

**Antiurvaskningsmedels inflytande på
undervattensgjuten betongs
frostbeständighet**

En litteraturgenomgång

Elforsk rapport 00:19

Antiurvaskningsmedels inflytande på undervattensgjuten betongs frostbeständighet

En litteraturgenomgång

Elforsk rapport 00:19

Antiurvaskningsmedels inflytande på undervattensgjuten betongs frostbeständighet

En litteraturgenomgång

Elforsk rapport 00:19



Ovan bild är tagen vid Ölandsbron under våren 1999 och visar NCC:s reparation av lågbrodelens bropelare. Reparationerna görs till största delen i torrhet genom att fångdammar byggs runt om pelarna. Vissa undervattensgjutningar har även genomförts.

Christian Bernstone

Förord

Antiurvaskningsmedel för undervattensbetong används i Sverige sedan mitten av 80-talet och dess positiva inverkan är numera väldokumenterad. En viktig nackdel som kvarstår är att betong gjuten med antiurvaskningsmedel (AUV-betong) har dålig frostbeständighet.

I ett tidigare Elforskprojekt utförd vid Vattenfall Utveckling har bl. a. AUV-betongs vidhäftning mot gammal betong undersökts, liksom en serie inledande försök vad gäller frostbeständighet. Inför fortsatt FoU för att titta närmare på egenskaperna vid nedfrysning har det ansetts angeläget att göra en genomgång av senare års litteratur inom området.

I och med denna rapport har litteraturstudien sammanställts och avslutats. Arbetet har genomförts vid Betongteknik, Vattenfall Utveckling AB, med finansiering från Elforsk.

Stockholm i juni 2000

Lars Hammar
Elforsk AB

Sammanfattning

Betonggjutningar under vatten har utförts runt om i världen under mer än ett sekel. Förfaringssättet har baserats på metoder som förhindrar att betongmassan störtar ner genom vattnet med stor hastighet och som minskar exponeringen för urvaskning av cement och finmaterial. Den urvaskning av cement och finmaterial som trots allt har skett har medfört att undervattensbetong ofta lidit av bristande kvalitet. Senare års utvecklingsarbete på materialsidan har dock resulterat i att en ny typ av tillsatsmedel som minskar risken för urvaskning har kommit ut på marknaden, s.k. antiurvaskningsmedel. Dessa medel ändrar den färska betongens reologiska egenskaper så att konsistensen blir kladdig och trögflytande. Den stora fördelen med att använda antiurvaskningsmedel är att risken för misslyckade gjutningar kan minskas avsevärt. Detta är betydelsefullt eftersom misslyckade gjutningar vid upprepade tillfällen har medfört att den gjutna konstruktionen måste bilas eller sprängas bort.

Den dåliga frostbeständighet som i många fall uppnås vid provning är i dagsläget en kritisk negativ egenskap för undervattensbetong gjuten med antiurvaskningsmedel. Följaktligen används sådan betong endast för icke frostutsatta konstruktionsdelar. Frostbeständighet behövs dock i de fall som kyla kan ledas ned till konstruktionsdelar under vatten eller då undervattensbetong gjuts upp till vattenlinjen. Det finns därför ett behov av att se över hur frostbeständigheten skall provas och hur den kan förbättras.

Denna rapport behandlar i sammanfattande drag olika användningsområden för antiurvaskningsmedel, vissa materialmässiga aspekter på undervattensbetong samt ger en allmän genomgång av fuktutsatt betongs frostresistens. Tyngdpunkten i rapporten ligger emellertid i en genomgång av undersökningar där frostbeständigheten för betong med antiurvaskningsmedel har testats. Det har dock visat sig att det endast finns ett fåtal antal undersökningar redovisade i litteraturen.

Genomgången visar att de tidiga undersökningar som har genomförts motiverades av ett allmänt dåligt kunskapsläge. De resultat som erhöles blev emellertid dåliga, varpå nya undersökningar följde i syfte att komma tillrätta med vissa motsägelsefulla uppgifter. I dagsläget visar de bästa resultaten som erhållits att god frostbeständighet kan uppnås vid provning med rent vatten. Detta har fått till följd att man på vissa håll nu anser att det går bra att använda undervattensbetong under samtidig fukt och frostbelastning. I Kanada har således en reparationsgjutning med undervattenbetong utförts på en skadad slusskonstruktion med, som det ser ut från den rapportering som finns tillgänglig, lyckat resultat. Den undervattenbetong som användes tillverkades med tillsats av antiurvaskningsmedel.

Förutom de resultat som finns vad gäller frostbeständighet så framgår det av litteraturgenomgången att antiurvaskningsmedel äger goda egenskaper i form av god hållfasthet, god vidhäftning samt goda kringflytande egenskaper.

Rapporten avslutas med en diskussion om de faktorer som påverkar undervattenbetongs frostbeständighet.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	BEGRÄNSNINGAR	2
1.4	METOD	2
1.5	TIDIGARE UTFÖRDA STUDIER I SVERIGE	3
2	ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN	4
2.1	NYGJUTNING	4
2.2	REPARATIONSGJUTNING	4
2.3	ÖVRIGT	5
2.4	POTENTIAL	5
3	MATERIALMÄSSIGA ASPEKTER	6
3.1	CEMENT	6
3.2	ANTIURVASKNINGSMEDEL	6
3.3	ANDRA TILLSATSMEDEL ÄN AUV	8
3.4	TILLSATSMATERIAL	9
3.5	HÅLLFASTHET	9
3.6	MILJÖPÅVERKAN	10
3.7	NORMKRAV	10
4	FUKTUTSATT BETONGS FROSTRESISTENS	12
4.1	SKADOR	12
4.2	TESTMETODER FÖR FROSTBESTÄNDIGHET	14
4.3	GENERELLA SKADEMEKANISMER	15
5	GENOMGÅNG AV PUBLICERADE FÖRSÖKSRESULTAT. FROSTRESISTENS AV AUV-BETONG	19
5.1	FUKUOKA UNIVERSITY, JAPAN, 1991 [31]	19
5.2	TECHNICAL RESEARCH CENTER, HAZAMA CORP. JAPAN, 1992 [8].	20
5.3	BETONGTEKNIK, VATTENFALL UTVECKLING AB, 1995 [7][32]	22
5.4	UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, KANADA, 1995 [15].	25
5.5	UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, KANADA, 1996 [11].	30
6	DISKUSSION	32
6.1	MATERIAL OCH HANDHAVANDE	32
6.2	PROVNINGSMETODER FÖR FROSTBESTÄNDIGHET	38
7	SLUTORD	40
8	REFERENSER	41

Bilagor

A LITEN ORDLISTA

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Betonggjutningar under vatten har utförts sedan senare hälften av 1800-talet. Den s.k. Tremie-metoden (eng.) eller Contractormetoden (sv.) har under lång tid varit helt dominerande. Contractormetoden, som patenterades av det svenska företaget Byggnads AB Contractor 1911 [1], bygger på att betongmassan tillförs genom ett rör som hålls nedsänkt mot gjutstället. I dag kopplas i regel betongpumpar till ett gjutrör som endast flyttas i vertikalled under själva gjutarbetet (röret flyttas i ett system med ett specificerat maximalt avstånd mellan gjutpunkterna). Inför gjutningen styrs betongflödet så att röret kan fyllas med betongmassa innan det sänks på plats och gjutningen startar. Betong tillförs sedan under befintlig betongyta. Förfaringssättet förhindrar att betongmassan störtar ut genom gjutröret i stor hastighet och minskar därmed exponeringen för urvaskning av cement och finmaterial.

Oavsett vilken metod som har använts vid undervattensgjutningar så har resultatet ofta lidit av bristande kvalitet till följd av att viss urvaskning av cement och finmaterial trots allt sker från betongmassan. Senare års utvecklingsarbete på materialsidan har resulterat i att en ny typ av tillsatsmedel som minskar risken för urvaskning har kommit ut på marknaden, s.k. antiurvaskningsmedel¹ (AUV), som ändrar den färska betongens reologiska egenskaper så att konsistensen blir kladdig och trögflytande. Tillsatserna började att användas i Tyskland under mitten av 70-talet, i Japan under början av 80-talet och i USA under senare delen av 80-talet [2]. Till följd av produktutveckling hos skandinaviska materialtillverkare har AUV-medel funnits på marknaden i Sverige sedan mitten av 1980-talet. Medlen är väl lämpade att användas för både nygjutningar och reparationer. Den stora fördelen med AUV-medel är att risken för misslyckade gjutningar minskas avsevärt. Detta är betydelsefullt eftersom misslyckade gjutningar vid upprepade tillfällen har medfört att den gjutna konstruktionen måste bilas eller sprängas bort.

Dålig frostbeständighet är i dagsläget en kritisk negativ egenskap för undervattensbetong gjuten med AUV-medel vilket innebär att sådan betong endast används för icke frostutsatta konstruktionsdelar. Undervattenbetongs frostbeständighet är emellertid inte enbart en materialfråga utan även en fråga om de krav som skall ställas på betong som gjuts under vatten (d.v.s. även inkluderande frostutsatt vattenbyggnadsbetong). I Kanada tillåts idag att AUV-betong används även på frostutsatta vattenbyggnadskonstruktioner [3].

Den mycket begränsade provning av frostbeständigheten som görs i Sverige av undervattensbetong följer idag av allt att döma samma riktlinjer som gäller för all annan betong. Dessa standarder avspeglar dock dåligt de frost- och upptyningscykler som råder

¹ Det finns flertal termer med likvärdig betydelse. I svenskan förekommer även termen vattenavvisande medel. I engelskan används i många fall termen "anti-washout admixtures" (AWA), men även termerna "viscosity-enhancing admixtures" (VEA), "viscosity-modifying admixtures" (VMA), "anti-bleeding admixtures" och "sag-resistant admixtures" förekommer. AWA kan sägas utgöra en delgrupp av under VMA.

under vatten, d.v.s. varken antalet cykler, dess temperaturspännvidd eller deras tidsperioder är rättvisande. Ej heller motsvarar den frysprovning med saltlösning som i regel används av de förhållanden som flertalet vattenbyggnadskonstruktioner inom t.ex. vattenkraftsindustrin är utsatta för². Det kan således finnas anledning att ställa frågan om huruvida en tillräcklig frostbeständighet kan erhållas eller inte. Föreliggande litteraturstudie innehåller en genomgång av litteratur som belyser AUV-medels frostbeständighet. Litteraturstudien har utförts vid Betongteknik, Vattenfall Utveckling under hösten 1998.

1.2 Syfte och mål

Syftet med genomgången är att sammanfatta kunskapsläget vad gäller AUV-medels inflytande på undervattengjuten betongs frostbeständighet. Vidare omfattar studien vad konstant fuktbelastning innebär för frostbeständigheten.

Projektets mål är att rapporten skall kunna utgöra underlag för fortsatt forskning och utveckling inom området. Vidare avhandlas vissa ytterligare aspekter på AUV-betong än frostbeständigheten (flytbarhet, pumpbarhet, öppethållandetid, vidhäftning, hållfasthet, etc.)

1.3 Begränsningar

Olika typer av AUV-medel har avhandlats relativt omfattande i litteraturen och kommer inte att diskuteras i någon större omfattning här (se t.ex. [2]).

Av litteratursökningen har det framgått att det finns omfattande FoU inom området i Japan. Tyvärr finns endast en del av resultaten därifrån tillgängligt på engelska.

Tysk litteratur inom området har inte beaktats.

1.4 Metod

Referenser har tagits fram efter konsultation av ett flertal olika källor:

- Referenssökning vid Cement- och Betonginstitutets bibliotek i Stockholm.
- Genomgång av konferensrapporter, REMR-material [4] etc. vid Betongteknik, Vattenfall Utveckling AB.
- Sökning på Internet, inklusive referensdatabaser för tidskrifterna ACI concrete international, ACI materials journal, ACI structural journal, Building research and information, Advanced cement based materials och Advances in cement research.
- Databassökning: Referensdatabaser på KTHs bibliotek "KTHB" samt LTHs bibliotek "V-biblioteket Bygg". Följande databaser har studerats: ASCE Civil Engineering Database, Byggdok, UnCover, BCA Concrete Information. Sökning har även gjorts i Vägverkets biblioteksdatabas och ICOLD congress database.

² Detta gäller under vatten. I anslutning till vattenytan blir förhållandena desamma som för all annan betong.

1.5 Tidigare utförda studier i Sverige

Ett flertal undersökningar som avhandlar undervattensbetong har i olika omfattning genomförts i Sverige under de senaste 20 åren. Några av dem sammanfattas kortfattat nedan:

- Byggforskningsrådet drev under perioden 1976-84 forskningsprojektet "Undervattensbetong" [5]. I projektet ingick undersökningar av olika betongblandningar, studier av strömningsbild, inverkan av vibrering samt provning av tryckhållfasthet och vidhäftning. Resultaten visade att det är fullt möjligt att gjuta betong med hög kvalitet under vatten. Antiurvaskningsmedel användes ej.
- Vägverket utförde tillsammans med A/S Scancem och Sabema Material AB stor-skaliga tester för undervattensbetong i Göteborgs hamn under 1986. Resultaten visade att AUV-modifierad betong lämpar sig väl till undervattensgjutna armerade betongkonstruktioner som ständigt hålls under vatten [6]. Provtagning gjordes även av frostbeständigheten (saltvatten) för utborrade betongcylindrar (SS 13 72 25³), varvid det konstaterades att proverna inte uppfyllde villkoren för frostbeständighet enligt Svensk Standard.
- Cementa gjorde 1990 jämförelseprovning av AUV-medlen Hydrocem och Rescon T⁴ (det förra innehåller silika, vilket gör att det kan uppstå skillnader i egenskaper mellan materialen). Provningsmetoden omfattade bedömning av utfyllnadsegenskaper, sammanhållning samt dess förmåga att motstå urvaskning under vatten. I en andra del genomfördes provningar anpassade efter de förhållanden som rådde vid ombyggnaden av Ölandsbron. Sammanhållningen i vatten liksom utfyllnad i form var mycket god. Gjutning i form under vatten gav tryckhållfasthet om 36 respektive 32 MPa. Frostbeständigheten provades ej.
- Hansson [7] genomförde 1995 en undersökning med två sammansättningar av reparationsbetong. Syftet var att utreda dels vidhäftningen och dess variation vid pågjutning av vertikala ytor under vatten, dels huruvida frostbeständigheten för betong med antiurvaskningsmedel kan förbättras genom att använda låga vatten-cementtal och/eller genom att tillsätta silika. Sammanfattningsvis visar resultaten att frostbeständigheten genom att dessa åtgärder kan förbättras betydligt. Frostbeständigheten bedöms ha förbättrats till en nivå som är tillräcklig vid en praktisk situation där endast enstaka frostcykler förekommer. Dock har inte kraven i Svensk Standard kunnat innehållas (se vidare avsnitt 5.3).

³ Denna provningsmetod var en "försöksstandard" som numera har övergivits (upphävd 95-03-08).

⁴ PM Cementa 1990-06-25, författare L. Hansson.

2 Användningsområden

2.1 Nygjutning

En omfattande användning av AUV-betong sker idag vid anläggningsarbeten på stora offshorekonstruktioner. Kansai International Airport och Akashi Straight Bridge är två aktuella exempel från Japan [8]. AUV-betong används i de här fallen endast för de konstruktionsdelar som befinner sig permanent under vatten. Den dåliga frostbeständigheten gör att man i anslutning till vattenlinjen, och ovan denna, använder sig av andra betongkvaliteter. I Sverige används betong med AUV-tillsatser för närvarande främst vid nybyggnation av broar över vattendrag (de delar som finns under vattenytan). De krav som skall vara uppfyllda specificeras i Vägverkets Bro 94 (eftersom gjutning av undervattensbetong som regel endast är tillåten under vatten så förekommer det inga specifika krav på frostbeständighet).

Andra användningsområden för AUV-betong vid nygjutning kan vara vid uppförande av vattenkraftskonstruktioner samt vid konstruktion av slitsmurar på stora grundläggningsdjup.

2.2 Reparationsgjutning

Om en skada har uppstått under vatten kan reparationen utföras antingen genom att det skadade partiet torrläggs med hjälp av kassuner eller fångdammar eller genom att vattennivån i magasinet avsänks. Faktorer som talar emot torrläggning är att åtgärden blir kostsam, i vissa fall överstigs kostnaden för själva reparationsarbetet [9], och att en avsänkning kan leda till sättningsproblem.

Det är således ur flera synpunkter fördelaktigt om reparationsarbetet kan utföras under vatten. Ett flertal olika metoder finns att tillgå, men utan att bakomliggande skadeorsak har fastställts går det inte att peka ut en specifik reparationsmetod som kan användas över lag. I sådana fall där skadan inte förväntas återupprepas kan undervattensgjutning med ny betong vara en mycket attraktiv metod [2][7].

En viktig begränsning för reparationsgjutningar är att de i dagsläget i regel endast tillåts utföras på konstruktionsdelar som inte är frostutsatta. Undantag finns dock. I Kanada utfördes 1997 en gjutning med AUV-betong i samband med reparationsarbeten på en skadad slusskonstruktion [3]. Speciella omständigheter i form av begränsad tillgänglig tid för att utföra reparationsarbetet gjorde att valet föll på AUV-betong. Tester efter utförandet visade att betongen i detta fallet väl uppfyllde de krav som ställdes på den fuktbelastade frostutsatta betongen, till exempel var avståndsfaktorn väl under ställda rekommendationer och betongens luftporsystem var även i övrigt tillfredsställande⁵.

⁵ Avståndsfaktorn varierade mellan 0.135 och 0.160 mm, den specifika ytan varierade mellan 27.1 och 36.1 mm⁻¹ och lufthalten varierade mellan 5 och 8 %. Se vidare under avsnitt 4.3.

2.3 Övrigt

Försök har genomförts i USA med att gjuta in radioaktivt avfall som förvaras i vattenfyllda underjordiska konstruktioner [10]. Vid lagring av avfallet på medellång sikt krävs att det gjuts in, men eftersom det omgivande vattnet är kontaminerat så måste detta tas om hand. Vatten som pumpas bort kommer till viss del att ersättas genom tillrinning av nytt grundvatten. En minimering av kontaminerat vatten erhålls om man samtidigt med gjutning under vatten tar omhand överskottsvatten från displacement. Antiurvaskningsmedel har använts för att säkerställa kvaliteten på gjutmaterialet. Denna typ av gjutningar hänförs till s.k. "controlled low-strength materials", i vilka AUV-medel många gånger har en viktig funktion.

I vibreringsfri betong kan AUV-medel användas för att förhindra vattenseparation och stenseparation genom att betongblandningen erhåller goda flytegenskaper och bra kohesionsegenskaper [11]. Ytterligare ett användningsområde för AUV-medel är som ingående del i de injekteringsmedel som används för injektering av rör för spännkablar. Tillsatsen säkerställer att en god kringflytning mot kablarna erhålls [2].

AUV-medel har även använts som tillsatsmedel i sprutbetongblandningar i sådana fall där sprutbetong använts för reparationsarbeten. Tjockare påslag kan därmed appliceras utan risk för att betongen faller ned.

2.4 Potential

Om de negativa frostegenskaperna kan förbättras, eller om mekanismerna kan förstås på ett bättre sätt än vad som är fallet i dagsläget, så finns det potential till att kunna åstadkomma stora kostnadsbesparingar vid både ny- och reparationsgjutningar. Den största vinsten erhålls genom att säkerheten mot misslyckade undervattensgjutningar ökas.

3 Materialmässiga aspekter

3.1 Cement

Betongblandningar för undervattensbetong innehåller omkring 400 kg cement per kubikmeter. Om vattencementtalet (vct) hålls lågt uppnås ett flertal fördelaktiga egenskaper:

1. Betongens porositet minskar. Den kapillära sugningen för enskilda porer blir liten med långsam vattenabsorption som följd och därmed små mängder frysbart vatten [12].
2. Mer gynnsamt luftporsystem.
3. Mindre vattenseparation.

En nackdel som följer med ett högt cementinnehåll är att den färdiga betongens nötningsbeständighet försämras [12]. Vidare medför hög cementshalt stor värmeutveckling då betongen hårdnar med påföljande risk för uppkomst av temperatursprickor. Det finns således motstridiga krav på betongens egenskaper. Genom att använda olika typer av tillsatsmedel och ersättningsmaterial går det dock att på olika sätt förbättra den färdiga betongens egenskaper.

En annan aspekt på cement som i sammanhanget är av betydelse är att vissa typer ger mycket gynnsammare luftporsystem än andra [13]. Svenskt anläggningscement anses i detta avseende ha bra egenskaper.

3.2 Antiurvaskningsmedel

Nagataki [14] definierar antiurvaskningsmedel enligt:

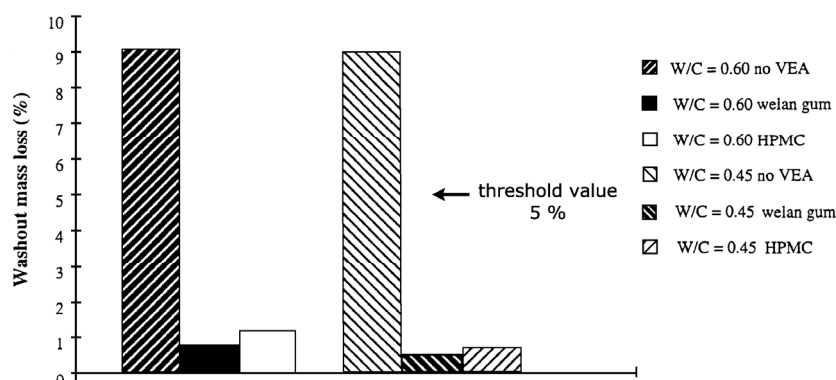
”Antiwashout admixtures for underwater concreting reduce segregation of the concrete due to increasing cohesiveness”.

I Figur 1 visas ett exempel på den stora skillnad som uppnås i mängden urvaskat finmaterial då ett AUV-medel används. Det finns ett flertal olika typer av antiurvaskningsmedel – de som används idag består i regel av vattenlösliga polymer vilka kan delas in i tre huvudgrupper [11][15]:

- Naturliga polymerer. Ett produktexempel är polysackariden ”welan gum” vilken framställs genom kontrollerad aerobisk jäsning.
- Semisyntetiska polymerer, ofta cellulosa-eterderivat. Några produktexempel är HEC, HEMC och HPMC.
- Syntetiska polymerer (etylenbaserade). Exempel: *Polyacrylamid*.

Som framgår av Tabell 1 förefaller marknaden domineras av de cellulosabaserade medlen. I litteraturen förekommer även ett flertal referenser till akrylbaserade

polymerer [16][17]. Welan gum finns representerat i senare års vetenskapliga publikationer.



Figur 1. Urvaskning för färsk betong som testats i ett s.k. ”fall-through-water”-test⁶. Diagrammet visar resultatet från tre olika blandningar som gjutits vid vct 0.60 respektive 0.45. De två olika antiutvaskningsmedel som används är welan gum respektive HPMC (efter [21]). Både [14] och [21] använder 5 % som gräns för maximalt tillåten urvaskning.

Tabell 1. Exempel på kommersiellt tillgängliga AUV-medel (enligt uppgifter tillgängliga i litteraturen – vissa uppgifter saknas dock).

BAS	SPECIFIK PRODUKT	TILLVERKARE
Cellulosa	Rheomac UW 450 (MBT hydrogel ?)	Master Builders Inc. (USA)
?	Rescon T	Rescon A/S (Norge)
Cellulosa	Celbex 208	Fosroc
?	Neptun	Lohja (Finland)
?	Sikament 100 SC; 300SC	Sika AG (Schweiz)
Welan-gum	Kelco-crete	Celco Company
?	Hydrocem	A/S Scancem (Sverige/Danmark)

Den funktion som ett AUV-medel har på betongmassan beror förutom av typ också på den koncentration som används. För cellulosaderivat gäller att cellulosaens långa molekyler bildar en gel mellan kornen i finmaterial och cement och på så sätt ökar sammanhållningen dem emellan [13]. Motsvarande kemiska bindningar är aktiva i fallet med welan gum [2]. Den extrema seghet som uppnås beskrivs av [18] som att:

”T-betong ikke kan betegnes som støpevennlig. Den beveger seg i sitt eget tempo, nærmest uansett ytre påverking. Betongen renner ikke ut av en tobb, den kryper”.

⁶ Urvaskningstest för bestämning av relativ förlust av cementpasta vid exponering av stora mängder vatten. Vid provning placeras betongblandningen i en metallnåtsbehållare. Behållaren får därefter falla ner genom en vattenpelare. Försöket utförs tre gånger; efter varje tillfälle bestäms massförlusten.

Khayat [11] förklarar detta med att den skenbara viskositeten ökar vid låga skjuvhastigheter till följd av att polymerkedjorna, beroende på koncentration, kopplas eller trasslas samman. Om skjuvhastigheten ökas genom pumpning eller konsolidering så kan de hopkopplade polymerkedjorna brytas upp på nytt och börja att samverka i betongmassans flödesriktning - därigenom erhålls en återgång till en lägre skenbar viskositet. AUV-betong har mycket bra kringflytande egenskaper, vilket framgår av sättmättet. Detta ökar gradvis under ca 10 minuter och når ett slutmått på 230-260 mm [14].

Doseringen av AUV-medel görs i regel motsvarande 1 – 1.5 viktprocent av blandningens vattenmängd [19], och tillsätts i blandaren samtidigt med cement, ballast och vatten [14]. Blandningsförfarandet, i de fall som en luftporbildare används, har dock visat sig ha en betydelsefull inverkan på betongens luftporsystem (se vidare under avsnitt 5.4). Ramashandran [19] anger att det minsta vct som bör användas är 0.36 – 0.40. Lägre värden än så förekommer dock i de tester som sammanfattas i Kapitel 5.

3.3 Andra tillsatsmedel än AUV

Tillsatsmedel har sin funktion i cementpastan eftersom ballastmaterialets negativa eller positiva funktion i de allra flesta fall inte direkt kan påverkas. De tillsatsmedel som främst används i AUV-betong är flytmedel (vattenreducerare), luftporbildare, samt skumdämpare.

Flytmedel

För att erhålla goda flytegenskaper är det vanligt med tillsats av ett flytmedel (vattenreducerande medel). Eftersom vissa flytmedelstyper och AUV-medel inte fungerar bra tillsammans måste man vara observant på hur dessa kombineras. De kombinationer som listas i Tabell 2 fungerar bra.

Tabell 2 Kombination av AUV-medel och flytmedel som fungerar bra att använda tillsammans [2][20].

Antiurvaskningsmedel (Bas)		Flytmedel (Bas)
Cellulosa	↔	Melamin
Akryl	↔	Naftalen
Akryl	↔	Melamin
Akryl	↔	Polykarbonsyra
Welan gum	↔	Ingen rekommendation identifierad

Luftporbildare

Tillsats av luftporbildare är mycket viktigt i all vattenbyggnadsbetong eftersom frostbeständigheten är intimt förknippad med att hårdnad betong har ett bra luftporsystem. I [13] anges att ”all” betong med en lufthalt överstigande 3 % är frostbeständig då den frosttestas med rent vatten. För att få säkerhetsmarginal tillsätts i regel en luftporbildare motsvarande minst 4 % lufthalt. Resultaten som presenteras i Kapitel 5 visar dock att AUV-betong kan vara icke frostbeständig trots att villkoret på 4 % lufthalt är uppfyllt.

Behovet av luftporbildartillsats ökar dramatiskt då AUV-medel används [15]. Som redan nämnts under avsnitt 3.2 så måste man, för att få ett bra luftporsystem, vara observant på blandningsförfarandet då luftporbildaren tillsätts.

Skumdämpare

Flertalet cellulosebaserade AUV-medel har effekten att stora volymer luft innesluts i betongen. För att komma tillrätta med detta kan skumdämpare tillsättas (t.ex. tributylfosfat). Skumdämparens kemiska funktion är att bryta ner redan bildade luftbubblor genom att bryta den stabila struktur som annars finns mellan luft och vatten⁷. Då två luftbubblor kolliderar finns ingen stabilitet kvar utan de kommer att bilda en bubbla. Luftbubblorna kommer att stiga uppåt och till slut lämna betongmassan.

3.4 Tillsatsmaterial

Tillsats av silikastoff kan vara ett sätt att förbättra frostbeständigheten. Detta genom att betongen blir tätare. Silika har vidare en förbättrande effekt på betongs urvaskningsmotstånd – dock inte i samma utsträckning som AUV-medel [21]. En annan positiv effekt är kvalitetsvariationer i den färdiga betongens egenskaper minskar betydligt (se vidare under avsnitt 5.3).

Masugnsslagg är ett annat mineraliskt tillsatsmaterial som har provats tillsammans med AUV-medel i syfte att öka frostbeständigheten (se vidare under avsnitt 5.2). Viss förbättrande effekt har därvid konstaterats.

3.5 Hållfasthet

Resultat från Khayat [11] visar att AUV-betong gjord med welan gum uppnår 90 ± 10 procent av den tryckhållfasthet och 90 procent av den böjdraghållfasthet som gäller för motsvarande blandningar utan AUV-medel. För gjutningar med HPMC är motsvarande värden ca 85 ± 10 och 92 ± 8 procent. Elasticitetsmodulen för AUV-betong, gjord med vct 0.60 och 0.45, uppgick i Khayat's experiment till 92 ± 8 och 85 ± 5 procent av motsvarande värden för kontrollblandningarna.

I den studie som utförts vid Vattenfall Utveckling, som omnämndes under Avsnitt 1.5, uppvisade AUV-betongen ett något bättre resultat än referensbetongen [7]. I studien noterades även en viss minskning i tryckhållfasthet med ökande avstånd från gjutstället.

⁷ Odaterat PM Perstorp Chemitec, författare L-I. Olsson.

3.6 Miljöpåverkan

Utan AUV medför UV-betong att omgivande vattendrag förorenas av det urvaskade materialet. pH-värdet i omgivande vatten i en falltestbehållare sjunker med ökande dosering av AUV-medel [14] – från ca 12 till ca 8-9 (neutraliserande verkan).

3.7 Normkrav

I Vägverkets bronormer fastslås att:

”Undervattensgjuten betong får användas i konstruktionsdelar som är belägna under lägsta medelvattenyta eller lägsta grundvattenyta”.

”Efter särskild utredning får undervattensgjuten betong användas upp till högre nivå om risk för frysning inte föreligger”.

I Tabell 3 sammanfattas några av de krav som ställs i Bro 94 på undervattensgjuten betong. Som jämförelse visas i Tabell 4 ett antal krav i motsvarande Japanska normer, tagna från [14]. Listorna är inte helt jämförbara, men i båda fallen gäller att inga krav på frostbeständighet ställs på utförandet.

Tabell 3. Sammanställning av några av de krav som ställs på undervattensgjuten betong i Sverige. AUV-medels inverkan på betongens egenskaper berörs ej.

Egenskap	Krav
Cementhalt	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$ (om gjutrör används skall cementhalten vara $\geq 400 \text{ kg/m}^3$).
Finmaterialhalt	Ballasten skall innehålla $> 8 \%$ material under 0,25 mm. Lämpligt riktvärde är 10 %.
Sättnått	Skall vara $> 120 \text{ mm}$. Lämpligt sättnått är 150 mm. Vid sättnått över 180 mm är separationsrisken stor, medan sättnått under 120 mm ger en alltför styv betong med hänsyn till flytförmågan.
Frostbeständighet	Inga krav föreligger.
Formar/strömmande vatten	Formar utförs täta och väl stagade så att lugnvatten råder överallt inom dessa vid gjutning ($\leq 2 \text{ m/s}$).
Härdning	Betongytan hålls fuktig och skyddas med värmeisolering under de första 5 dygnen efter gjutning.

Tabell 4. Sammanställning av några av de krav som ställs på undervattensgjuten betong i Japan [14]. Hänsyn har tagits till AUV-medels inverkan på betongens egenskaper.

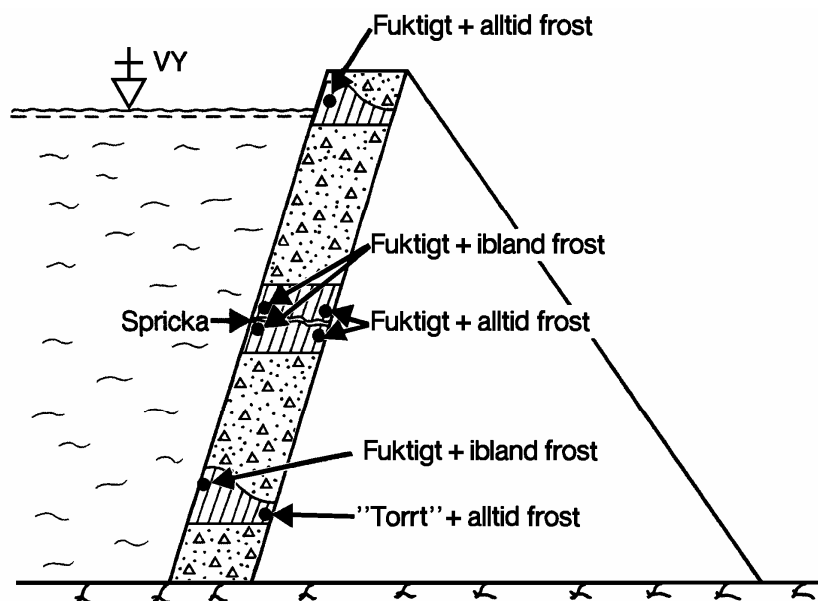
Egenskap	Standardtyp	Retarderad typ
Vattenseparation	< 0.01	< 0.01
Lufthalt	> 4.5 %	> 4.5 %
Förlust i sättmått	< 3.0 cm efter 30 min	< 3.0 cm efter 2 h
Initial tillstyvnadstid	> 5 h	> 18 h
Slutlig tillstyvnadstid	< 24 h	< 48 h
Urvaskningstest	< 50 mg/l (el. < 5 %)	< 50 mg/l
Urvaskningstest (pH)	< 12.0	< 12.0

4 Fuktutsatt betongs frostresistens

4.1 Skador

Den i särklass allvarligaste skada som kan inträffa i normal vattenbyggnadsbetong är frostangrepp [13] och det är ett välkänt faktum att dessa så gott som uteslutande inträffar i konstruktioner som har möjlighet att suga vatten kapillärt [22]. Vattenkraftsanläggningar är därför särskilt utsatta för skador av frost- och nötningspåverkan till följd av långvarig fuktbelastning, ofta under ensidigt tryck, i kombination med upprepade nedfrysnings- och upptiningsperioder. Konstruktioner med vertikalt stående ytor eller som har byggts med betong utan extra luftinblandning hör till dem som är speciellt utsatta [23], t.ex. betong i skvalpzonen eller närmast över en fri vattenyta.

Både nygjutningar och reparationer med undervattensbetong kan således utsättas för frostbelastning om de befins över frostfritt djup. Därtill kan frost uppträda även djupare, t.ex. på uppströmssidan av betongdammar genom att värme transporteras genom dammkroppen (Figur 2). Även i anslutning till vattenförande sprickor genom t.ex. betongdammar kan mycket höga fuktnivåer uppnås samtidigt som frystemperaturerna kan bli mycket låga [13].



Figur 2. Genomskärning av en lamelldamm. De angivna klimatzonerna visar hur frostbelastningen för betongen kan se ut i olika partier av dammen [13].

Frostskador kan uppdelas i två huvudgrupper [13] beroende på om frysning sker med rent vatten (Typ 1) eller med saltvatten (Typ 2):

Typ 1: ”Söndersprängning av betongens inre delar genom att vattenhalten där överskridit den gräns som betongen tål i samband med nedfrysning. Skadorna visar sig i en mer eller mindre kraftig sprickbildning på betongytorna – krackeleringssprickor, eller sprickor som ofta löper parallellt med gjutfogar eller fria betongkanter. Några andra ytskador finns däremot sällan vid denna typ av frostskador. Detta är förrädiskt eftersom man kan ha stora inre skador – hållfasthetsförlust, sprickbildning etc. – utan att man vet om det”.

”Orsakerna till att ytorna till synes inte skadats är att vatten och is där kan ha pressats ur betongen vid frysning. Dessutom är ytorna torrare än inre delar. Detta gäller särskilt sådana partier av utomhuskonstruktioner i vatten vilka omges av luft; t.ex. utskovsväggar, intagstorn, nedströmssidan av dammväggar, fundament i ständig kontakt med grundvatten etc. Ytorna är härvid relativt torra medan det inre är mycket fuktigt”.

Typ 2: ”Avskalning eller gradvis ”bortfrätning” av betongytorna. Skadedjupet kan uppgå till flera centimeter varvid risken för armeringskorrosion blir överhängande. I mindre allvarliga fall har man bara viss avflagning av ett separationssikt. Skadetyper förekommer främst där ytan i samband med frysningen står i kontakt med salthaltigt vatten eller vatten som är förorenat på annat sätt”.

”Skademekanismen är inte helt klarlagd men torde sammanhålla med att ytskikten på grund av saltets inverkan, får mycket höga fuktnivåer”.

Bortfrysning av det allra översta skiktet av betongytan har normalt ingen avgörande betydelse för en betongkonstruktions beständighet⁸ [24]. Skadeutbildning på ytan sker, enligt punkten 2 ovan, främst vid frostprovning med saltvatten. Vid provning med rent vatten sker dock, enligt [25], även en inre nedbrytning parallellt med avflagningen på ytan.

Under de första åren eller decennierna efter det att en betongkonstruktion färdigställts erhålls en gynnsam täthetstillväxt genom att betongen i allmänhet blir tätare och tätare i takt med att cementet fortsätter att hydratisera. Ett negativt förlopp – med avseende på frostbeständigheten - erhålls om betong tar upp vatten under mycket lång tid (decennier). Luftporerna fylls under dessa förhållanden gradvis med vatten genom att luften i dessa löser sig i vattnet och transporteras bort [13].

⁸ Konstaterandet gäller för betong ovan vatten.

4.2 Testmetoder för frostbeständighet

En sammanfattning av ett antal testmetoder för betongs frostbeständighet återfinns i [26]. I de traditionella metoderna utsätts fuktlagrade betongprover för upprepad frysning och tining i luft eller vatten. Skador mäts normalt antingen genom förlust i E-modul, genom kvarstående deformationer hos det upptinade provet, eller genom vikt-förlust. Typiska tester innefattar frysning med rent vatten, t.ex. SS 137216 (Sverige) och ASTM C 666 (USA). Den förra används dock inte längre i Sverige emedan ASTM C 666 är en metod som alltså används i USA och kommer att refereras till senare i detta PM.

Skadorna från provning enligt ASTM C 666 mäts som ändringar i dynamisk E-modul och resultatet presenteras i form av en s.k. beständighetsfaktor (BF). Denna beräknas enligt:

$$BF = \frac{P \cdot N}{M},$$

där:

- P: relativ dynamisk elasticitetsmodul vid N frostcykler (%),
- N: antalet frostcykler varvid P uppnår ett specificerat minsta värde för att avbryta testet (60 %), eller ett specificerat maximalt antal frostcyklar där provningen skall avbrytas (300) - värsta fallet skall användas - och
- M: det specificerade maximalt antal frostcykler där provningen skall avbrytas (300).

I [13] anges att vid en beständighetsfaktor som överstiger 80 % så är betong att betrakta som frostbeständig. En risk med denna metod är dock att stora viktförluster genom ytskador inte nödvändigtvis registreras i E-modulsbestämningen. Det går därför att erhålla acceptabla provningsresultat trots att betongen visuellt sett är skadad [26], vilket även framgår av resultat presenterade i avsnitt 5.4 (försök c). Å andra sidan registrerar inte de avskalningsmätningarna som görs i Svensk Standard (se nedan) eventuella inre skador.

Som framgår av frostskadetyperna i avsnitt 4.1 så medför frysning med rent vatten oftast ett angrepp i betongens inre delar medan ytorna är intakta. Frysning i närvaro av saltvatten däremot sker nästan alltid i form av ett ytangrepp [26]. Den svenska testmetod som vanligtvis används när det gäller att prova frostbeständigheten är SS 137244 vilken innefattar frysning med en 3 % NaCl-lösning (förfarande A) eller med rent vatten (förfarande B). Skadan mäts i form av viktförlust av avflagnat material. Den amerikanska motsvarigheten är ASTM C 672. Några av de parametrar som styr dessa provningsmetoder framgår av Tabell 5. Kvalitativa bedömningar och jämförelser mellan resultat av frysprovningar och betongens beteende i verkligheten visar att en betong med acceptabel frostbeständighet bör ha en maximal avlagad mängd av ca 1 kg/m² efter 56 cykler [26] vid användande av SS 137244.

Tabell 5. Tabell med karakteristika från tre olika frostprovningssmetoder från svensk respektive amerikans standard.

	ASTM C 666 ^a	SS 137244 ^b	ASTM C 672
Förvaring fram till provning	14 dygn i kalk-mättat vatten	7 dygn i vatten följt av 28 dygn i luft, varav de 7 sista i klimatkammare	14 dygn i vatten följt av 14 dygn i luft.
Antal frostcykler	300 ^c	56	50
Temp. spännvidd [°C]	4.4/-17.8/4.4	20/-18/20	23/omgivningens akt. frystemperatur/23
Tidsperioder	1 cykel/2-5 h	1 cykel/24 h	1 cykel/24 h
Frostvätska	Rent vatten	3 % NaCl alt. rent vatten	Saltvatten ^d
Fritt vatten	Nedsänkt i vatten	1 sida	1 sida
Sågad el. gjutytta	Oklart	Båda förekommer	Oklart
Gräns för krav-uppfyllande	Ej specificerat	< 1 kg/m ² (acceptabel ^e)	Visuell klassificering ^f

^a Procedur A: "Rapid freezing and thawing in water".

^b Procedur A: Upprepad frysning och tining i kontakt med 3.0-procentig NaCl-lösning.

^c Eller t.o.m. det att E-modulen uppgår till 60 % av det ursprungliga värdet.

^d 4 g CaCl per 100 ml lösning (annan saltlösning får användas – 3 % NaCl används försöken avsnitt 5.4).

^e Acceptabelt vid förprovning. Vid rutinprovning är kravet < 0.5 kg/m³.

^f Femgradig skala, där noll motsvaras av ingen avskalning och fem av allvarig avskalning (grov ballast synlig över hela ytan).

4.3 Generella skademekanismer

Vattenmättnadsgraden har ett kritiskt inflytande på betongs frostbeständighet. Torr betong kan stå emot upprepade frost- och upptiningscykler utan att påverkas, medan motsvarande vattenmättad betong kan komma att brytas ned efter ett fåtal cykler trots förekomst av luftporer. Krus [25] diskuterar fysiken som leder fram till brott:

"För att förklara varför cementpastan i betongen fryser sönder har ett flertal hypoteser framlagts. I dag baserar sig forskningen i Sverige i huvudsak på en modell som Powers presenterade 1949⁹. Modellen innebär att vattnet i cementpastans grövsta porer först fryser till is då temperaturen sjunker¹⁰. Det frusna vattnet ökar därmed sin volym med 9 %. På grund av volymökningen tvingas vatten i den nybildade iskroppens närhet bort från frysplatsen genom cementpastans finare porer. Detta ger upphov till ett hydrauliskt tryck i cementpastan. Hur stort trycket blir är beroende på hur långt det är till närmast luftinnehållande por som kan

⁹ I engelskan går denna modell under beteckningen "the hydraulic pressure model".

¹⁰ Antagandet att en liten luftpor alltid vattenfylls innan en större luftpor är visserligen termodynamiskt rimligt men kan icke desto mindre vara felaktigt i många fall [29].

ackumulera det borttvingade vattnet. Enligt denna modell, som i Sverige anses vara den som bäst stämmer med verkligheten vid frysning i rent vatten, orsakas alltså frysskadorna i betongen genom att vatten med stor kraft pressas från frysstället. Då det övertryck som uppstår inuti porsystemet överskrider betongens draghållfasthet ändrar porsystemet struktur samtidigt som inre sprickbildningar uppträder. [...] Mekanismen hydrauliskt tryck verkar företrädesvis vid grövre cementpastastrukturer (främst beroende på höga vattencementtal) med mycket vatten och vid snabba temperaturvariationer¹¹.”

Av resonemanget i den modell som beskrivs ovan framgår att påfrestningarna på betongen minskar med minskande avstånd mellan de luftfyllda porerna. Frostbeständigheten ökar därför med ökande lufthalt och med minskande storlek hos luftporerna [27]. En annan modell, som enligt Krus [25] har vunnit stort gehör vid nedbrytning i vatten, utgår från en analogi som görs med tjälning i vissa jordarter (även denna modell har presenterats av Powers¹²). Modellen anses i Sverige främst vara aktuell då frysning sker i salthaltig miljö, eller då cementpastan är mycket tät och temperaturen ändras långsamt. Krus sammanfattar:

”Det första stället där iskroppar bildas är i cementpastans grövsta vattenfyllda porer. Då vattnet i dessa porer fryser ökas koncentrationen av salter och alkali i den ofrusna porlösningen i iskropparnas närhet. Den koncentrationsgradient som därmed uppstår i porlösningen innebär att ofruset vatten från finare porer, där porlösningen ännu ej frusit, vandrar mot iskroppen. Härvid uppstår ett osmotiskt tryck vilket även detta anses kunna orsaka svällningar och intern nedbrytning av betongen. Då vattnet når fram till iskroppen fryser det varvid iskroppen växer. Efter att iskroppen fyllt ut hela poren börjar den utöva ett tryck mot porväggen. Frostskadorna inträffar då iskropparnas tryck överskrider betongens draghållfasthet.”

I avsnitt 3.3 angavs att en lufthalt om 4 % medför frostbeständig betong. Lufthalten i sig säger dock inget om betongens luftporsystem. För att karakterisera luftporsystemet krävs vissa värden framtagna ur planslips- eller tunnslipsanalys. Vid denna mäts avståndsfaktor och specifik yta där den förra mäts som avståndet mellan enskilda luftporer. McLeish [12] anger att en betong som har en avståndsfaktor om 0.2 – 0.25 mm anses ge ett fullgott skydd mot frostsador. American Concrete Institutes (ACI) riktlinjer sätter samma gräns till < 0.2 mm [28]. Kunskapen om den verkliga kritiska avståndsfaktorn hos olika betongtyper är dock mycket bristfällig [29]. Även om avståndsfaktorn överstiger 0.2 mm så kan – beroende på cementtyp, typ av och koncentration av tillsatsmedel, vct, etc. – frostbeständigheten vara god (speciellt vid provning

¹¹ Det råder delade meningar om huruvida snabba temperaturvariationer har betydelse för frostbeständigheten. I [26] anses det inte troligt att så är fallet. Däremot har, eftersom vattnets fryspunkt sjunker med minskande porstorlek, den lägsta nedfrysningstemperaturen stor betydelse.

¹² I engelskan går denna modell under beteckningen ”the osmotic pressure model”.

med rent vatten) [11]. Av Figur 7 och Figur 12 i Kapitel 5 framgår att antagandet om avståndsfaktorn under vissa omständigheter kan ha giltighet även för AUV-betong (i de fall testet genomförts med rent vatten). För porernas specifika yta krävs i ACI:s riktlinjer att denna skall vara större än 24 mm^{-1} [28]

Den volym vatten som kan finnas i betongens porstruktur utan att frysning orsakar så stora spänningar att brott uppnås kallas *den kritiska mättnadsgraden*. Fagerlund [29] förklarar detta med att en betong som är så fullständigt fuktisolerad att ett fuktutbyte mellan betongen och omgivningen är omöjlig under frysnings- och upptiningscykler kan påvisas ha ett kritiskt fuktillstånd vilket kan uttryckas som en kritisk vattenmättnadsgrad¹³. I det fall som vatteninnehållet stiger över den kritiska vattenmättnadsgraden så kommer all betong att frysa sönder under en enda frostcykel¹⁴ (Figur 3).

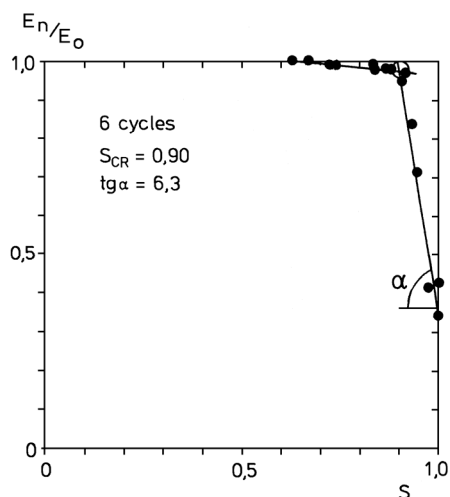
Härdningsbetingelserna för undervattensbetong som gjuts under vatten är naturligtvis givna, men för sådan betong som finns i anslutning till vattenlinjen kan omständigheterna för härdningen behöva beaktas. Enligt Andersson och Petersson [24] verkar dock härdningssättets inverkan på betongs frostbeständighet ha en förvånansvärt liten betydelse. Resultat från en försöksserie vid Statens Provningsanstalt (SP) visar att ett lågt vct och fri tillgång till vatten under härdningen ger en ”vattentät” betong [30]. Vidare visar SP:s försöksresultat att betong som utsätts för nederbörd under den tid som härdning pågår, i detta fallet ett eller tre års exponering, erhåller en påtagligt förbättrad vattentäthet. Förklaringen till att så sker anges vara att förhållandena medför att porfyllnadsgraden blir hög vilket i sin tur skapar betingelser som är gynnsamma för härdningen.

Till följd av minskningen i vattenseparation erhåller betong med inblandning av AUV-medel en ökad känslighet/mottaglighet för plastiska krympsprickor. Detta betyder att speciell hänsyn måste tas så att erforderlig härdning uppnås och åtgärder vidtas för att förhindra avdunstning från exponerade ytor [2].

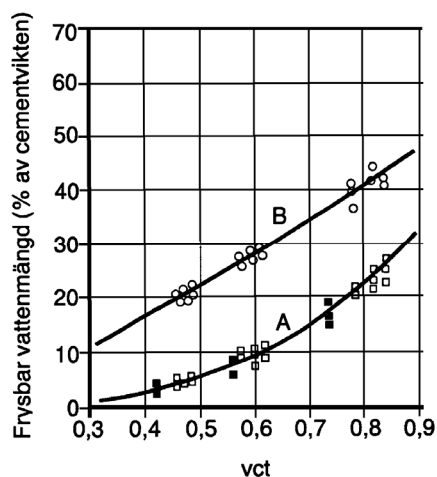
Det är mycket viktigt för en betongs frostbeständighet att den ges möjlighet att torka ut något innan den utsätts för frost för första gången. En betong som har legat i vatten under en månad och sedan frystestats har mycket lägre frostbeständighet än motsvarande betong som lagrats bara något dygn i vatten och sedan torkat [13]. Detta innebär att betong som finns i anslutning till vattenlinjen borde vara mer frostbeständig än ständigt vattenmättad betong. Samtidigt är den frysbara mängden vatten de facto mindre i betong som aldrig har torkat ur jämför med betong som har torkat ut och sedan återfuktats (Figur 4). (Även om faktorerna förmodligen inte inverkar i samma omfattning så verkar ju en viss motstridighet föreligga).

¹³ Den kritiska vattenmättnadsgraden måste således vara beroende av temperaturen.

¹⁴ I normala fall innebär varje fryscykel en viss vattenhaltsökning [22].



Figur 3. Exempel på bestämning av kritisk vattenmättnadsgrad, S_{cr} [22]. I detta exempel uppstår så gott som inga skador förrän vattenmättnadsgraden överstiger 0.90; redan ett mycket litet överskridande av $S=0.90$ ger avsevärda skador. Skadans omfattning (E_n/E_0) kan bestämmas utifrån räta linjens ekvation; i det här fallet $E_n/E_0 = -6.3S + 6.67$.



Figur 4. Frysbar mängd vatten hos betong vid $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kurvan A representerar betong som aldrig har kunnat torka, t.ex. betong som ständigt är under vattenytan. Kurvan B gäller för betong som torkat och sedan återfuktats, t.ex. ytpartier på betongkonstruktioner över vattenytan [13].

5 Genomgång av publicerade försöksresultat. Frostresistens av AUV-betong

I detta kapitel sammanfattas resultat från laborieförsök, med koppling till AUV-betongs frostresistens, som har publicerats i artiklar och rapporter under perioden 1991-1998.

5.1 Fukuoka University, Japan, 1991 [31].

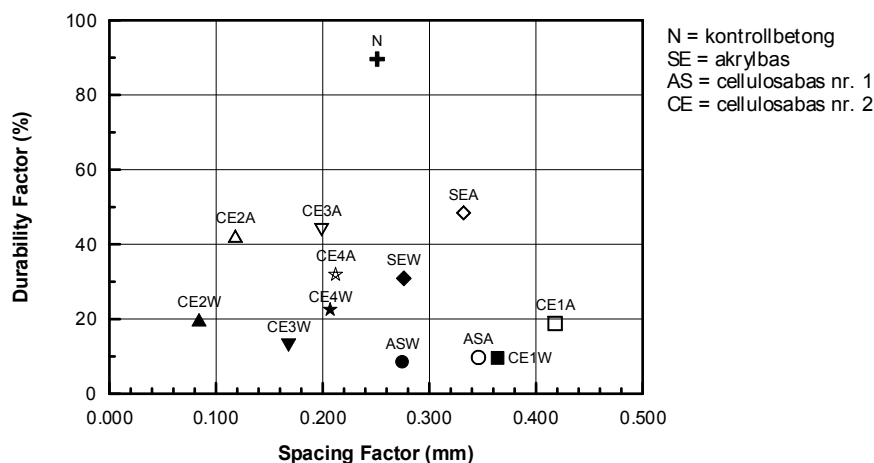
Artikeln utgör ett av de första försöken till att utreda AUV-betongs frostbeständighet. Studiens syfte är att prova frostbeständigheten för två cellulosabaserade och ett akrylbaserat AUV-medel i blandningar vars lufthalt varieras mellan 4 och 9 procent. Vattencementtalet hölls konstant vid 0.45 för samtliga blandningar. Prover gjöts både i luft och i vatten för respektive blandning samt en kontrollblandning utan AUV-medel, och provning utfördes enligt ASTM 666 (procedur A). Ytterligare specifikationer framgår av Tabell 6.

Tabell 6. Materialspecifikation för frostbeständighetsprovning vid Fukuoka University 1991.

MATERIAL	PRODUKT
Cement	Ordinärt Portlandcement (JIS standard)
Ballast:	Stenkross (amfibolit) och marin sand, stenmax 20 mm
AUV (1)	Cellulosabaserad (referat görs till beteckningen AS)
AUV (2)	Cellulosabaserad (referat görs till beteckningen CE)
AUV (3)	Polyakrylamidtyp (referat görs till beteckningen SE)
Flytmedel	Ej specificerad typ
Vattenreduceringsmedel	Ej specificerad typ
Luftporbildare	Ej specificerad typ

I Figur 5 visas beständighetsfaktorn, framtagen från frostprovning, som funktion av respektive blandnings avståndsfaktor. Frostbeständigheten är dålig för samtliga blandningar utom kontrollblandningen, detta trots att avståndsfaktorn för blandningarna CE2W och CE2A är lägre (84 mm respektive 118 mm) än vad som i allmänhet betraktas som gräns för god frostbeständighet. För dessa två blandningar var dock lufthalten mycket hög (9 %). Av Figur 5 framgår också att de prover som har gjutits under vatten har fått en sämre frostbeständighet än motsvarande gjutning i luft. Polyakrylamid uppvisar en något bättre frostbeständighet jämfört med de cellulosabaserade AUV-medlen.

Författarna föreslår att den dåliga frostbeständigheten beror på att det bildas höga osmotiska tryck i porerna. Detta tryck uppkommer då porvattnets salthalt ökar allteftersom islinser växer till. En tryckskillnad kommer att bildas i riktning mot den kapillär poren samtidigt som vatten pressas ut ur poren.



Figur 5. Beständighetsfaktorer som funktion av avståndsfaktorer från frostprovning av 6 betongblandningar med olika AUV-medel (2 gjutningar för varje blandning) och en blandning med kontrollbetong. Proverna har gjutits både i vatten och i luft. Provningsmetoden har utförts enligt metod ASTM C 666. V_{et} har hållits konstant till 0.45.

5.2 Technical Research Center, HAZAMA Corp. Japan, 1992 [8].

Syfte med denna undersökning har varit att undersöka frostbeständigheten för under-vattensbetong som innehåller både AUV-medel och tillsatsmaterial (två typer av masugnsslagg). Slagginblandningen varierades mellan 0, 30 och 50 %. Vattenbindemedels-talet (vbt) hölls konstant vid 0.55 och lufthalten hölls till 5 ± 1 %. Totalt göts 8 prover med normal betong och 7 prover med AUV-betong. Som provningsmetod användes ASTM C 666 (procedur A). Även betongprovernas avståndsfaktorer undersöktes. Ytterligare specifikationer framgår av Tabell 7.

Tabell 7. Materialspecifikation för frostbeständighetsprovning vid Hazama Corporation, 1992.

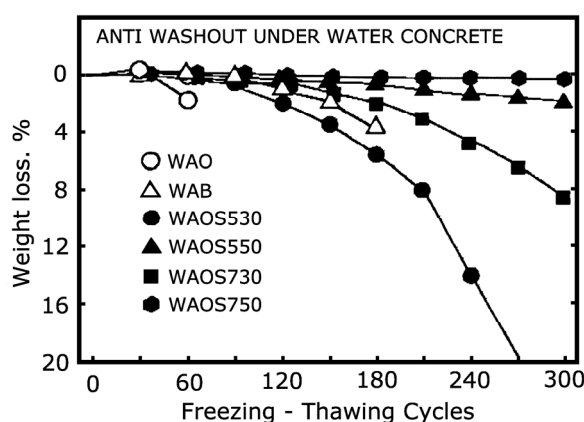
MATERIAL	PRODUKT
Cement (1)	Ordinärt Portlandcement
Cement (2)	Portland masugnsslaggcement
Ballast:	Stenkross/flodsand, stenmax 20 mm.
Masugnsslagg (1)	Specifik yta 500 m ² /kg
Masugnsslagg (2)	Specifik yta 700 m ² /kg
AUV-medel	Cellulosabaserad
Luftporbildare	Hydroxylated polymer/kalciumlignosulfonat
Flytmedel	Melaminbaserad

Resultatet från provningen av frostbeständigheten för AUV-betongen visas i Figur 6. Eftersom resultatet är angivet i procent viktförlust så är skadan svår att kvantifiera. Klart är att frostbeständigheten för proverna med ordinärt Portlandcement respektive slaggcement är dålig, liksom den är dålig för de prover vars slagginblandning är 30 %.

Vid 50 % slagginblandning så ökar frostbeständigheten väsentligt. Detta gäller för båda typerna av slagg, bäst resultat uppnås med 50 % inblandning av det slaggmateriel som har högst specifik yta ($700 \text{ m}^2/\text{kg}$). Beständighetsfaktorn som funktion av betongprovernas avståndsfaktor visas i Figur 7. Det framgår här att frostbeständigheten är otillfredsställande även för de blandningar som står för de bästa av resultaten i Figur 6¹⁵.

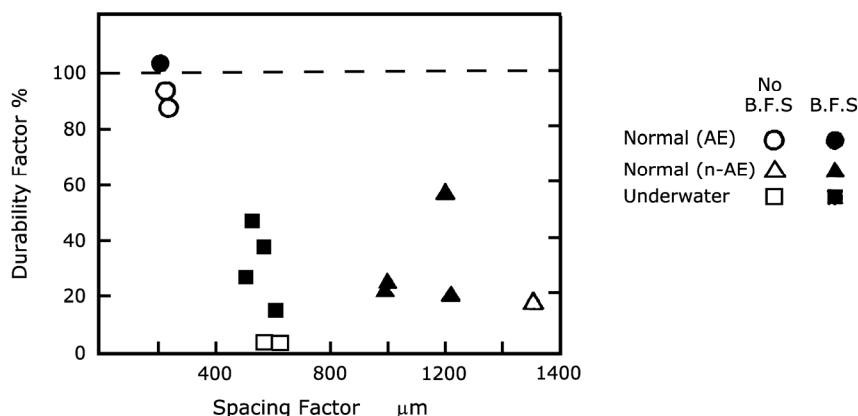
För normal betong var avståndsfaktorn i storleksordning ner mot $0.215 - 0.235 \text{ mm}$, medan den för AUV-betong som minst var i storleksordningen 0.500 mm . Vidare visade undersökningen att den normala betongens luftporsystem hade ett stort antal porer med volym mindre än $100 \mu\text{m}$. För AUV-betongen var antalet porer i den storleken litet – detta trots att luftporbildare användes. Antalet luftporer i storleksordningen flera $100 \mu\text{m}$ var däremot stort.

Författarna förklarar det dåliga luftporsystemet för AUV-betong med att den höga viskositeten tenderare att underlätta inkapsling av luft. Detta skulle betyda att en av de mer betydelsefulla orsakerna till att AUV-betong har dålig frostbeständighet är att luftporsystemet domineras av större porer än normal betong. Samtidigt poängteras att även om avståndsfaktorerna för AUV-betong som gjutits med luftporbildande tillsatsmedel är mindre än för motsvarande blandning utan luftporbildare, så är frostbeständigheten trots detta bättre i detta senare fallet. Således kan det volymmässigt större porsystemet för AUV-betong inte vara den allenarådande orsaken till den dåliga frostbeständigheten.



Figur 6. Resultatet från frostprovning med rent vatten av kuber som gjutits med AUV-medeltillsats. (Beteckningar: "WA" = anti-washout; "O" = ordinärt Portlandcement; "B" = masugnsslaggcement; "S530" = 30 % slagg av typ $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ specifik yta). Resultatet visas som avskalad mängd material som funktion av antalet frostcykler.

¹⁵ Inblandning av mineraliska tillsatsmaterial – särskilt masugnsslagg – kan innebära att luftporsystemet vattenfylls snabbt. Vid en slagghalt av 65 % har inte mindre än 80 % av alla luftporer vattenfyllets efter ett år trots att vct är lågt [13].



Figur 7. Beständighetsfaktorer som funktion av avståndsfaktorer från provning av normal betong med respektive utan luftporbildare, samt av AUV-betong (med luftporbildare). Provningsen har utförts enligt metod ASTM C 666. AUV-betong erhöll högst beständighetsfaktor (47 %) för blandningen med 50 % slaggtillsats av typen med 700 m²/kg specifik yta.

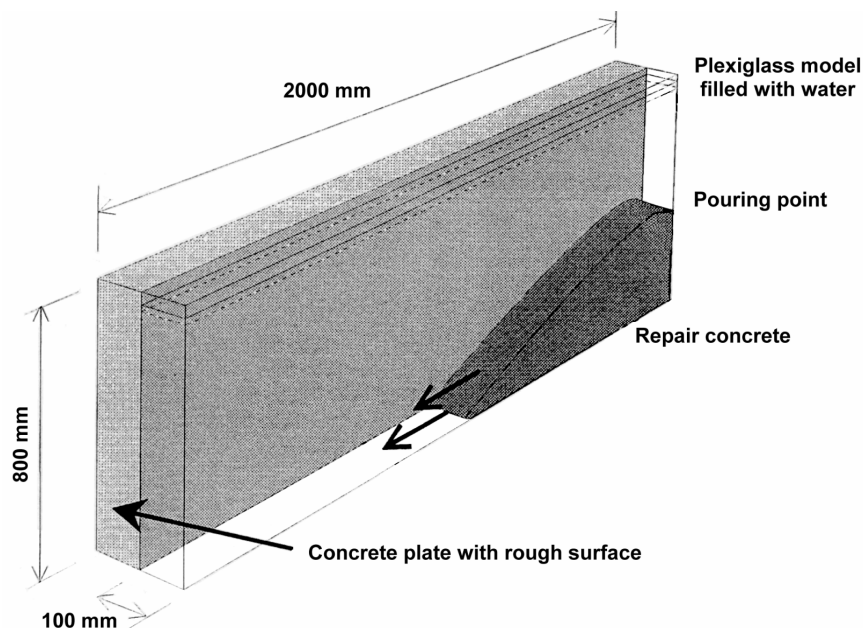
5.3 Betongteknik, Vattenfall Utveckling AB, 1995 [7][32].

Laboratorieundersökningar har genomförts med två sammansättningar av reparationsbetong, med respektive utan inblandning av antiurvaskningsmedel (Tabell 8). Syftet har varit att undersöka dels vidhäftningen och dess variation vid pågjutning av vertikala ytor under vatten (försök a), dels huruvida frostbeständigheten för betong med antiurvaskningsmedel kan förbättras genom att använda låga vattencementtal och/eller genom att tillsätta silika (försök b). För frostbeständighetsprovningsen användes tre olika metoder baserade på SS 137244.

Tabell 8. Materialspecifikation för reparationsbetong.

BESTÅNDSDEL	MÄNGD [kg/m ³]
Cement	Anläggningscement (400 kg/m ³)
Ballast	Ballastkurvor enligt anvisningar i Bro 94.
AUV-medel	MBT Hydrogel (1.5 %C)
Flytmedel	Peramin FS (2.0 %C)
Luftporbildare	Ej tillsatt
Silikatillsats	Elkem mikrosilika i pulver

Den gamla betongen bestod av betongskivor med tjockleken 8 cm och ytan 80 × 200 cm. En form med sidor och botten av formplywood samt framsida av plexiglas fästes på betongskivan. Vatten fylldes i den 10 cm breda spalten mellan betongskivan och plexiglasskivan. Principskiss över försöksupställningen visas i Figur 8.



Figur 8. Principskiss över försöksupställning.

Försök a: vidhäftning

Vidhäftningshållfastheten för AUV-betongen uppgick till ca 2 MPa i medel vilket är väl överstigande det krav som ställs i Bro 94 [33]. Referensgjutningen med traditionell undervattensbetong utan AUV gav ett underkänt resultat. Test av tryckhållfastheten gav att AUV-betong även här uppvisar bättre resultat än referensbetongen. AUV-betongen visar därtill en mycket god vattentäthet. Resultatet kan förmodligen förbättras ytterligare med annan proportionering av betongen.

Försök b: frostbeständighet

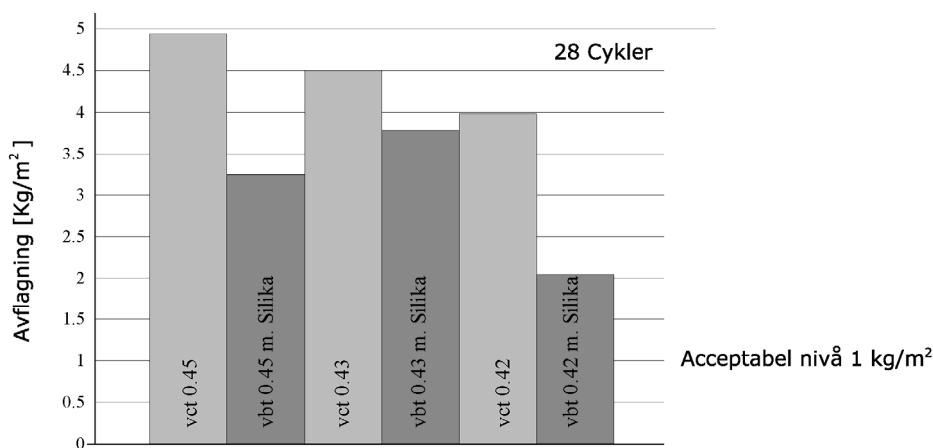
Sex olika blandningar provades, varvid vbt/vct för AUV-betongen hölls till 0.45, 0.43 respektive 0.42 (det senare var det lägsta som kunde åstadkommas med bibehållen gjutbarhet). För varje vct gjordes motsvarande blandning med tillsats av silikastoff. Ingen luftporbildare tillsattes och lufthalten i AUV-betongen blev därför endast 1.5 – 2 %¹⁶. De tre provningsmetoder som användes beskrivs i Tabell 9.

Tabell 9. Provningsmetoder för frostbetsändighet (baserade på SS 137244).

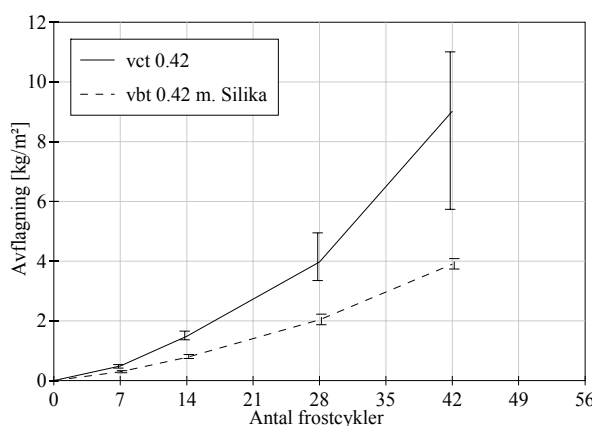
	Metod A	Metod B	Metod C
Frostvätska	3 % NaCl	Rent vatten	Rent vatten
Form	Gjutna kuber	Gjutna kuber	Utborrade kärnor
Härdning	Som standard, utom för vissa prov som förvarades i vatten under hela tiden fram till provning.	I vatten	I vatten
Provyta	Sågad (överyta)	Sågad (alla ytor)	Borrade ändytor
Utvärdering	Avskalad mängd	Okulär besiktning	Okulär besiktning

¹⁶ Så pass låga lufthalter har givit dåliga frostbeständighet i andra försök (se Avsnitt 5.4).

Såväl vbt-sänkning som silikatillsats medför en klart positiv inverkan på frostbetsändigheten (Figur 9). Kraven i Svensk Standard uppnås dock inte. Den ackumulerade avflagningen för sammansättningarna med vbt 0.42 framgår av diagrammet i Figur 10. Diagrammet visar även spridningen mellan högsta och lägsta värde för fyra provkroppar. Både avflagning och spridning i resultat har minskat till följd av silikatillsatsen.



Figur 9. Avflagning vid 28 dygn vid provning enligt SS 137244 med saltlösning (metod A). Anledningen till att inte avflagning vid 56 dygn redovisas är att vissa av proverna med högre vbt frös sönder så att provningen fick avbrytas innan 56 dygn.

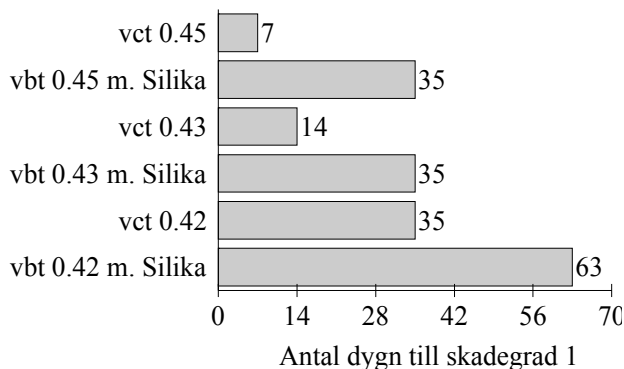


Figur 10. Avflagning vid vbt 0.42 med spridning. Provning enligt SS 137244 med saltlösning (metod A).

Den okulära besiktningen (provningssmetod B och C) kopplades till ett bedömnings-system där provkroppens tillstånd kategoriserades i ett antal skadegrader. Dessa är:

1. Dålig vidhäftning mellan cementpasta och grövre ballastkorn.
2. Delar av provkroppen helt nedbruten.
3. Total nedbrytning.

I Figur 11 sammanställs resultaten från den okulära besiktningen i form av antal dygn innan provet uppnått skadegrad 1. Även här ses den positiva inverkan av vbt-sänkning och silikatillsats. Ett positivt resultat är att den bästa sammansättningen inte började påvisa skador förrän efter 63 dygn.



Figur 11. Resultat från okulärbesiktning. Provning i sötvatten (metod B och C).

Sammanfattningsvis visar resultaten att frostbeständigheten kan förbättras betydligt genom att dels sänka vct och dels tillsätta silikastoff. Frostbeständigheten bedöms vid dessa åtgärder ha förbättrats till en nivå som är tillräcklig vid en praktisk situation där endast enstaka frostcykler förekommer. Dock har inte kraven i Svensk Standard kunnat innehållas.

Det lägsta vbt som uppnåddes med bibehållen gjutbarhet var 0.42. Att lägre vbt inte var möjligt beror delvis på de krav på ballastsammansättning som finns i Bro 94 och som tillämpas allmänt. Där specificeras att ballasten till en undervattensbetong ska innehålla minst 8 % material under 0.25 mm. Ett lägre vbt kan åstadkommas om finmaterialkraven sänkts eller om beräkningssättet formuleras om så att även cementet räknas in i finmaterialhalten enligt norsk modell.

5.4 Université de Sherbrooke, Kanada, 1995 [15].

Författaren konstaterar att de försök som har utförts för att utvärdera AUV-betongs frostbeständighet och motståndskraft mot avflagnings, som finns presenterat i litteraturen, är begränsade och uppvisar motsägande resultat. Syftet med denna studie är kasta nytt ljus över problematiken genom att utvärdera dels blandningsförfarandet för AUV-betong och dess inverkan på luftporssystemet (försök a) dels effekten av AUV-medlen welan gum och HPMC på frostbeständighet samt motståndskraft mot avflagnings för betongblandningar vars vct varieras mellan 0.32 och 0.45. Testen baseras på två amerikanska testprocedurer: ASTM C 666 (försök b) och ASTM C 672 (försök c). Ingående material listas i Tabell 10.

Tabell 10. Materialspecifikation för frostbeständighetsprovning vid Université de Sherbrooke, 1995.

MATERIAL	PRODUKT
Cement	Kanadensiskt portlandcement (354-380 kg/m ³)
Ballast:	Krossad kalksten samt silikasand
Luftporbildare	Syntetisk detergent-baserad
AUV (1) + Flytmedel	Welan gum + naftalen
AUV (2) + Skumbildare + Flytmedel	HPMC + tributylfosfat + melamin

Försök a: blandningsförfarande inverkan på luftporsystemet

Försöket innefattar fyra olika betongblandningar, där varje blandning i sin tur gjordes med luftpormedel tillsats före respektive efter tillsats av flytmedel och AUV-medel (welan gum). Mängden welan gum i blandningarna varierades mellan 0 och 0.15 %. Luftinnehållet i färsk betong var 6 ± 1 % och vct 0.45.

Mikroskopering visade att luftporsystemet för de betongblandningar som saknar AUV-medel förefaller tillsats av luftporbildare resultera i en marginell ökning av luftinnehållet och en viss minskning av avståndsfaktorn.

Samtliga betongblandningar med AUV-medel uppvisade ett bättre luftporsystem då luftporbildaren tillsattes *efter* flytmedel och welan gum, jämfört med då luftporbildaren tillsätts *före* dessa. I det förra fallet minskar både porstorlekar och avståndsfaktorer, men den totala luftvolymen ändras inte.

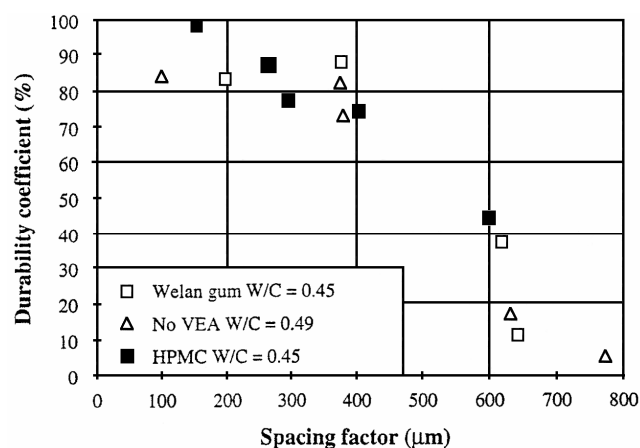
Försök b: frostbetsändighet enligt ASTM C 666.

Försöken genomfördes i det här fallet med betongblandningar med tillsats av welan gum (motsvarande 0.10 % av cementvikten) respektive HPMC (motsvarande 0.26 % av cementvikten). För att ett erhålla optimalt luftporsystem gjordes, i enlighet med resultaten i försök a, inblandningen av luftporbildare *efter* inblandningen av flytmedel och AUV-medel. Vattencementtalet varierades mellan 0.45 och 0.49 och lufthalten varierades mellan 2 och 10 %. Samtliga prover lagrades i kalkmättat vatten från själva formrivningen fram till frostprovningen.

Resultaten från försöket visar att – under förutsättning att betongblandningens luftinnehåll hålls oförändrad – så kan likvärdiga avståndsfaktorer för färdig betong erhållas för betong med respektive utan AUV-medel. Detta gäller oavsett om welan gum eller HPMC används.

Frostbetsändigheten, testad enligt ASTM C 666, blir tillfredsställande för betong med vct om 0.45 till 0.49 för både welan gum och HPMC under förutsättning att avståndsfaktorn understiger 0.400 mm. Den färdiga betongen uppvisar då en beständighetsfaktor som överstiger 75 % (Figur 12). Detta är i samma storleksordning som för motsvarande betong utan tillsatser av antiurvaskningsmedel. Vid ytterligare sänkning av avståndsfaktorn kan beständighetsfaktorn förbättras ännu mera.

Receptet för den bästa respektive sämsta blandningen med welan gum och HPMC i Figur 12 har sammanställts i Tabell 11. Av tabellen framgår att luftporbildartillsats har haft en avgörande inverkan på resultatet genom att förbättra lufthalten, porernas specifika yta och betongens avståndsfaktor.



Figur 12. Betändighetsfaktorer framtagna från tester enligt ASTM C 666 (rent vatten).

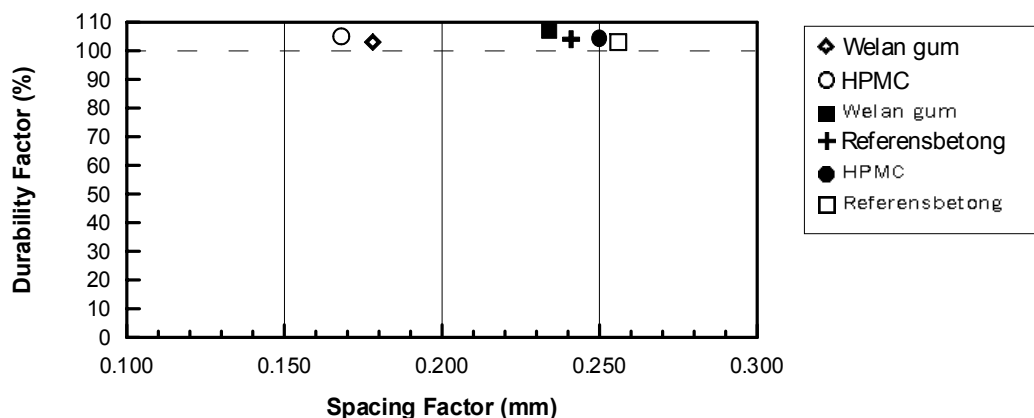
Tabell 11. Materialspecifikation och provningsresultat för de ur frostbeständighetssynpunkt (Figur 12) bästa (B) respektive sämsta (S) betongproverna med AUV-medel.

	HPMC (B)	HPMC (S)	Welan gum (B)	Welan gum (S)
Cement (kg/m ³)	358	374	367	380
Vatten (kg/m ³)	161	168	165	171
Sand (kg/m ³)	746	780	765	791
Grus (kg/m ³)	1035	1081	1061	1097
Luftporbildare (ml/kg cement)	5.57	0	1.10	0
Flytmedel (% av cement)	2.01	1.90	0.98	1.24
AUV (% av cement)	0.26	0.26	0.10	0.10
Skumbildare (ml/m ³)	310	115	0	0
Vct	0.45	0.45	0.45	0.45
Lufthalt - färsk betong (%)	6.5	2.8	4.2	1.9
Sättnått (mm)	190	230	200	190
Hållfasthet, 28 dygn (MPa)	40.8	46.2	46.3	48.3
Lufthalt - hårdnad betong (%)	8.6	2.5	3.7	2.8
Specifik yta (mm ⁻¹)	26.1	12.7	16.2	11.4
Avståndsfaktor (mm)	0.152	0.601	0.378	0.645
Antal cykler	300	254	300	69
Beständighetsfaktor (%)	98	44	88	11

Försök c: Frostbetsändighet enligt ASTM C 672 (3 % NaCl-lösning) respektive ASTM C 666.

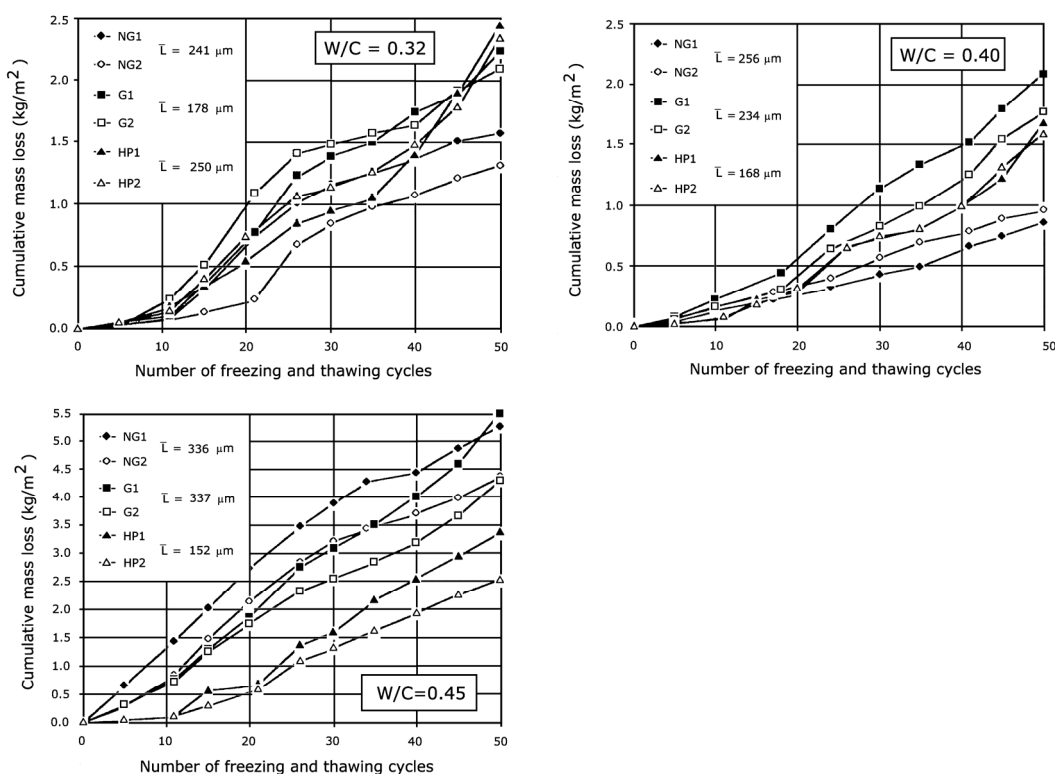
Försöken genomfördes med tillsats av welan gum motsvarande 0.06 – 0.10 % av cementvikten och med HPMC motsvarande 0.08 – 0.26 % av cementvikten. För att ett erhålla optimalt luftporsystem gjordes inblandning av luftporbildare efter flytmedel och AUV-medel. Vattencementtalet hölls till 0.32, 0.40 och 0.45. Gjutningen gjordes med två uppsättningar identiska prover, där den ena uppsättningen användes för provning i rent vatten (prover med vct 0.32 och 0.40) och den andra för provning med saltvatten (prover med vct 0.32, 0.40 och 0.45).

Resultat från provning enligt ASTM C 666 (Figur 13) visar att samtliga blandningar uppvisar mycket god beständighetsfaktor i rent vatten (>100 %). Kravet att avståndsfaktorn skall vara mindre än 250 mm är i samtliga fall uppfyllt. Provningen är i detta fallet densamma som i försök b, men resultaten visar på en klart förbättrad frostbeständighet. Denna förbättring kan förklaras med att vct har sänkts.



Figur 13. Frostprovning i rent vatten ger en mycket god frostbeständighet (ASTM C 666). Vct har hållits till 0.32 respektive 0.40.

Frostbeständigheten i saltvatten är betydligt sämre, vilket framgår av Figur 14. Endast de två referensproverna vid vct 0.40 uppfyller kravet på att maximal avflagad mängd skall vara mindre än 1 kg/m^2 . För övriga prover varierar medelavflagningen (medelvärde av två prover) mellan 1.5 och 4.9 kg/m^2 . Resultaten i Figur 14 visar också att prover med HPMC-tillsats vid vct 0.45 har bättre frostbeständighet än referensproverna (vilket förmodligen kan förklaras med att avståndsfaktorn är betydligt större för referensproverna).



Figur 14. Trots låga avståndsfaktorer så är frostbeständigheten dålig (inga prover klarar 1 kg/m^2).

Författaren för inte någon utförlig diskussion om varför det finns en så pass stor skillnad mellan de båda metoderna. En förklaring som framförs skulle kunna vara att tillsatsen av luftporbildare medför en större koncentration av porer > 0.5 mm och en minskning av andelen porer < 0.3 mm.

5.5 Université de Sherbrooke, Kanada, 1996 [11].

Undersökningen syftar till att bättre förstå hur AUV-medel inverkar på viktiga egenskaper hos betong såsom luftporstorlekar och luftporfördelning. Studien omfattar två provomgångar (med respektive utan luftporbildare). Dessa refereras till nedan som försök a respektive försök b. Vattencementtalet hålls till 0.32, 0.40 och 0.45. Blandningsförfarandet följer rekommendationerna i avsnitt 5.3, d.v.s. luftporbildaren tillsätts före flytmedel och AUV-medel. Frostprovning görs inte.

Tabell 12. Materialspecifikation.

MATERIAL	PRODUKT
Cement	Cement: ASTM Typ II
Ballast:	Naturgrus, flodsand
Luftporbildare	Ej specificerad
AUV (1) + Flytmedel	Welan gum + naftalen
AUV (2) + Skumbildare + Flytmedel	HPMC + alkoholbaserad + melamin

Försök a: UV-betong utan luftporbildartillsats.

Resultaten från försöken pekar på att tillsats av AUV-medel, med samtidig hög flytmedelsdosering, kan medföra en viss eftersläpning i betongens hållfasthetsutveckling och tillstyvnad (speciellt vid låga vct). Författarna anger att orsaken till att så sker till viss del kan bero på den relativt stora luftinneslutning som fås i AUV-betong. Vid hydratiseringen bildas relativt stora porer som en följd av att antiurvaskningsmedlens polymerer klungas samman. Dessutom kan tillförseln av AUV-medel påverka cementhydratiseringens kinetik och uppbyggnaden av hydratiseringsprodukter.

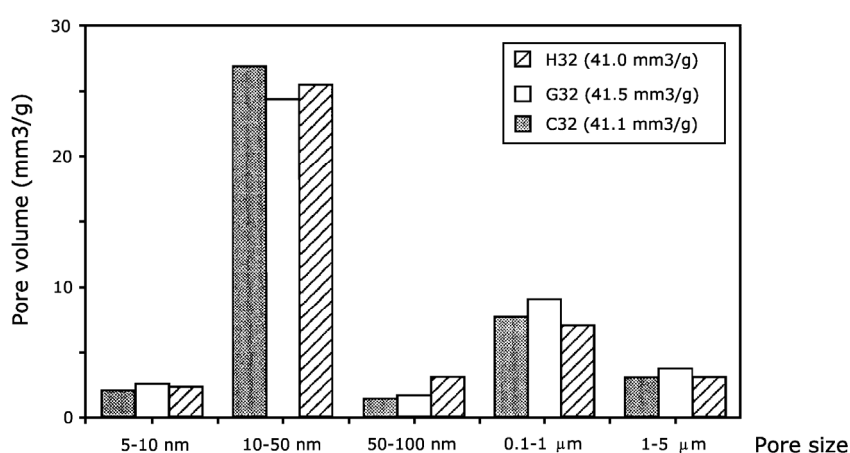
Författarna spekulerar vidare i att AUV-medlen interfererar med hydratiseringen av cement genom att polymererna fixerar delar av processvattnet. Mängden vatten tillgängligt för cementkornens hydratisering minskar i motsvarande omfattning. Vidare kan, då cementpartiklar och antiurvaskningsmedlets polymerkedjor ligger intill varandra, sammanflätning dem emellan medföra att antalet cementpartiklar tillgängliga för hydratisering minskar. Slutligen kan även långa molekyllkedjor av antiurvaskningsmedel komma att adsorberas till cementkornen och därigenom bromsa migreringen av joner från cementkornen till porvattnet, vilket i sin tur påverkar hållfasthets- och tillstyvnadsutvecklingen.

För kunna klargöra hur flytmedel och antiurvaskningsmedel påverkar hydratiseringsförloppet och hydratiseringsprodukterna krävs forstätt forskning.

Försök b: UV-betong med luftporbildartillsats.

Storleken på de kapillära porerna i en väl hydratiserad cementpasta, tillverkad med lågt vct, kan vid tidig hydratisering variera mellan 10 – 50 nm och upp till 5 µm. En ökning i antalet stora kapillära porer (> 50 nm) tros ha en negativ inverkan på betongens hållfasthet och täthet.

I detta försök observerades ingen skillnad i vattenabsorption, total porositet och porstorleksfördelning för prover med vct 0.32 oavsett om AUV-medel tillsatts eller inte (Figur 15). Däremot visade sig AUV-medelstillsats i blandningarna med vct 0.40 respektive 0.45 resultera i en reducering av den totala porvolymen för porer vars diameter är < 100 nm (speciellt för welan gum). För ännu mindre porer erhöles en ökning i den totala porvolymen (speciellt för HPMC).



Figur 15. Porvolymfördelning för vct 0.32.

6 Diskussion

6.1 Material och handhavande

I Tabell 13 nedan listas ett antal faktorer som i olika utsträckning inverkar på undervattensbetongs frostbeständighet. Den fortsatta diskussionen kommer att föras utifrån var och en av dessa faktorer.

Tabell 13. Inverkan av olika parametrar på frostbeständigheten (FB) hos undervattensgjuten betong. Teckenförklaring: ++/- - Starkt gynnsam/ogynnsam inverkan; +/- tydligt gynnsam/ogynnsam inverkan; ± ingen eller obetydlig inverkan.

MATERIAL/ÅTGÄRD	FB	NOTERINGAR
1. Antiurvaskningsmedel	--	Negativ inverkan, speciellt vid provning med saltlösning som frostvätska.
2. Luftporbildare	++	Tillsatsen är nödvändig för att få tillräcklig lufthalt i hårdnad betong.
3. Hög cementhalt	+	Ger tät betong (långsam vattenabsorption och därmed små mängder frysbart vatten, gynnsamt luftporsystem samt mindre vattenseparation). Det finns dock ökad risk för sprickbildning.
4. Flytmedel	±	Det har inte framkommit några uppgifter om att flytmedelstillsats påverkar frostbeständigheten. Vissa kombinationer av luftporbildare och flytmedel kan dock vara olämpliga.
5. Skumdämpare	+	Positiv effekt på luftporsystemet i de fall cellulosa-baserade AUV-medel används.
6. Minskad max kornstorlek	±	Denna aspekt har betydelse för frostbeständigheten, men har ej studerats i försöken i Kapitel 5.
7. Silika	+	Ger minskad avskalning samt minskad spridning i betongens egenskaper.
8. Masugnsslagg	+ (-)	Positiva resultat finns rapporterade, men långtidsvirkverkan är osäker.
9. Lågt vct	++	Positiv inverkan på frostbeständigheten fastlagd.
10. Blandningsförfarande	+	I de fall som luftporbildare tillsätts (d.v.s. alltid) så har blandningsförfarandet betydelse för FB.
11. Liten avståndsfaktor	(+)	Inget entydigt samband med FB finns.
12. Små porer	(+)	Flera forskargrupper spekulerar i att små porer är fördelaktigt för frostbeständigheten.
13. Vattentäthet	(+)	Har betydelse för den tid det tar innan kritisk vattenmättnadsgrad uppnås.
14. Konstant fuktbelastning	-	Avflagningen ökar tiofalt då betongen inte har givits möjlighet att torka ut innan provning.
15a Provning med rent vatten	+	Fullgod frostbeständighet kan uppnås.
15b Provning med saltvatten	-	Fullgod frostbeständighet kan i dagsläget ej uppnås (enligt nuvarande krav i Svensk Standard).

1. Antiurvaskningsmedel

I de undersökningar som har gåtts igenom har det inte framkommit några drastiska skillnader i frostbeständighet mellan undervattensbetong gjuten med olika typer av AUV-medel. Visserligen visar resultaten i Avsnitt 5.1 att polyakrylamid har bättre frostbeständighet än de två typer av cellulosabaserade medel som också testats. Ingetdera av proverna i detta försök kommer dock upp i den höga frostbeständighet som cellulosabaserade AUV-medel uppnår i försök c under Avsnitt 5.4.

De doseringar som har använts är:

Författare	Mängd AUV-medel
Yamato	2.5 – 3.0 kg/m ³
Fukudome	2.3 kg/m ³
Hansson	6.0 kg/m ³
Khayat 95a	0.10 resp. 0.26 % av cementhalten (ca 0.38 – 0.97 kg/m ³)
Khayat 95b-c	0.06 – 0.26 % av cementhalten (ca 0.27 – 0.93 kg/m ³)

Av sammanställningen framgår att Khayat använder mindre doser AUV-medel än vad som varit fallet i övriga undersökningar. Khayat är samtidigt den som har uppnått bäst resultat och det kan därför antagas att doseringen kan ha haft viss betydelse för uppnådda frostbeständigheter.

2. Luftporbildare (Lufthalt)

Ett luftinnehåll om minst 4 % anses ge en frostbeständig betong [13] [12]. För AUV-betong gäller dock att den kan vara icke frostbeständig trots att 4%-villkoret är uppfyllt. Behovet av luftporbildartillsats ökar dramatiskt då AUV-medel används. De doseringar som har använts i försöken i Kapitel 5 är följande:

Författare	Luftporbildare	Lufthalt (hårdnad betong)
Yamato	0 – 22.7 kg/m ³	4.0 – 8.5 %
Fukudome	980 cc/ m ³	4.4 – 5.1 %
Hansson	0 %	Ingen uppgift (färsk btg. 1.5 – 2 %)
Khayat 95a	0 – 6.3 ml/kg cement	2.5 – 9.8 %
Khayat 95b-c	1.08 – 5.57 ml/kg cement	4.0 – 8.6 %

Av sammanställningen framgår att lufthalten i de flesta fall ligger över 4 %. Emellertid redovisar trots detta både Yamato och Fukudome dålig frostbeständighet (vid provning med rent vatten). Lufthalten för den AUV-betong som användes vid reparationsarbeten på den frostutsatta konstruktion som omnämnts tidigare (se Avsnitt 2.2) hade en lufthalt på 5 – 8 %.

De blandningar som Khayat (95a) gjorde utan tillsats av luftporbildare har givit lufthalter för hårdnad betong som ligger under 4 % - dessa prover erhöll låga beständighetsfaktorer (vid provning i rent vatten). Hansson använde inte luftporbildare i sina försök. Frostbeständigheten var dålig både för saltvattenprovning och vid provning med rent vatten. Den låga lufthalten verkar kunna vara en bidragande orsak till detta. Sammanfattningsvis bekräftar resultaten att lufthalten har betydelse för frostbeständigheten. Lufthalten säger dock inget om luftporsystemets uppbyggnad, varför kompletterande krav måste ställas. Khayats resultat visar dock att lufthalten bör ligga över 4 %.

3. Hög cementhalt

För god frostbeständighet krävs i regel relativt stora mängder cement. Rekommendationerna ligger i allmänhet på minimum motsvarande 350 kg [33] eller upp till 400 kg [12] per kubikmeter.

I de rapporterade försöken har följande cementhalter använts:

Författare	Mängd cement
Yamato	350 – 478 kg/m ³
Fukudome	390 kg/m ³ (inklusive tillsatsmaterial)
Hansson	400 kg/m ³ (frostprovkroppar 500 kg/m ³ ?; exkl. silika)
Khayat 95a	351 – 380 kg/m ³
Khayat 95b-c	356 – 448 kg/m ³

Sammanställningen visar att cementhalten i samtliga fall ligger inom de allmänna rekommendationerna. Spridningen i resultat för frostbeständigheten bör därför bero på andra parametrar.

4. Flytmedel

För att erhålla goda flytegenskaper är tillsats av flytmedel nödvändigt och flytmedel har också använts i samtliga försök i Kapitel 5. Man skall emellertid vara observant på att vissa kombinationer av luftporbildare och flytmedel kan vara olämpliga. Inga rapporter har hittats huruvida flytmedel har någon direkt inverkan på frostbeständigheten.

5. Skumdämpare

Cellulosabaserade AUV-medel medför inneslutning av stora mängder luft. Genom att tillsätta skumdämpare kan ett mer fördelaktigt luftporsystem etableras. Tillsatsen har endast använts i Khayats undersökningar, vilket till viss del kan förklara de relativt sett goda resultat som denne har uppnått.

6. Minskad max kornstorlek

För undervattensbetong är det önskvärt med en maximal kornstorlek om 20 mm [12]. För undersökningarna i Kapitel 5 gäller att stenmax har varit:

Författare	Stenmax
Yamato	20 mm
Fukudome	20 mm
Hansson	16 mm
Khayat 95a-c	Ingen uppgift (nominell partikelstorlek 13.2 mm)

Sammanställningen visar att max kornstorlek i samtliga fall ligger inom eller i närheten av de allmänna rekommendationerna. Spridningen i resultat för frostbeständigheten bör därför bero på andra parametrar.

7. Tillsats av silika

Tillsats av silika medför att betongen får ökad täthet. I försöken i Kapitel 5 har silika endast använts av Hansson, men även Khayat framför att tillsats av silika kan leda till en positiv förbättring av undervattenbetongs frostbeständighet.

Hansson använde sig av silikatillsats. Förutom att frostbeständigheten blev märkbart bättre så minskade kvalitetsvariationerna i den färdiga betongens egenskaper betydligt (både avflagning och spridningen i resultat minskar). Frostbeständigheten blev dock inte så pass bra att kraven i nuvarande Svensk Standard kan uppfyllas.

8. Masugnsslagg

Masugnsslaggs förbättrande effekt på frostbeständigheten vid provning med rent vatten har påvisats av Fukudome. Den förbättring som uppnåtts är dock från en mycket låg nivå (BF = 3) till en fortfarande ganska dålig nivå (som bäst BF = 47). Bäst resultat erhöles vid 50 % inblandning av masugnsslagg med hög specifik yta ($700 \text{ m}^2/\text{kg}$). Diskussioner om tillsatsens möjliga positiva egenskaper förs även av Khayat.

Uppgifter i [13] gör gällande att det luftporsystem som etableras med tillsats av masugnsslagg snabbt vattenfylls, vilket gör att långtidseffekten för den uppnådda förbättringen är osäker.

9. Sänkt vattencementtal

Låga vattencementtal ger en betong med låg permeabilitet. Vatteninträngningen minskar således då vct sänks. I de rapporterade försöken har följande vattencementtal använts:

Författare	Vattencementtal (eller vattenbindemedelstal)
Yamato	0.45
Fukudome (vct/vbt)	0.55
Hansson (vct/vbt)	0.42 – 0.45 (sänkt vct ger förbättring av FB)
Khayat 95a	0.45
Khayat 95b-c	0.32 – 0.40 (sänkt vct ger förbättring av FB)

I de fall som vattencementtalet har varierats så har en förbättrad frostbeständighet uppnåtts då vattencementtalet sänkts. Hansson rapporterar om en klar förbättring även om kraven i Svensk Standard inte uppnås. Khayat redovisar fullgod frostbeständighet vid test i rent vatten för både vct 0.32 och 0.40, medan resultatet för vct 0.45 blir något sämre (i vissa fall mycket sämre).

10. Blandningsförfarande

Blandningsförfarandet betydelse för betongblandningens frostbeständighet har beaktats av Khayat. Hans undersökning visar att, då luftporbildare används, så erhålls ett bättre luftporsystem (lägre avståndsfaktor samt större specifik yta) om luftporbildaren tillsätts *efter* flytmedel och AUV-medel (welan gum) jämfört med om luftporbildaren tillsätts *före* dessa. Endast welan gum har undersökts på detta sätt, men Khayat tolkar resultatet som generellt giltigt - d.v.s. oberoende av vilket AUV-medel som används.

I sammanhanget kan nämnas att även temperaturen på ingredienserna vid gjutningen kan spela en relativt stor roll, inte bara för lufthalten, utan även för luftporernas storleksfördelning [25¹⁷].

11. Liten avståndsfaktor

I litteraturen kan man finna uppgifter om att betong är frostbeständig i de fall avståndsfaktorn är mindre än 0.200 eller 0.250 mm [12]. Försöken i Kapitel 5 visar att det - åtminstone då det gäller AUV-modifierad undervattensbetong - inte entydigt går att uttala sig om frostbeständigheten genom att enbart studera avståndsfaktorn. I de rapporterade försöken har följande avståndsfaktorer uppmätts:

¹⁷ Denne refererar i sin tur till [36].

Författare	Avståndsfaktor
Yamato	0.084 – 0.418 mm
Fukudome (AUV-betong)	0.502 – 0.623 mm
Fukudome (referensbetong med luftporbildartillsats)	0.215 – 0.235 mm
Hansson (vct/vbt)	Har ej undersökts
Khayat 95a	0.152 – 0.645 mm
Khayat 95b-c	0.152 – 0.377 mm

Med undantag av Fukudome (och Hansson) så uppfyller den undre gränsen i listan ställda krav. Yamato har i ett fall erhållit en mycket låg avståndsfaktor. Detta till trots så har inte frostbeständigheten blivit bra (vid provning med rent vatten), beständighetsfaktorn är endast 19.8 %. Faktum är att i Yamatos undersökning finns ingen som helst koppling mellan avståndsfaktorn och frostbeständigheten. I Khayats undersökningar finns däremot ett tydligt samband mellan avståndsfaktorer och frostbeständighet (vid provning med rent vatten).

I Fukudomes frostbeständighetsprovningar (rent vatten) var avståndsfaktorerna för AUV-betongen relativt stabila. Trots detta varierade beständighetsfaktorn avsevärt (denna varierade mellan 3 och 47 %), d.v.s. det råder inget samband mellan avståndsfaktorer och frostbeständighet. Däremot verkar ”ordinarie riktlinjer” stämma bra in på försöksseriens normala betong för vilken frostbeständigheten ökar i takt med minskade avståndsfaktorer.

Sammanfattningsvis så går det inte att entydigt fastslå att enbart låg avståndsfaktor betyder hög frostbeständighet (vid mycket små värden finns det dessutom risk för att ett sammanhängande kapillärt luftporsystem utbildas). Men, eftersom det är Khayat som står för de bäst uppnådda resultaten vad gäller frostbeständighet, och det i hans resultat trots allt finns ett samband mellan avståndsfaktor och frostbeständighet, så kan det inte uteslutas att om ”allting annat” stämmer så är avståndsfaktor en viktig parameter i sammanhanget.

12. Små/stora porer

Det verkar att finnas motsägelsefulla uppgifter om hur ett bra luftporsystem skall se ut för att en god frostbeständighet skall uppnås. Både Fukudome och Khayat är emellertid av uppfattningen att det är en fördel med ett porsystem vars andel stora porer är litet och antalet små porer är stort. De relativt stora porer som Fukudome erhöll i sin undersökning framför han som en av de mer betydelsefulla mekanismerna bakom den dåliga frostbeständigheten som uppnåts.

Khayats försök 1996 pekar på att tillsats av AUV-medel, med samtidig hög flytmedelsdosering och avsaknad av luftporbildare, medför en relativt stor luftinneslutning. De bildade porerna är relativt stora som en följd av att antiurvaskningsmedlens polymerer klungas samman. Då luftporbildare tillsätts, med samtidigt lågt vct, varierar storleken på

de kapillära porerna i en väl hydratiserad cementpasta mellan 0.01–0.05 μm och upp till 5 μm . En ökning i antalet stora kapillära porer ($> 0.05 \mu\text{m}$) tros ha en negativ inverkan på betongens hållfasthet och täthet. Vidare pekar resultaten på att tillsats av AUV-medel främst påverkar porstorleksfördelningen vid relativt höga vct. Någon sådan påverkan verkar inte ske vid låga vct (0.32).

13. Vattentäthet

Den kritiska vattenmättnadsgraden varierar mellan olika betongkvaliteter. En högre betongkvalitet (ökad täthet) medför att tiden innan kritisk vattenmängd uppnås vid ned-sänkning i vatten förlängs (långsammare vattenabsorption). En successiv förbättring av tätheten erhålls med tiden eftersom betongens porer, till viss del, kommer att läka ihop. Av undersökningarna i Kapitel 5 är det endast Hansson som har studerat vattentätheten.

14. Konstant fuktbelastning

Det är mycket viktigt att betong får möjlighet att torka ut något innan den utsätts för frost för första gången. En betong som har legat i vatten under en månad och sedan frystestats har mycket lägre frostbeständighet än betong som lagrats bara något dygn i vatten och sedan torkat. Detta borde när det gäller undervattensbetong få konsekvenser för val av provningsmetod. SS 137244 förfarande A (saltvatten) används ofta för att ”vara på den säkra sidan”. Den luftlagring som görs innan provning medför samtidigt, när det gäller UV-betong, att man inte befinner sig på den säkra sidan. I den amerikanska provningsmetoden ASTM C 666 förvaras proverna i kalkmättat vatten ända fram till själva provningstillfället.

Eftersom ASTM C 666 dominerar som provningsmetod i Kapitel 5 så har merparten av försöken genomförts utan att betongproverna har kunnat torka ut. Undantag utgörs av Khayats provningsomgång med saltvatten samt av delar av Hanssons provning.

15. Provning med saltvatten eller rent vatten

Provning av frostbeständigheten med saltvatten är en konservativ provningsmetod som med fördel kan väljas för att ge ett större utslag mellan olika betongsammansättningar. I dagsläget finns det i litteraturen inga rapporterade försök som har givit acceptabel frostbeständighet vid provning med saltvatten. Däremot uppvisar Khayats försök att de krav som ställs vid provning med rent vatten kan uppfyllas med bred marginal.

Resultat från provning av frostbeständighet i saltvatten redovisas i Kapitel 5 av både Hansson och Khayat.

6.2 Provningsmetoder för frostbeständighet

Vattenkraftskonstruktioner skall normalt ha en mycket hög livslängd – 100 år eller mer. VAST [13] slår fast att det är mycket små förändringar i betongkvalitet, täckskikt och arbetsutförande som bestämmer om en konstruktion kommer att uppvisa en med tiden ökande hållfasthetsutveckling, eller om nedbrytningen kommer att börja relativt snabbt. Det är därför nödvändigt att betongmaterial, konstruktionsutförande och arbetsutförande

väljs med stor omsorg. För att säkerställa att en hög livslängd uppnås behöver dessutom konservativt hållna frysprovningssmetoder användas. En adekvat frysprovningssmetod är emellertid svår att utforma därför att små förändringar i utförandet kan medföra avsevärda förändringar av resultatet. Samtidigt måste metoden i princip exakt reproducera den verkliga miljö i vilken det aktuella materialet skall användas (d.v.s. uppbyggnaden av det konstruktionselement vari materialet ingår och omgivande klimatförhållanden [22]).

Teoretiskt fryser all betong sönder om den ständigt är nedsänkt i vatten och utsätts för tillräckligt många frostcykler. Detta oavsett om betongen har ett bra luftporsystem eller ej eftersom luftporerna tids nog vattenfylls och därmed förlorar förmågan att evakueras fryssande vatten. Det är därför viktigt att vid provning av frostbeständigheten för undervattensbetong ta hänsyn till att den utsatta betongen i praktiken *aldrig torkar ut* eller, i speciella fall, utsätts för extrem fuktbelastning. I [34] redovisas resultat som visar att avflagningen kan öka mer än tiofalt enbart genom att förhindra provets uttorkning. Detta innebär att gjutning i dagsläget endast kan utföras på frostfritt djup. Att betongen i praktiken oftast klarar sig från frostangrepp torde bero på att den utsätts för mycket få frostcykler (i vattenlinjen gäller dock samma förhållanden som för övrig betong ovan vatten, d.v.s. antalet cykler beror på det mikroklimat som råder). Möjligen är den temperaturcykel som används i Svensk Standard alltför snabb för provning av undervattensbetong (+20/-20/+20°C under ett dygn). Den amerikanska metoden ASTM C 666 har en något snällare temperaturcykel – lägsta temperatur är densamma men växling görs endast till strax över +4°C (5-12 cykler per dygn).

Man kan diskutera om saltfrostbeständighet är behövligt i vattenkraftsammanhang. Förmodligen är så inte fallet eftersom förhållandet ej motsvarar de som flertalet vattenbyggnadskonstruktioner är utsatta för. Detta håller säkerligen de flesta berörda parter med om. Det centrala problemet ligger nog snarare i att hitta en alternativ provningsmetod som kan erhålla allmän acceptans.

7 Slutord

Av diskussionen ovan framgår att det finns ett flertal intressanta frågor att studera närmare i fortsatt forskning kring undervattensbetong. Dessa frågor är inte bara av vikt för vattenkraftindustrin utan är även giltiga för andra ägare av vattenbyggnadskonstruktioner såsom t.ex. Vägverket. I slutänden hägrar betongblandningar för undervattensgjutningar som kan användas på frostutsatta konstruktioner och som är hanterbara även utanför laboratorer. Ej ännu publicerade uppgifter från Khayat tyder på att god avskalningsbeständighet kan uppnås vid provning med saltlösning (vibreringsfri betong tillverkad med tillsats av AUV-medel). Men även om så inte är fallet så kan förmodligen en mycket god frostbeständighet uppnås vid provning i rent vatten. Om detta är tillfyllest eller ej måste diskuteras vidare framöver. I vilket fall som helst så behöver berörda parter komma fram till konsensus vad gäller vilken typ av provning som är riktig att använda i sammanhanget.

8 Referenser

- [1] Mäkk O, Tjugum O. och Westergren P. (1986). *"Pumpad undervattensbetong: Fältförsök med tillsats av vattenavvisande medel"*, Vägverket, Borlänge, 4 s.
- [2] Khayat, K. H. (1998). Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials – an overview, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, s. 171-188.
- [3] Khayat, K. H. och Gaudreault, M. (1997). Underwater repair of the St. Lambert Lock: A case study in severe winter conditions, *Concrete International*, Vol. 19, Nr. 3, s. 36-40.
- [4] Bernstone, C. (1998). *Kunskapsåterföring på betongområdet från det amerikanska REMR-programmet*, Elforskrapport 98:33, 79 s.
- [5] Nygårds, J. och Svensson-Ljungkrantz, C. (1984). *Undervattensbetong: Undersökningar i fältmässig skala*, BFR-rapport R85:1984, ISBN 91-540-4168-6, 75 s.
- [6] Westergren, P. och Nordenswan, E. (1986). *Undervattensgjutning – Provgjutningar med betongtillsatsen HYDROCEM och för undervattensgjutning anpassad referensbetong*, Rapport 1986-05-13, Vägverket, 12s.
- [7] Hansson, P. (1995). *Undervattensgjuten betongs vidhäftning till gammal betong*, Elforskrapport 95:5B, 28 s.
- [8] Fukudome K., Miyano K., Taniguchi H. och Kita T. (1992). Resistance to freezing and thawing and chloride diffusion of anti-washout underwater concrete containing blastfurnace slag, *i Fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*, Proceedings fourth international conference, Istanbul, Turkey, 1992, Ed. V. M. Malhotra, American Concrete Institute Special Publication: SP-132, s.1565-1582.
- [9] Khayat, K. H. (1991). *Underwater repair of concrete damaged by abrasion-erosion*, REMR technical report CS-37, 224 s.
- [10] Hepworth, H. K., Davidson, och J. S., Hooyman, J. L. (1998). Admixture enhanced controlled low-strength material for direct underwater injection with minimal cross-contamination, *i The design and application of controlled low-strength materials (Flowable fill)*, ASTM STP 1331, Eds. A. K. Howard and J. L. Hitch, American Society for Testing and Materials, s. 108-123.
- [11] Khayat, K. H. (1996). Effects of antiwashout admixtures on properties of hardened concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, Nr. 2, s. 134-146.
- [12] McLeish, A. (1994). *Underwater concreting and repair*, ISBN 0470-23403-2, Halstead Press, John Wiley & Sons, 145 s.
- [13] VAST (1991). *Betong i vattenkraftanläggningar*, Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse, ISBN 91 8733070, 111 s.
- [14] Nagataki, S. (1995). *Antiwashout admixtures for underwater concrete; in Application of admixtures in concrete*, RILEM Report No. 10, Ed. A.M. Paillere, E&FN Spon, ISBN/ISSN: 0-419-19960-8, 77-87.

-
- [15] Khayat, K. H. (1995). Frost durability of concrete containing viscosity-modifying admixtures, *ACI Materials Journal*, Vol. 92, Nr. 6, s. 625-633.
- [16] Sakuta, M., Yoshioka, Y. och Ito, K. (1987). *Use of Acryl-type polymer as admixture for underwater concrete*, Takenaka Technical Research Report, No. 37, May 1987, s. 135-143.
- [17] Bhutta, M. R., Ohama, Y. och Demura, K. (1993). Polymethyl methacrylate concrete for underwater construction, i *Concrete 2000*, Eds. R. K. Dhir och R. M. J. Jones, ISBN 0 419 18120 2, p. 1061-1070.
- [18] Kompen, R. (1990). Undervannsstöp med betong, *Rescon News*, oktober 1990, 4s.
- [19] Ramashandran, V.S. (1995), Miscellaneous admixtures, in *Concrete admixtures handbook – properties, science and technology*, 2nd edition, ISBN 0-8155-1373-9, s. 1017-1019.
- [20] REMR Technical Note, Antiwashout admixtures for underwater concrete, CS-MR-7.2, 9 s.
- [21] Khayat, K. H. (1992). In-situ properties of concrete piles repaired under water, *Concrete International*, mars, s. 42-49.
- [22] Fagerlund F. (1976). *Kritiska vattenmättnadsgradsmetoden*, Rapport: CBI forskning 12:76, Cement och Betonginstitutet, KTH, 43 s.
- [23] Webster, R. P. och Kukacka L. E. (1987). *In situ repair of deteriorated concrete in hydraulic structures: feasibility studies*, REMR technical report CS-6, 1987, 80 s.
- [24] Andersson, C. och Petersson, P-E. (1987). *Härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet*, SP-Rapport 1987:07, ISBN 91-7848-050-7, 99 s.
- [25] Krus, J. (1993). *Hållfasthet hos frostnedbruten betong*, Licentiatavhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, ISSN 1103-4270, 82 s.
- [26] Betonghandbok (1994). *Material - utgåva 2*, Red. Av C. Ljungkrantz, G. Möller och N. Peterssons, svensk Byggtjänst, ISBN 91-7332-709-3, s. 711-779.
- [27] Fagerlund F. (1989). *Vattenbyggnadsbetong*, ISBN 91-87334-04-6, Cementa, 51 s.
- [28] ACI (1989). 1989 Annual books of ASTM standards, Vol. 04.02 Concrete and aggregates, ISBN 0-8031-1381-1, 771 s.
- [29] Fagerlund F. (1996). *Livslängdsberäkningar för betongkonstruktioner – översikt med tillämpningsexempel*, Rapport ISSN 0348-7911 TVBM, Lunds Tekniska Högskola, 117s.
- [30] Evertson, C. och Petersson, P-E. (1992). *Härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet – del 2*, SP Rapport 1992:51, ISBN 91-7848-369-7, 82 s.
- [31] Yamato T., Emoto Y. och Soeda M. (1991). Freezing and thawing resistance of anti-washout concrete under water. i *Durability of concrete, Second international*

-
- conference*, Montreal, Canada 1991. Vol. I, Detroit, Ed. V. M. Malhotra, American Concrete Institute Special Publication: SP-126, s. 169-183.
- [32] Hansson, P. (1996). *Repair using Anti-washout admixtures – bond and freeze-thaw resistance*, Symposium i Stockholm juni 1996: “Repair and upgrading dams”, KTH, s. 91-101.
- [33] Vägverket (1988). *Bronorm 88 – 3. Grundläggning och underbyggnad*, Publ. 1988:203, Sektionen för broteknik, Vägverket, 89 s.
- [34] Peterson P-E (1994). *Inverkan av salthaltiga miljöer på betongs frostbeständighet*, Teknisk rapport SP-rapp 1984:34, ISSN 0280-2503, 30 s.
- [35] Powers, T. C. (1949). *The air requirements of frost resistant concrete*, Highway research Board, Vol. 29 Proceedings, s. 184-211.
- [36] Saucier, P., Pigeon, M. och Cameron, G. (1991). Air-void stability, Part V: temperature, general analysis, and performance index, *ACI Materials Journal*, s. 25 – 36.

Bilagor

A Liten ordlista

ACI	American Concrete Institute.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
AUV	Antiurvaskningsmedel.
AWA	Anti-washout admixture.
BF	Beständighetsfaktor.
E-modul	Elasticitetsmodul.
FB	Frostbeständighet.
HEC	Hydroxyetylcellulosa.
HEMC	Hydroxietylmetylcellolosa.
HPMC	Hydroxipropylmetylcellulosa.
ICOLD	International Commission on Large Dams.
LTH	Lunds Tekniska Högskola.
KTH	Kungliga Tekniska Högskolan.
SP	Statens Provningsanstalt.
SS	Svensk Standard.
Vbt	Vattenbindemedelstal.
Vct	Vattencementtal.
VEA	Viscosity-enhancing admixture.
VMA	Viscosity-modifying admixture.

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