingår i försöken är relevanta för användning av lagningsbruk vid reparationer på våra vattenkraftanläggningar.)

2.1 Syfte

Projektets syfte är att ge beställare verktyg att:

- ☐ Bedöma lagningsbrukens kommande funktion och beständighet samt därmed kunna ställa krav på utförd provning
- ☐ Välja relevant produkt efter behov.

2.2 Mål

Projektets mål är att:

- ☐ Definiera önskade egenskaper hos lagningsbruk
- ☐ Ta fram lämpligt provningsprogram för lagningsbruk
- ☐ Verifiera detta provningsprogram med lagningsbruk
- ☐ Specificera fortsatt arbete inom området.

2.3 Begränsningar

Endast ett lagningsbruk per materialtyp har provats i laboriet. Antalet typprodukter som valts är sex stycken. Anledningen till detta är att floran av lagningsbruk som finns på marknaden är stort och en begränsning måste därför ske.

Nötningsbeständigheten är en viktig parameter för lagningsbruk, som används vid reparation av vattenvägarna vid en vattenkraftanläggning. Detta arbete kräver dock ytterligare resurser och försök varvid det lämnas till ett senare projekt. För i detta sammanhang måste nötningsbelastningen i svenska älvar definieras. Nötning genom kavitation eller nötning av sediment, is eller rent vatten är de typer som förekommer internationellt. Vilken nötningsmekanism som i Sverige är mest vanligt förekommande torde vara kavitationsnötning.

2.4 Genomförande

Projektet har genomförts i följande steg, vilket även är ordningen för redovisningen i denna rapport:

- ❑ Val av lämpliga provningsmetoder för studie av relevanta egenskaper för vattenkraftförhållanden
- ❑ Litteraturstudie av nötningsbeständighet
- ❑ Genomförande av laboratorieförsök enligt de provningsmetoder som är relevanta för vattenkraftförhållanden
- ❑ Utvärdering av resultat samt slutsatser
- ❑ Analys samt diskussion och behovet av fortsatt arbete inom området.

3 Provningsprogram

Syftet med detta provningsprogram är att på ett bra sätt kunna utvärdera de lagningsbruk som finns på marknaden. Genom litteratursökning och diskussion med bransch-kunniga har provningsmetoder valts.

Det övergripande kravet för ett reparationsmaterial är att det ska vara tillräckligt beständigt i den aktuella miljön, vilket i förlängningen betyder att eftersträvad livslängd uppnås. Kravet är också att materialet ska skydda underliggande betong och armering. Ytterligare ett viktigt krav som kan ställas är att materialet skall vara lätt att applicera. För att kunna uppfylla dessa övergripande krav behöver detaljkrav definieras vilket görs i följande kapitel. Exempel på detaljerade krav är tryckhållfasthet (E-modul), krympning, frostbetändighet, temperaturrelater, vidhäftning, draghållfasthet samt täthet.

Så här i inledningen bör det nämnas att det finns en rad faktorer som ska beaktas och som påverkar utfallet vid en reparation. (Lagningsbruk är bara en länk i kedjan.) Först ska, oberoende av vilken lagningsmetod som väljs, följande studeras och definieras:

- ❑ Skadeorsak
- ❑ Skadans omfattning
- ❑ Om möjligt, avlägsna källan till skadans uppkomst (konstruktionsförändring)
- ❑ Last- och miljöpåverkan som lagningsmaterialet kommer att utsättas för skall definieras kunskap om betongkvalitet hos underliggande material

När detta är gjort finns det ytterligare faktorer som inverkar på reparationsresultatet. Exempel på dessa faktorer är förarbete, utförande samt då naturligtvis vald reparationsmetod och material. (Det sistnämnda behandlas mer ingående i rapporten.)

Förarbetets inverkan på slutresultatet har visat sig vara av mycket stor betydelse. I förarbetet ingår ofta bortbilning av skadat material (vattenbilning, krysshammare, blästring), förvattning och formbyggnad. Vad som ingår i förberedelsearbetet varierar från skada till skada men beror generellt på skadans åtkomlighet, skadeorsak och skadeomfattning (och) dessutom spelar vald reparationsmetod in.

Applicerbarhet, eller oftare kallad arbetbarhet, har även den stor inverkan på reparationens slutresultat och därmed beständighet. Egenskaper som kan innefattas här är öppethållandetid (bindetid), konsistens och flytbarhet, dvs. fräska egenskaper hos materialet. Den applicerade ytans utformning, vertikal alternativt horisontell yta och dess åtkomlighet har även betydelse för arbetbarheten och därmed hur lätt materialet kan appliceras.

De parametrar som kan visa en indikation på den hårdnade reparationens resultat är vidhäftningshållfasthet mellan lagningsmaterial och underliggande material, draghållfasthet samt tryckhållfasthet hos lagningsmaterialet.

Parametrar som indikerar om slutresultatets beständighet är dess krympning (sprickbildning, förlust av vidhäftning), ånggenomsläpplighet, frostbeständighet och nötningsbeständighet. Nötningsbeständighets parametern beskrivs ytterligare i kapitel 4. Beständigheten hos lagningsmaterialet påverkas också av dess kompatibilitet med armering, fogband samt dess motståndsförmåga mot karbonatisering och kloridinträngning.

3.1 Egenskaper kopplade till konstruktionsdelar

I detta kapitel förs en diskussion om möjligheterna att koppla krav på egenskaper hos lagningsmaterial till vissa konstruktionsdelar på en vattenkraftanläggning. Syftet är att detta ska komma till nytta vid beställning av reparationsarbeten och vid val av reparationsmaterial (lagningsbruk). Tabellen ska ses som ett första förslag.

Sammanställningen har tagits fram genom litteraturstudier samt genom diskussion inom forskargruppen. Gradering är låg (L), medel (M) och hög (H) prioritet. Dessa utlåtanden kan därefter kopplas till olika kravnivåer på resultatet av provning. T.ex. ska du reparera en mindre skada på en pelare på din damm ser du på ”vertikala sidor utomhus”. Detta ger hög prioritet på egenskaper som rör applicerbarhet, vidhäftning, frostbeständig samt krympning. Mer information om egenskaper och provningsmetoder finns i kapitel 3.2. Dock ska det påpekas att det alltid är av största vikt att se till att underliggande material och det använda lagningsbruket passar väl ihop, tabell 3.1 är alltså ett förslag inte något absolut.

Tabell 3.1. Gradering av prioritet av egenskaper kontra konstruktionsdel.

Konstruktionsdel:	Färska egenskaper	Beständighet	
	Applicering – arbetbarhet	Ångdiff.	Vattentät
Utomhus			
Vertikala ytor	H	M	M
Horisontella ytor	M	M	M
Inomhus			
Vertikala ytor	H	M	M
Horisontella ytor	M	M	M
Vattenvägar			
Intag	H	H	H
Utskov/Skibord	M	H	H
Övrigt			
Dammkrön/brobana	M	H	H
Fogar	M	H	H
Anfang – betong mot berg	M	M	M
Grundläggning inkl. tätskärm	H	M	M
Gränsyta/kontaktzon grundläggning/betongkonstr.	H	M	M

Forts. tabell 3.1.

Konstruktionsdel:	Beständighet forts.				
	Nötning.	Vidhäftning.	Frostbest.	Hållfasth.	Krympning
Utomhus					
Vertikala ytor	M	H	H	M	H
Horisontella ytor	M	H	H	M	H
Inomhus					
Vertikala ytor	M	H	L	M	M
Horisontella ytor	L	H	L	M	M
Vattenvägar					
Intag	H	H	M	H	H
Utskov/Skibord	H	H	H	H	H
Övrigt					
Dammkrön/brobana	M/H	H	H	M	H
Fogar	M	H	H	M	H
Anfang - betong mot berg	M	H	H	M	H
Grundläggning inkl. tätskärm	L	H	L	M	H
Gränsyta/kontaktzon grundläggning/betongkonstr.	L	H	L	M	H

3.2 Beskrivning av egenskaper och tillhörande provningsmetoder

3.2.1 Färska egenskaper

Arbetbarhet

De egenskaper som vill uppnås i det färska tillståndet hos materialet bör definieras för att erhålla ett fullgott slutresultat för lagningsreparationen. Genom användande av ett material med god arbetbarhet och lätt att applicera, är det lättare att uppnå en beständig reparation. Gott arbetsutförande är en oerhört viktig faktor för en lyckad reparation. Aktuella provningsmetoder för detta är *sättnått* SS 13 71 21 samt *utbrednings* mått SS 13 71 23 (för grövre bruk och betonger) samt VU SC:2 (för finare bruk). Denna provning äger rum direkt efter avslutad blandning. Dessutom görs en objektiv bedömning vilken redovisas i löpande text.

Tillstyvnadstid – Öppethållande

Tillstyvnadstid är en egenskap som inverkar på materialets arbetbarhet d.v.s. det anger hur länge bruket har en konsistens som möjliggör applicering. Aktuell provningsmetod för detta är SS 12 71 26. Denna provning äger rum direkt efter avslutad blandning.

3.2.2 Hårdnade egenskaper

Hållfasthet

Kravet på tillräcklig *tryckhållfasthet* hos reparationsmaterialet hänger samman med att denna ska kunna samverka med den underliggande betongen på ett tillfredställande sätt. Detta betyder att det ofta krävs att reparationsmaterialet har minst samma tryckhållfasthet som den underliggande betongen. Aktuell provningsmetod för att kontrollera tryckhållfastheten är SS 13 72 10 respektive SS-EN 196-1. För detta ändamål gjuts kuber 100 x 100 x 100 mm alternativt prismor 160 x 40 x 40 mm där provning sker efter 7 respektive 28 dygn. (Valet av utformning på provkropparna baseras på lagningsbrukets karaktär, d.v.s. storlek på ballast.)

Även krav på hög *beständighet* föreligger, vilket medför hos cementbundna material lågt vct och därmed hög hållfasthet. En hög *hållfasthet* betyder dock en hög *E-modul* som kan orsaka stora egenspanningar i betongen. E-modulen hos materialet får därför inte vara högre än nödvändigt. Vid material som är sammansatt av flera materialskikt bör E-modulen vara avtagande inifrån och ut. Polymerinblandning kan vara ett effektivt sätt att sänka E-modulen hos cementbruk.

Krympning

Som bekant *krymper* de flesta cementbaserade och vissa plastbaserade reparationsmaterial i anslutning till eller efter hårdnandet. Krympningen ökar risken för sprickbildning i reparationer. Sprickbildningen vid avsvälning kan begränsas genom att minska cementhalten, använda cement med låg värmeutveckling, låg utgångstemperatur på betongmassan, kyla betongen under hårdnandet, sänka temperaturen långsamt. Idag finns också bruk som kompenserar krympning genom att svälla initiiellt.

Vid applicering av tjocka skikt med rena polymerbruk bör beaktande ske vad gäller stora skillnader i *termiska längdändringar* mellan underlaget och reparationsmaterialet,

vilket kan orsaka spänningar. Aktuell provningsmetod för krympning är SS 13 72 15/SS-EN 480-3. För detta ändamål gjuts prismor med dubbar. Dessa prismor mäts sedan med jämna mellanrum där krympningen noteras.

Frostbeständighet

Krav på *frostbeständighet* bör ställas på reparationsmaterial som utsätts för frysning i fuktig miljö liksom är fallet för betong i samma typ av miljö. Aktuell provningsmetod för frostbeständighet är SS 13 72 44. I detta fall har provning skett med både söt- och saltvatten. Kärnor för frostprovning borras ut ur provkroppen vid 21 dygns ålder och därefter genomförs provning på sedvanligt maner. (Frostprovning i gränsskiktet studeras ej.)

Vidhäftning

Krav på god *vidhäftning* mellan reparationsmaterialet och underlaget är viktigt för att erhålla en beständig reparation. Hur god vidhäftningen blir beror till större delen på utförandet än materialet. Reparationer som är korrekt utförda med rena cementbruk eller betong erhåller utmärkt vidhäftning. Om ytterligare förbättring av vidhäftningsförmågan önskas kan polymerinblandning förbättra denna egenskap. Aktuell provningsmetod för mätning av vidhäftning är SS 13 72 43 (Dragprovning SS 13 72 31 kan utnyttjas då pågjutning anses för tunn). För ändamålet provdras kärnor ur provkroppen vid 28 dygns ålder.

Krav på ren *draghållfasthet* på cementbruk och betong behöver sällan ställas enligt [4] dock används metoden då påläggstjocklekarna för lagningsbruk ofta är väldigt tunna vilket innebär problem med att använda vidhäftningsutrustningen.

Vattentäthet

Täthet hos cementbruk och betong beror i första hand på vct. Krav på täthet för utomhuskonstruktioner och vattentäta konstruktioner kan behöva ställas. För reparationsmaterial som används vid sådana konstruktioner krävs relativt låga vct under ca. 0.5. Det som även påverkar tätheten är utförande, där bearbetning (vibrering) och fukthärdning är viktiga faktorer. [3] Aktuell provning för kontroll av vattentätheten är SS 13 72 13 / SS-EN 12390-8. Detta innebär att provkroppar gjuts och efter 28 dygn spräcks de och placeras i mätrigg. I riggen utsätts provkroppen för ett vattentryck och efter 24 timmar kontrolleras inträngningsdjupet.

Nötningsbeständighet

Nötningsbeständighet är en mycket viktig egenskap och det är viktigt att kunna kontrollera denna på det lagningsbruk som planeras att användas. Aktuell provningsmetod för icke mekanisk nötning finns inte idag. Detta påstående grundar sig på den litteraturstudie och de kontakter som tagits i och med projektet vilken presenteras i kapitel 4.

3.3 Provningsprogram

För att efterlikna en skada på en befintlig vattenkraftanläggning gjuts större block från vilken erforderligt antal provkroppar kan erhållas.

För övrigt ska betongen vara av trög konsistens (T) med sättmått på 80 mm, utbredning 400 mm, vara frostbeständig samt ha en hållfasthet på ca. 40 MPa och betongen ska vara vattentät. Detta motsvarar en typisk anläggningsbetong för en vattenkraft anläggning [4]. Överytan på dessa referensblock sprayas förslagsvis med en ytretarder strax efter gjutning för att ett dygn senare kunna avlägsna ballast och cementpasta från överytan med en högtryckstvätt. Syftet är att genom att avlägsna material från överytan simulerar en betongskada på en vattenkraftanläggning då frilagd ballast erhålls. (En begränsning i detta förfarande är att sprickor samt andra skadetyper ej inkluderas.)

All hantering av provkroppar och gjutning ska dokumenteras inklusive placering och temperaturförhållanden.

I tabell 3.2. listas de egenskaper som provas och tillhörande metoder. Ett försök har även gjorts att ange "önskvärda" resultat.

Tabell 3.2. Sammanställning av önskade egenskaper samt tillhörande provningsmetod.

Egenskap		Önskvärda resultat (Låg prioritet – hög prioritet) ²	Provningsmetod
Färska egenskaper	Arbetbarhet	God arbetbarhet under öppethållandetiden (fram till tillstyvnad). Med god avses att bruket kan användas som det är tänkt och att applicering ej försvåras.	SS 13 71 23, VUSC:2 & SS 13 71 21
	Vattenseparation	0 %	SS 13 75 31
	Tillstyvnadstid	>1 timme	SS 12 71 26
Hårdnade egenskaper	Vidhäftningsförmåga	>1,5 MPa alt. brott i underlagsbetongen.	SS 13 72 43
	Draghållfasthet	>1,5 MPa alt. brott i underlagsbetongen.	SS 13 72 31
	Tryckhållfasthet	Högre eller lika med underlagsbetongen. (K40)	SS 13 72 30 / SS-EN 196-1
	Vattentäthet	<10 mm dock helst ingen inträngning i provkroppen. Dock kan tilläggas att om vatten tränger igenom underifrån, genom gamla betongen, måste lagningsbruket vara diffusionsöppet, d.v.s. ingen vattentäthet.	SS 13 72 13 / SS-EN 12390-3
	Frostbeständighet, ytavskalning	God eller bättre ³ .	SS 13 72 44
	Krympning	Ingen eller mycket lite, <1,0 ‰.	SS 13 72 15 / SS-EN 480-3
	Nötningsbeständighet	God.	-

² Se skala i tabell 3.1. låg, medel och högprioritet.³ Mycket god frostbeständighet innebär avskalning <0,05 kg/m³, god frostbeständighet innebär avskalning <0,1 kg/m³ samt m₅₆/m₂₈<2 [5].

4 Litteraturstudie – nötningsbeständighet och tillgängliga provningsmetoder

4.1 Nötningsbeständighet

En egenskap som god nötningsbeständighet är framförallt viktig där betongen utsätts för snabbt strömmande vatten, vilket nöter betongen. Konstruktionsdelar inom vattenkraften som kan utsättas för nötning är utskov, skibord, intag samt insidan av sugrör till turbin.

Nötning av betong i vattenkraftkonstruktioner kan delas in i nötning genom kavitation, nötning genom erosion samt nötning genom strömmande vatten, is och löst flytande material. Beskrivning av respektive nötningsmekanism redovisas nedan.

4.1.1 Nötning genom kavitation

Hos konstruktionsdelar som utsätts för snabbt strömmande vatten och där ytorna är ojämna eller nivåskillnaderna abrupta kan kavitationsskador uppkomma. Då vattenhastigheten är tillräckligt hög ($>30 \text{ m/sek}^4$) bildas ett lokalt undertryck samt ångbubblor som följer med vattnet nedströms. Det som sker när dessa bubblor når områden med normalt tryck (vattenhastigheten sjunker) är att bubblorna imploderar och orsakar chockvågor. En sådan chockvåg inducerar höga spänningar då den träffar en betongyta vilket kan orsaka en punktskada. I och med detta ökar betongytans råhet vilket kan leda till ytterligare tilltagande kavitationsproblem. Då nötningsexponeringen är långvarig fås skadeverkningar oavsett den underliggande betongens kvalitet [6].

Kavitation uppkommer under vissa specifika förhållanden såsom:

- Extrema flödes förhållanden på skibord eller i kontrollvalv i pipelines.
- I maskiner som utsätts för flöden såsom pumpar och turbiner.

Anledningen till att man ser kavitation som ett problem är att kokningsprocessen innebär bildande och kollaps av ångbubblor i vätskan. När dessa bubblor kollapsar ger dessa upphov till lokala stötar, genom en skarp höjning och sänkning av det lokala trycket. Maxvärdet hos detta tryck kan bli så högt som $400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Trots att ett sådant förlopp endast varar några få millisekunder kan under kavitationsförhållanden dessa upprepas i snabb följd. Detta medför att den potentiella risken för att detta ska orsaka skador på betong- eller metallytor är betydande.

4.1.2 Nötning genom erosion

Erosion bygger på att strömmande vatten innehållande sediment nöter betongen. Särskilt utsatta konstruktionsdelar är utskov, skibord, samt intag. Nötningen orsakas av friktion mot betongytan. Denna typ av nötning får anses försumbar på en god betong. Nötning kan även ske genom friktion och stötar från fasta partiklar som transporteras med

⁴ Enligt uppgift från James Yang, Vattenfall Utveckling AB, 2002.

vattnet. Mängden partiklar påverkar nötningens omfattning. Vattenhastigheten har normalt även stor betydelse eftersom högre vattenhastighet medför transport av en större mängd partiklar. Sjunker sedan hastigheten kan dessa partiklar bli kvar vilka kan orsaka mycket stora lokala skador genom rotation och stötar [3].

4.1.3 Nötning av strömmande vatten, is samt löst flytande material

Nötning av betong genom strömmande vatten, is och löst flytande material förekommer i svenska vattendrag. Denna typ av nedbrytning betyder att cementpastan i betongen upplöses av strömmande vatten och accelereras sedan av nötning från is och löst flytande material som flyter med vattnet.

4.2 Material

Vid reparation av nötningsskadad betong bör man ta en rad faktorer i beaktande. Sådana faktorer beskrivs nedan i kapitel 4.2.1.

4.2.1 Material för kavitations- och erosionsskadad betong

För att erhålla ett nötningsbeständigt material/betong bör det innehålla största möjliga stenstorlek för ballastpartiklarna, största möjliga andel hårda ballastkorn och det lägsta möjliga praktiska vct.

Lagningsmaterial såsom sprutbetong har mer pasta och bruk per volymenhet betong och därmed mindre andel grov ballast än konventionell betong. Detta betyder att sprutbetong med fibrer förväntas ha lägre motståndskraft mot nötning genom erosion vid en jämförelse med konventionell betong. Laborationsförsök har visat att förlusten av nötningsbeständighet för sprutbetong med fibrer är generellt högre än för konventionell betong med samma vct och ballasttyp [7]. Dock ger t.ex. torrsprutad betong vanligen ett mycket högt vct (<0,40).

För att minska effekterna av nötning genom vattenströmning bör betongmaterialet innehålla grov och hård ballast, lågt vct samt eventuellt silika. Här är god vidhäftning mycket viktigt [8].

Nötningsbeständigheten hos vakuumbehandlad betong, polymerbetong, polymerimpregnerad betong, polymer-portlandcementbaserad betong är klart överlägsen den för konventionell betong.

Vidare har flera typer av ytbehandlingsmaterial visat god nötnings/erosionsbeständighet i laboratorietester. Exempel på sådana material är polyeteraner, epoxi/hartsbruk, akrylbruk. Problem med dessa bruk skapas då ytan inte är rengjord och färdigbehandlad inför påstrykning.

4.3 Provningsmetoder

För provning av nötningsbeständighet hos betong finns idag tre metoder. För simulering av kavitationsnötning finns i dagsläget ingen färdigutvecklad metod. Den metod som

skulle kunna ytterligare utvecklas är en svensk metod som bygger på användning av en högtrycksspruta.

För provning av nötningsbeständigheten vid erosionspåverkan samt vid nötningspåverkan orsakad av strömmande vatten, med is och löst flytande material finns en fransk metod. Genom vatten-/sandjet mäts den relativa effekten efter 75 minuters exponering. Metoden är utvecklad av Compagnie Nationale du Rhone i Frankrike (C.N.R). Nötningsresistansklassificeringen sker genom framtagning av ett s.k. C.N.R.-index. Ytterligare en metod finns för provning av erosionspåverkan vilken är en amerikansk metod. Metoden bygger på att roterande kulor nöter mot ett betongprov som är inneslutet i en ståltank med vatten. Testet utförs under 24 respektive 72 timmar. Efter genomfört test mäts viktnedgången hos betongmaterialet.

Ytterligare detaljerade beskrivningar av metoderna finns i Bilaga A (sammanställning av S-B. Westerberg, Vattenfall Utveckling AB).

4.4 Reparationsmaterial och underliggande material

Reparationsmaterial och underliggande material måste samverka för att reparationen skall bli beständig. Två viktiga faktorer som påverkar hur lyckad och beständig en reparationsinsats blir är:

- Vidhäftningsförmågan mellan underlaget och reparationsmaterialet är en viktig faktor för att erhålla en beständig reparation.
- Den relativa volymändringen mellan reparationsmaterial och underliggande betong är även den av betydelse.

4.4.1 Volymändring

Om ett reparationsmaterials volym minskar tillräckligt mycket relativt den underliggande betongen kommer sprickor att utvecklas som går rätvinkligt mot gränssytan. Generellt är sprickavståndet relaterat till reparationsmaterialets påstrykningstjocklek. Eftersom differentiella volymändringar orsakar spänningar vid gränssytan mellan reparationsmaterial och betongen är det viktigt med god preparering av gränssytan för att lyckas med en reparation. Det är också viktigt att välja reparationsmaterial med rätt E-modul då det i den underliggande betongen kan förekomma viss volymändring.

Frisk betong kan ibland inte stå emot spänningar som orsakas av hög volymändring hos reparationsmaterialet, medan den kanske klarar spänningar orsakade av låg volymändring hos reparationsmaterialet.

4.5 Alternativa reparationsmetoder mot kavitation

Vid kavitationsnötning har rostfritt stål i form av plattor visat sig vara en framgångsrik metod. Colgates (1977) [9] studier visar att stålplattor är fyra gånger mer resistenta/motståndskraftiga mot kavitationsskador än betong.

Det är viktigt att dessa stålplattor förankras väl och är tillräckligt styva för att minimera effekterna av vibration. Vibration kan orsaka fraktur och slutligen kollaps av den underliggande betongen eller brott hos förankringsanordningar. Injektering/utfyllnad med bruk bakom plattorna för att förhindra vibration rekommenderas. Nackdelen med plattor är att tidiga tecken på nedbrytning och skador hos betongen göms med denna metod.

Denna metod liksom många andra löser inte problemet utan behandlar/skyddar endast symtomen av kavitation. Om inte kavitationen reduceras eller elimineras på något sätt kan plattorna slutligen skadas genom små hål som orsakas av de höga vattenhastigheterna som ger luftblåsor som i sin tur trycker med stor kraft mot materialet.

4.6 Nötningsbeständighet hos lagningsmaterial utsatta för kavitation

I [9] beskrivs resultatet av ett liknande projekt som detta med att värdera olika typer av lagningsmaterial som används inom dammkonstruktioner.

I USA rapporteras att ca. 1/3 av mer än 600 dammar som ägs och drivs av U.S. Army Corps of Engineers har nötningsskador. Av dessa nötningsskador orsakas hälften av kavitation respektive andra hälften av erosion. Då dessa skador har reparerats har många olika typer av material och metoder använts med skiftande framgång. Med detta som bakgrund initierades ett projekt för att utvärdera kavitationsmotståndet hos olika reparationsmaterial. Ett provningsprogram för 80 lagningsmaterial sattes upp. Kavitationstesterna genomfördes i en rigg av Venturi- type⁵ som orsakar måttlig till allvarlig kavitation hos provkropparna. Hastigheten på vattnet var i detta fall ca. 35 m/sek.

Materialen som provades delades in i två grupper: a) reparationsmaterial samt b) skyddsbeklädnader. Gruppen reparationsmaterial var i sin tur indelad i: i) konventionell portlandcement betong, ii) silikabetong, iii) latexmodifierad betong, iv) snabbhärdande cementmaterial, v) fiberarmerad betong och vi) polymer bruk och betong. Tre typer av skyddsbeklädnader studerades; i) nepren, ii) stenkoltjära och iii) polyuretan.

Testerna visade att cementbaserade material generellt sett uppvisar dålig nötningsbeständighet. Nötningsbeständigheten hos konventionell betong förbättrades i vissa fall genom tillsats av latex, silika, reaktivt pulver och fiberarmerad betong. För de cementbaserade materialen erhöles ingen uppenbar korrelation mellan nominell maxstorlek hos ballasten och nötningsbeständighet. Polymerbaserade material uppvisade ingen uppenbar korrelation mellan tryckhållfasthet och volymminskning. I jämförelse med cementbaserade material uppvisade polymerbaserade material lägre volymminskning. De material som uppvisade den bästa nötningsbeständigheten var järn- och keramikfylld epoxi och polyuretanbruk. De skyddsbeklädnader som testades var generellt ineffektiva vad gäller deras motståndsförmåga mot kavitationsskador. Det mest effektiva sättet att reducera kavitationsskador är att använda lämplig hydraulisk utformning av normalt utsatta konstruktionsdelar.

⁵ Ett speciellt munstycke användes vilket vatten fick strömma ut från, läs mer på sid. 888 i artikel av McDonald J.E.[9]

5 Utvärdering av provningsprogram

För att efterlikna en skada på en befintlig vattenkraftanläggning gjöts sex stycken 1 x 1 x 0.35 m stora block, se Figur 5.1. Betongen kom med bil från BetongIndustri AB, Gävle, som sedan hälls ner i formen och bearbetades med vibrator. Betongen var vid leverans av trög konsistens (T) med sättmått på 60 mm, utbredning 400 mm, lufthalt 3,8% samt en hållfasthet på ca. 40 MPa. Betongen hade även ett stenmax på 32 mm och var vattentät. Betongen innehöll anläggningscement Degerhamn samt Sikas luftporbildare Micro Air.

Överytan på dessa referensblock sprayades med en ytretarder⁶ strax efter gjutning för att ett dygn senare kunna avlägsna ballast och cementpasta från överytan med en högtryckstvätt.

All hantering av provkroppar och gjutning skedde utomhus. Referensbetongen gjöts under våren 2000 och förvarades utomhus (dock under tak) under hela försöksperioden. Temperaturerna har därmed varierat, men dock aldrig understigit +10°.

Applicering⁷ av lagningsbruken skedde tre månader efter gjuttillfället, vilket illustreras i figur 5.2.



Figur 5.1 och 5.2. Gjutning av referensblock respektive applicering av lagningsbruk.

5.1 Lagningsbruk/Provningsmaterial

Det finns ett stort antal lagningsbruksprodukter på marknaden. Dessa produkter kan generellt delas in olika produkttyper beroende på uppbyggnad. De produkttyper som förekommer i denna studie överensstämmer i stora drag med den indelning som finns i rapporten *Sammanställning av lagningsbruk* [1].

⁶ BKN-ytretarder, för ballast 8/16 mm, verkar till ett djup av 3-4 mm [11]

⁷ Lades på för hand eftersom detta motsvarar förfarandet i fält.

Valet av reparationsmaterial grundar sig på önskemålet att projektet skall representeras av ett antal olika typer av lagningsbruk lämpade för konstruktionsdelar såsom uppströmsfrontplatta och skibord/utskov utsatta för ensidigt vattentryck respektive nötning.

I detta projekt ska provningsprogrammet simulera en reparation på ett utskov/skibord i en vattenkraftanläggning (reparationen kan vara av större eller mindre slag, men det ska vara relevant att använda ett lagningsbruk). Lagningsbruket ska därmed ha vissa egenskaper för att vara lämpligt att använda. Anledningen till att just denna typ av reparation simuleras är att den är mycket vanligt förekommande ute bland de svenska anläggningarna [2].

Indelningen av de olika lagningsbruken ser ut enligt följande; (beteckningarna efter varje redovisad typ av lagningsbruk förekommer i fortsättning vid redovisning av försöksresultat):

1. **Epoxibaserat (E)** – Tvåkomponent bestående av polymertätning och därefter applicering av en kvartsförstärkt komposit. Bruket är avsett att skydda underliggande betong mot fysiska angrepp.
2. **Reparationsbetong med stålfiber (RbF)** - Innehåller anläggningscement, stålfibrer samt porfyriskt stenmaterial. Betongen är avsedd för ytor där hög hållfasthet och slitstyrka och sprickfrihet krävs.
3. **Material med syntetiskt ballast (SyB)** – Består av aluminatcement och ett syntetiskt ballastmaterial med hög hållfasthet. Avsedd för ytor som utsätts för nötning och kavitation, slag, frost etc.
4. **Specialcementbaserat material (SpC)** – Energimodifierat cement
5. **Cementbaserade material (CB)** – Reparationsbruk för mindre lagningar.
6. **Material med glasfibrer (Gf)** – Cementbaserat fiber- och polymerförstärkt lagningsbruk. Används till ytor där krav på hållfasthet, saltfrostbeständighet och slitstyrka finns.

Ett lagningsbruk per materialtyp har valts. Orsaken till detta är att projektets storlek begränsar antalet som kan representera respektive materialtyp. Det ska även påpekas att materialtillverkarna själva gärna velat sätta in en annan produkt för just den reparation som ska efterliknas, men för att kunna göra en utvärdering av olika materialtypers lämplighet för just detta fall så har detta inte varit möjligt.

5.2 Genomförande

Blandning och applicering av samtliga material utfördes enligt tillverkarens egna rekommendationer och föreskrifter. Det enda material som tillverkaren själv applicerade var material E, eftersom denne föreskriver detta för att kunna garantera att de materialdata man utlovar i sitt produktblad uppfylls. Alla lagningsbruk blandades inomhus, men applicerades på provkropparna utomhus. Härdning och efterföljande provtagning skedde också utomhus, dock aldrig i lägre temperaturer än +15°C. Den härdning som användes var vattenhärdning enligt tillverkarens anvisningar. (Undantaget material E där ingen speciell härdning förekom.)

5.3 Resultat

Här nedan redovisas resultaten från laboratorieförsöken sammanställda och presenterade i Tabell, se Bilaga B. Kommentarer och diskussion till resultaten finns redovisade nedan.

5.4 Kommentarer till resultaten

5.4.1 Färska egenskaper

Att satsa, blanda och applicera kan tyckas vara enkelt, men försöken visar att det många gånger inte är fallet. Detta kan leda till att ett lagningsbruk är mer lämpat än något annat om t.ex. anläggningspersonal ska utföra en reparation i egen regi. Dessutom kan vissa bruk väljas bort om tillgängligheten och hanteringen i fält inte möjliggör att just den produkten används, detta kan involvera t.ex. öppethållandetider.

En sammanställning av materialens arbetbarhet vid applicering görs nedan, se även tabell 5.1.

Epoxibaserat material

Den underliggande betongen behandlas med en fuktborttagande primer innan applicering av bruket. Materialet har en seg karaktär, är mycket trögflytande (jordfuktigt). Materialet kan vara svår att applicera i vertikal riktning. Varken utbredningsmått eller sättmått var mätbart på detta material. Materialet har en lång bindetid, vilket är en fördel ur arbetbarhetssynpunkt. Påläggstjockleken för materialet var 30 mm.

Reparationsbetong med fiberinnehåll

Den underliggande betongen förvattnas innan applicering av reparationsbetongen. Materialet var mycket styvt och det var svårt att blanda. Detta material är lämpligt för blandning i rotorblandare alternativt i betongstation för att erhålla en effektiv produktion. Bindetiden för materialet uppmättes inte under försöket. Utbredningsmått och sättmått uppmättes till 250 mm respektive 25 mm. Påläggstjockleken för materialet var 30 mm.

Material med syntetiskt ballast

Den underliggande betongen förvattnas innan applicering av bruket. Materialet är lätt att blanda och att hantera vid applicering. Konsistensen är något styv och grynig. Bindetiden för materialet var 1.5 timme. Utbredningsmått och sättmått uppmättes till 270 mm respektive 15 mm. Påläggstjockleken för materialet var 20 mm.

Specialcementbaserat material

Den underliggande betongen förvattnas innan applicering av materialet. Materialet är relativt lättbearbetat, dock är materialet ganska tungt. Detta försvårar applicering. Bindetiden för materialet var 1.5 timme. Utbredningsmått och sättmått uppmättes till 510 mm respektive 235 mm. Påläggstjockleken för materialet var 20 mm.



Bild 5.3. Ytavjämning.

Cementbaserat material

Den underliggande betongen förvattnas innan applicering av materialet. Materialets arbetbarhet är relativt god strax efter färdigställd blandning. Dock härdar materialet mycket fort. Varken utbredningsmått eller sättmått var mätbart på detta material. Materialet har relativt kort bindetid, vilket är en nackdel ur arbetbarhetssynpunkt. Påläggstjockleken för materialet var 30 mm.

Material med glasfibrer

Den underliggande betongen förvattnas innan applicering av materialet. Arbetbarheten för anses god. Det var lätt att blanda och att hälla ut i formen. Fibrerna gör dock att materialet blir något kletigt. Materialet är ej anpassat för applicering på vertikala ytor. Bindetiden är lång, vilket är en fördel ur arbetbarhetssynpunkt. Sättmåtten var ej mätbart och utbredningsmått uppmättes till 237 mm. Påläggstjockleken för materialet var 30 mm.

Tabell 5.1. Sammanställning av lagningsbrukens färska egenskaper.

MATERIAL-TYP	Blandning och applicering	Objektiv utvärdering
E	Utfördes av representant från materialtillverkaren.	Eftersom arbetet utförs av representant från tillverkarna och de garanterar gott resultat så är detta bra, men kanske inte i alla fall önskvärt. En kostnadsfråga.
SpBF	Förvattning i 2 dygn innan Blandning i Rojo blandaren. Applicering för hand och vibrering med stav. Stålglättning samt efterföljande härdning med vatten och plast över.	Betongen var styv och svår att blanda. Ordentlig utrustning behövs. Seg att placera i form och tung, hög densitet.
SyB	Förvattning i 1 dygn med avslut ca. 2 timmar innan gjutning. Blandning med "handmixer" och applicering för hand samt vibrering med stav. Stålglättning och vattenhärdning i 1 dygn.	Lätt att blanda dock av grynig konsistens. Lätt att placera i form och ej så tung, låg densitet.
SpC	Förvattning i 1 dygn. Blandning skedde i Rojo blandaren. Applicering för hand och stålglättning. Vattenhärdning i 1 dygn.	Relativt lätt arbetad betong trots sin styvhet dock något tung att placera i formen, hög densitet.
CB	Förvattning i 1 dygn. Blandning med handmixer. Applicering för hand och därefter stålglättning. Vattenhärdning i 1 dygn.	Relativt lättarbetad i början (blandas lätt och flyter ut något). Härdar dock mycket fort vilket försämrar arbetbarheten.
Gf	Förvattning i 1 dygn. Blandning med handmixer. Bruket hällades i formen och stålglättades. Vattenhärdning i 1 dygn.	God arbetbarhet, lätt att blanda och hålla i formen. Något kletig p.g.a. av fibrerna. Ej användbar på vertikala ytor i nuvarande konsistens.

5.4.2 Hårdnade egenskaperna

Nedan kommenteras inte varje provat material utan en allmän genomgång görs för varje provningsmetod.

Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos samtliga lagningsmaterial som ingår i denna studie är hög. Generellt ligger tryckhållfastheten som erhållits i dessa försök högre än vad tillverkarna redovisar i sina produktkataloger för respektive material.

Densitet hos hårdnat material

Uppgiften om den hårdnade densiteten är för tre av materialen tillgänglig i tillverkarnas produktblad. Densiteten som redovisas för dessa tre (material E, CB och Gf) stämmer väl överens med den densitet som erhållits från materialförsöken. För de tre övriga som saknar uppgift om densitet i sina produktblad kan en kontroll därför inte göras.

Vattentäthet

Vattentäthet är en viktig egenskap då ett lagningsmaterial skall utsättas för ensidigt vattentryck som i vattenkraftanläggningar. Konstruktionsdelar som har kan tänkas aktuella för reparation är uppströmssidan på frontplattan hos en damm. Samtliga material utom material IC i studien uppvisar bra vattentäthet i försöksstudien. Material IC saknar förmåga att motstå vatten under konstant tryck.

Vidhäftningshållfasthet

För vidhäftningshållfastheten mellan lagningsmaterial och underliggande betongmaterial gäller 1.5 MPa som ett riktvärde. Värdet grundar sig på uppgifter som Vägverket anger i sin BRO 94. Detta krav uppfyller material E, RbF och SyB, där brottet även sker i den underliggande betongen, vilket visar på att den verkliga vidhäftningshållfastheten är ytterligare något högre. Material SpC, CB och Gf uppfyller inte kraven på vidhäftningshållfasthet. För dessa reparationer sker brottet i vidhäftningszonen.

Frostbeständighet

Avflagnings p.g.a. frysning av lagningsmaterialen provades även eftersom materialen frekvent utsätts för frysexponering vid användning inom vattenkraftanläggningar. Materialen IC, SpC och CB uppvisade mycket god frostresistens medan materialen RbF, SyB och F uppvisar god frostbeständighet i saltvatten. Vidare uppvisar samtliga material mycket god frostbeständighet i sötvatten, vilket främst är aktuellt vid reparation av vattenkraftanläggningar. Detta visar på att försöksmaterialen torde vara väl lämpade ur frostbeständighetssynpunkt för användning i klimat som ofta råder vid vattenkraftanläggningar.

Krympning

Krympningens storlek är inte uppseendeväckande stor för något av materialen. Dock erhöles ett mätfel vid krympmätningen hos material RbF, vilka därför måste förbises. Krympningens storlek för samtliga material torde tyda på att något större problem med krympsprickor inte förligger för något av materialen. Detta anses som positivt eftersom en liten förekomst av sprickor bidrar till en beständig reparation.

6 Analys och diskussion

6.1 Verktygen – provningsprogram

Vid en analys av framtaget provningsprogram innehåller det i stort sett de provningar som önskas. Dock bör man lägga till en vertikal reparation som också utvärderas. Dessutom är det av vikt att finna en lämplig metod för att prova nötningsbeständighet samt frostbeständigheten i skiktet mellan gammal betong och lagat material samt lämplig/tillförlitlig metod för täthetskontroll.

Ingående provningsmetoder i programmet ger utslag på skillnader i egenskaper hos lagningsbruken, vilket även är syftet.

6.2 Lagningsbruken

Vid en analys av i kapitel 5 redovisade resultat kring vad dessa kan betyda för beständighet hos reparationsmaterialen tyder på att förutsättningarna är goda för samtliga material. Detta naturligtvis under förutsättning att förarbete och arbetsutförande sker på ett korrekt och tillfredsställande sätt.

Samtliga material i studien anses lämpliga för applicering på horisontella ytor utgående från de erfarenheter av arbetbarheten och appliceringen av materialen som erhållits. Behovet av formbyggnad för att möjliggöra applicering på vertikala ytor torde vara aktuellt för de material med grövre kornstorlekar hos ballasten och för vilka större påläggstjocklekar kan bli aktuella vid reparation. Material som kan kräva formbyggnad vid en vertikal reparationsinsats som är större är troligtvis RbF och SyB. Övriga material är troligtvis inte lämpade för applicering av större påläggstjocklekar.

Kravet på vidhäftning mellan betong och betong rekommenderades till 1.5 MPa. Här klarar materialen E, RbF och SyB detta krav. Som tidigare påpekats sker brottet i vidhäftningszonen vilket betyder att den verkliga vidhäftningshållfastheten troligen är högre. Materialen SpC, CB och Gf uppfyller inte kravet på vidhäftningshållfasthet. Att inte material SpC klarar kravet kan beror på att vct blev något högre än vad tillverkaren rekommenderar. Att även material Gf erhöll brott i vidhäftningszonen kan bero på bl.a. att tryckhållfastheten är något lägre än hos övriga material.

Kravet på vattentäthet uppfyller inte material E, men materialet har i övrigt mycket goda egenskaper såsom frostbeständighet, vidhäftningshållfasthet, krympning och tryckhållfasthet.

Vattenprofilen hos samtliga material förutom hos material E ligger mellan 0-10 mm, vilket är mycket bra. Materialen tar inte upp omgivande vatten i så stor utsträckning. Undantaget material E beter sig som en svamp och är troligen ej lämplig för reparation av konstruktionsdelar som utsätts för ensidigt vattentryck såsom på uppströmssidan på en dammkonstruktion.

Krympningens storlek hos samtliga material torde inte orsaka några större problem med krympsprickor som följd. Detta eftersom materialen i studien överlag inte krymper i någon större utsträckning. Krympningen torde även vara sammankopplad till volymändringen hos lagningsmaterial. Volymändringen relativt den underliggande betongen skall som tidigare påpekats vara så liten som möjligt för att erhålla en lyckad och därmed en beständig reparation med få antal sprickor. Även reparationsmaterialets påläggstjocklek styr sprickförekomsten, dvs. ökad tjocklek kan öka sprickförekomsten. I försöksstudien ligger påläggstjockleken av samtliga material mellan 20-30 mm, vilket därmed inte kan ge någon indikation på skillnader i sprickförekomst mellan reparationsmaterialen.

Eftersom inte nötningsbeständigheten för de studerade materialen har testats inom ramarna för det här projektet kan ingen bedömning av denna egenskap göras. Enligt produktbladen är dock material E och SyB nötningsbeständiga (mekanisk nötning).

7 Resultat

Syftet med projektet var att ge beställare lämpliga verktyg att bedöma lagningsbruks funktion och beständighet och därmed underlätta valet av produkt. De verktyg som beställare inom vattenkraftindustrin kan använda sig utav från detta projekt är bl.a. de tabeller som tagits fram där konstruktionsdel är relaterat till vilka egenskaper som man bör ställa på reparationsmaterial/lagningsbruk. Dessutom är dessa egenskaper kopplat till provningsmetoder. Vid upphandling kan utifrån dessa tabeller krav ställas på entreprenör och materialleverantör vilka egenskaper och garantier/kontroller som önskas, se tabell 3.2 på sida 9.

Målet var att definiera önskade egenskaper hos lagningsbruk samt ta fram tillhörande provningsprogram för detta. Dessutom skulle detta provningsprogram verifieras samt att fortsatt arbete skulle specificeras. Målet får ses som uppfyllt.

7.1 Kommentarererna kring genomförda försök

Resultaten visar att vissa materialtyper kanske inte är lämpade för vissa typer av reparationer trots leverantörens försäkran (produktinformation). Detta innebär att en kritisk granskning ska föras vid upphandling och en förprovning är att föredra av vald produkt. Dessutom kan i vissa fall den svåra hanteringen och själva blandningsförfarandet bidra till de sämre resultaten i försöken. Förutom att det är önskvärt att erhålla de egenskaper som krävs för en god beständighet är det av stor vikt att lagningsbruket kan blandas, appliceras och härdas på föreskrivet sätt.

Med benämningen lagningsbruk associeras ofta till ett material som är blandningsbart på plats och att applicering kan utföras av egen personal. Detta inte är möjligt för samtliga ingående materialtyper i detta projekt. Försöken visar således att det är viktigt att vid valet av lagningsbruk tillse att bruket är anpassat till den reparation som ska utföras. Ett lagningsbruk som fungerar för en reparation på en konstruktionsdel som utsätts för ensidigt vattentryck behöver inte vara lämplig för reparation av konstruktionsdel utsatt för nötning. Detta är något som beställaren bör ta hänsyn till och diskutera med leverantören inför en förestående reparationsinsats.

7.2 Fortsatta forskningsbehov

Utgående från denna inledande studie av lagningsmaterial är det svårt att ge någon heltäckande bedömning eller rekommendation om vilka material som får anses mest lämpliga för reparation av vattenkraftanläggningar. Allt beror på aktuell konstruktionsdel, skadeorsak och valet av åtgärd.

Dock krävs ytterligare studier för att:

- ❑ Testa nötningsbeständighet med lämplig provningsmetod som är anpassad för svenska förhållanden
- ❑ Titta på frostbeständigheten i skiktet mellan gammal betong och applicerat lagningsbruk
- ❑ Specificera konkreta krav till materialtillverkare vad gäller erforderliga provningsmetoder, önskade egenskaper samt kravnivåer.

Ett projekt för framtiden skulle kunna omfatta en sådan studie, vilket torde vara av intresse för vattenkraftindustrin.

8 Referenser

- [1] Rådman J., *Sammanställning av lagningsbruk*, Elforskrapport, Älvkarleby, 2000
- [2] Björkenstam E., *Inventering av betongreparationer utförda på svenska vattenkraftanläggningar*, Vattenfall Utveckling AB, Elforskrapport 99:28, 2000
- [3] Kraftverksförenings Utvecklingsstiftelse, VAST, *Betong i vattenkraftanläggningar*, Stockholm, 1991.
- [4] Betonghandboken Material
- [5] Svensk Standard, *SS 13 72 44*,
- [6] Bernstone C., *Kunskapsåterföring på betongområdet från det amerikanska REMR-programmet*, Elforsk Rapport 98:33, december 1998
- [7] Liu T.C. och McDonald J.E., *Repair of Concrete Structures Subjected to Abrasion-Erosion Damage*, Concrete International, Vol. 2, No. 9, september 1980
- [8] Colgates, 1977
- [9] McDonald J.E., *Evaluation of Materials for Repair of Damage in Hydraulic Structures*, Durability of Concrete, Proceedings, Fifth International Conference, Barcelona, Spain, 2000
- [10] BKN Byggkemi AB, *Nordisan*, BKN 97.05, Älvsvängen 1997
- [11] Laplante P., Aitcin P.C., Vézina D., *Abrasion resistance of concrete*, Journal of Materials In Civil Engineering, Volume 3, No. 1, February 1991.

Bilagor

A Sammanställning kavitationsprovning

Sammanställning av Stig-Björn Westberg, Vattenfall Utveckling AB, på uppdrag av projektet om lagningsbruk.

A.1 Kavitationsprovning

Detta är en mycket kortfattad beskrivning av den rekommendation för kavitationsprovning av betong eller cement som skulle kunna göras utifrån det material som finns tillgängligt.

De flesta undersökningar som gjorts av kavitationserosion har gjorts på metalliska material och det förefaller klart att ytcentrerade kubiska material som austeniter har god kavitationsbeständighet. Bra är också om de har liten känslighet för deformationshastigheten och har låg staplingsfelsesenergi mm. vilket lett fram till att koboltlegeringar och en del austeniter visat sig vara utmärkta. Dessa metalliska material är emellertid mycket homogena jämfört med betong och cement, vilket gör att skillnaden mellan vibrationskavitation och strömningskavitation kan få betydelse. Vid vibrationskavitation bildas blåsor som har storlek ca 50 mikrometer och vid strömningskavitation 0,25 - 1 mm. I det första fallet är kavitationsblåsorna klart mindre än de strukturbeståndsdelar som kan tänkas ingå i betongen. Det nämndes i ASM Handbook en litteratursökning som visade bara en referens på kavitation på betong.

Provningsmetoder

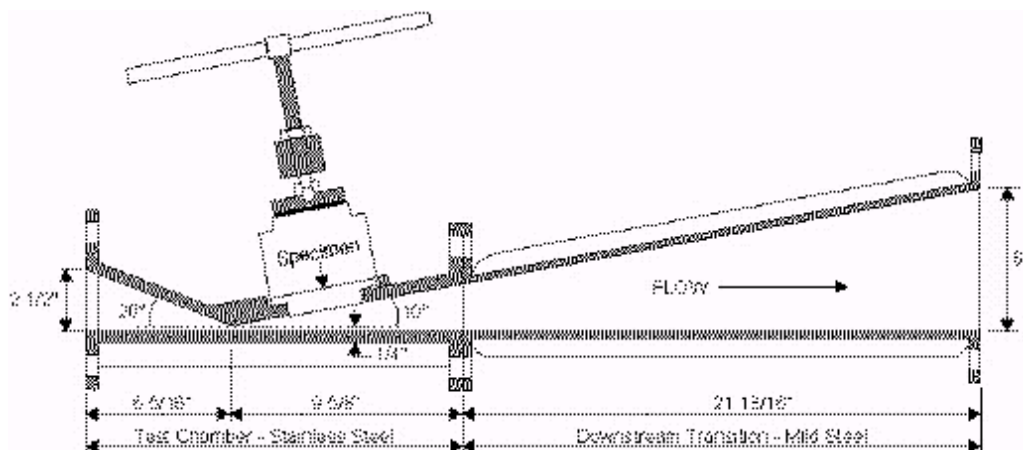
Fyra metoder för provning av kavitationsbeständighet hos material finns:

1. Flödeskanaler;
2. Vibrations(ultraljuds)metoder;
3. Kaviterande jetstråle;
4. Roterande skiva.

Det finns ingen laboratoriemetod som kan simulera hela situationen för kavitation och struktur. Laboratoriemetoder kan däremot rangordna olika material. Dessutom tillkommer andra omständigheter som korrosionseffekter och effekter från strukturell belastning som i betongkanaler.

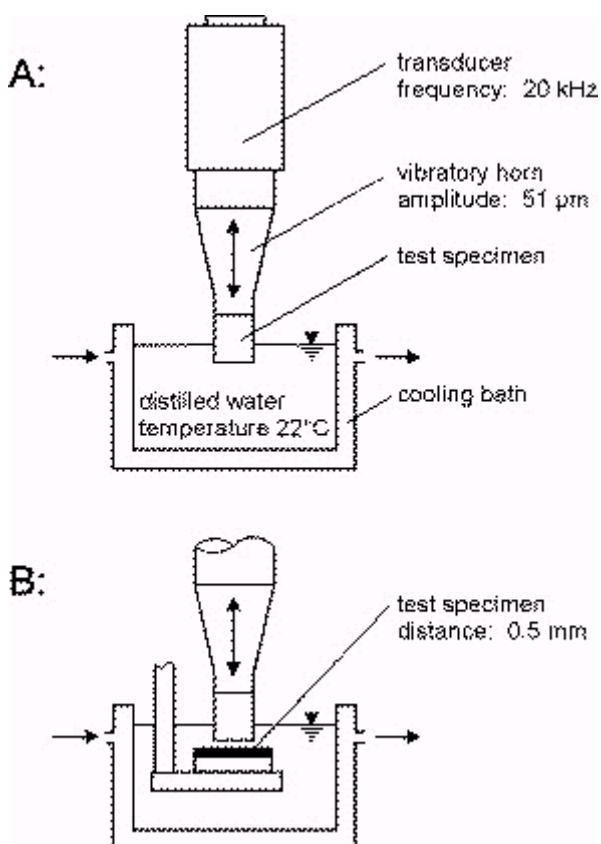
Flödeskanaler

Dessa består av en sluten slinga i vilken vattnet pumpas runt och en sektion med en skalenlig modell eller en venturiförträngning med en provhållare som är utformad så att kavitation uppstår på särskilda platser intill materialprovet. Metoden är utmärkt på att simulera flödeskavitation. Det är emellertid svårt att byta prov eftersom det är en del av flödeskanalen och metoden är långsam jämfört med andra metoder. Så långa tider som över 2000 timmar har rapporterats.



Vibrationsmetoder med ultraljud

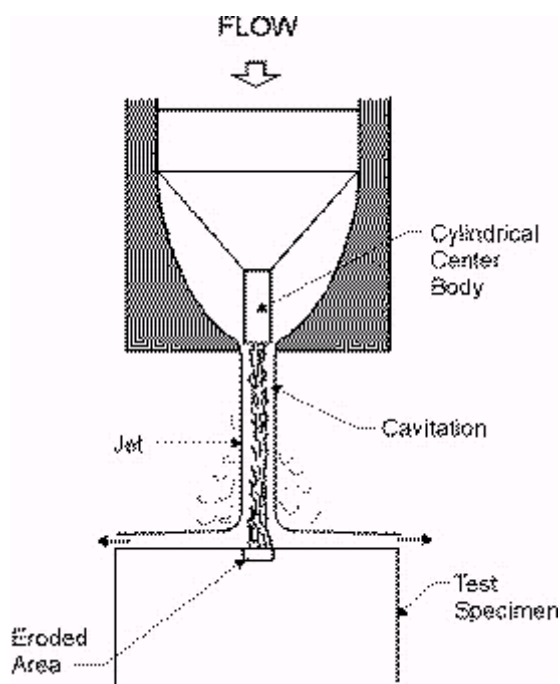
Frekvensen för vibrationen är vanligen ca 20 kHz. Utrustningen arbetar med en liten stationär volym av vätskan. Provet monteras antingen på hornets spets (rörligt prov) eller som modifierats av Schwitzke och Kreye några millimeter under hornets spets (stationärt prov). Metoden används för accelererad provning och för studier av interaktion med korrosion. Direkt jämförelse med resultat från flödeskanaler anses inte tillrädligt. Den är lämplig för grovsällning av material och beskrivs av ASTM. Metoden är vidareenkel, relativt snabb, inte särskilt kostsam och har blivit den mest använda.



Vi har utrustning för detta. Jag pratade med Alf Jonsson och vi har allt utom uppsamlingstanken för vattnet så det skall i princip bara vara att köra igång om man väljer denna metod.

Kaviterande stråle, jetmetod

Två varianter av metoden har beskrivits. I typ I levererar en pump med ackumulator testvätskan genom en öppning med tvär ingång till ett parallellborrat rör som ger en jet in i en kammare med kontrollerat tryck. I typ II används en central kärna i inloppet till röret för att generera kavitationen.



I typ II utrustningar startar kavitationen bakom kroppen i strömningskanalen och kommer i centrum av strålen. I typ I utrustningar bildas kavitationen i jetens vena contracta område och skickas ut som ett moln av kaviteter runt strålens periferi. Kaviteterna kollapsar på provmaterialets yta och eroderar materialet.

Fördelen med jetmetoder är att det är en accelererad provningsmetod som ger möjlighet till påverkan av olika kavitationsparametrar. Dessutom påminner kavitetsstorleken om den som förekommer vid verkliga flödessituationer mer än kavitationsmetoder. Metoden är föremål för normering av ASTM så det bör undersökas om någon ASTM-standard kommit ut.

Baserat på de resultat som rapporterats i litteraturen anser man att kaviterande jet är bättre än de metoder som baseras på ultraljud för att förutsäga utfallet vid fältförsök.

Roterande skiva

Roterande skiva är en äldre metod men som fortfarande används för utvärdering av material till pumpar. Metoden går ut på att en skiva med gropar roterar i ett stillastående medium, varvid blåsor bildas som kollapsar på prover som monterats på skivan.

Rekommendationer

Utgående från vad författaren vet och vad som redovisats här ovan i första hand rekommendera en jetmetod och i så fall den med en kavitationsgenererande kropp av typ II eftersom den bäst efterliknar kavitation orsakad av strömmande vatten.

En litteratursökning bör göras för att eventuellt hitta något om kavitationsskador på betong eller cement under de senaste åren.

B Resultat från verifiering av provningsprogram

Tabell 1. Resultat från provning av lagningsbruk

Bruk:	Epoxi-baserat material ^A	Reparations betong med fiber-innehåll	Material med syntetiskt ballast	Special-cement-baserat material	Cement-baserade material	Material med fibrer
Förberedelsearbete	Ej förvattning	Förvattning	Förvattning	Förvattning	Förvattning	Förvattning
Påläggstjocklek	30 mm	30 mm	20 mm	20 mm	30 mm	30 mm
Vct	Ej mätbart ^B	0.07	0.4	0.4	0.1	0.14
Utbredningsmått SS 13 71 23	Ej mätbart ^C	250 mm	270 mm	520/500 mm	Ej mätbart ^C	215/265/230 mm
Sättningsmått SS 13 71 21	Ej mätbart ^C	15/10/35/40 mm	15 mm	235 mm	Ej mätbart ^C	Ej mätbart.
Bindetid: SS 12 71 26	4 till 6 tim	-	1,5 tim	1,5 tim	1 tim	6,5 tim
Vattenhärdning Antal dygn	Nej 0 dygn	Ja 2 dygn	Ja 1 dygn	Ja 1 dygn	Ja 1 dygn	Ja
Tryckhållfasthet: SS 13 72 10						
7 dygn	71,0	71,4	88,4	96,5	71,9	39,8
28 dygn	80,4	91,2	93,9	108,1	86,9	55,6
Densitet: SS 13 72 10						
Kg/m ³	1950	2450	2500	2350	2240	2000
Krympning: SS 13 72 15						
14 dygn (‰)	0,01	Resultat saknas	0,05	0,1	-	0,4
21 dygn (‰)	0,1	-	-	0,2	0,2	0,7
35 dygn (‰)	0,1	-	0,09	0,3	0,3	0,8
63 dygn (‰)	0,05	-	0,15	0,4	0,5	1,0
Vidhäftning/drag: SS 13 72 31	I betong	Mest. i betong	I betong	Vidhäftn.zon	Vidhäftn.zon	Vidhäftn.zon

Ålder	28 dygn	47 dygn	47 dygn	41 dygn	20 / 39 dygn	28 dygn
MPa	3,5	1,6	1,9	1,2	0,7 resp.1,0	0,9
Vattentäthet:	Ej vattentät					
SS 13 72 14	alls. 150 mm	0 mm	10 mm	5 mm	10 mm	10 mm
Frostresistens						
SS 13 72 44						
Söt (56 d.)	0,03 kg/cm ³ (Mkt god)	0,03 kg/cm ³ (Mkt god)	0,06 kg/cm ³ (Mkt god)	0,07 kg/cm ³ (Mkt god)	0,06 kg/cm ³ (Mkt god)	0,03 kg/cm ³ (Mkt god)
Salt (56 d.)	0,03 kg/cm ³ (Mkt god)	0,14 kg/cm ³ (God)	0,14 kg/cm ³ (God)	0,04 kg/cm ³ (Mkt god)	0,09 kg/cm ³ (Mkt god)	0,14 kg/cm ³ (God)

^A Lagningsbruket vibrerades ej.

^B Kunde ej mätas eftersom allt arbete sköttes av representanten från materialtillverkaren.

^C Materialet är ej anpassat för denna mätmetod.

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