

Beständiga undervattensgjutna kajkonstruktioner SBUF projekt 11940

Durable quay constructions cast under water – SBUF project 11940



*Carsten Vogt¹ – Hans Hedlund² – Kjell Wallin³,
Franziska Baldy¹ – David Pettersson²*

¹ CBI Betonginstitutet

² Skanska Sverige AB

³ Projektengagemang

Nyckelord: Frostbeständig betong, lufthalt, temperatursprickor, tvång, undervattensgjutning.

Antal sidor: 56 + 106

Omslagsbild: Hornsberg Strand, fd kv Kojan, Stockholm under byggtiden, tillhandahållen av exploateringskontoret. Övrigt bildmaterial av K Wallin och C Vogt, CBI.

Innehåll

Förord	4
Sammanfattning	5
Summary	6
1 Inledning	7
2 Syfte	9
3 Genomförande.....	10
4 Kortfattad beskrivning av konstruktionen	11
5 Laboratorieundersökningar	13
6 Teknisk beskrivning.....	20
7 Provgjutningar.....	22
7.1 Väg gjutningar för val av betongrecept	22
7.2 Fullskaleprovning i vattenfylld container	30
8 Temperatursprickrisk	40
8.1 Materialparametrar	40
8.2 3D elastisk tvångsanalys.....	40
8.3 Tvångsmätning	41
8.4 Temperatursprickriskberäkningar.....	43
9 Fortlöpande provning.....	46
9.1 Färsk betong	46
9.2 Hårdnad betong.....	49
10 Produktion	51
11 Slutsatser	54
Referenser.....	55
Bilagor.....	56
Bilaga A: Objektteknisk beskrivning (OTb), utfört av CBI, 19 s.	
Bilaga B: Bestämning av materialparametrar för betongen, utfört av LTU, 18 s.	
Bilaga C: 3D elastisk tvångsanalys, utfört av Skanska, 15 s.	
Bilaga D: Temperatursprickriskberäkningar, utfört av CBI, 45 s.	
Bilaga E: Resultat fortlöpande provning färskbetong, utfört av CBI och Skanska, 14 s.	
Bilaga F: Resultat fortlöpande provning hårdnad betong, utfört av CBI, 3 s.	
Bilaga G: Resultat av luftporanalyser på hårdnad betong, utfört av CBI, 31s.	

Förord

Den mest utsatta delen av en kajkonstruktion är skvalpzonen, vilken har ett varierande fukttillstånd mht variationer i vattenstånd. För kajkonstruktioner i skvalpzonen krävs frostbeständig betong både över och under vattenytan. Vid utförande av dylika konstruktioner gjuts ofta delar under vatten, dvs undervattensgjutning (UV), som ställer krav på att betongmassan skall vara anpassad till gjutmetodiken. För att kunna använda frostbeständig betong i skvalpzonen krävs vanligtvis att gjutningen utförs i torrhet (dvs länshållen form), vilket bl.a. leder till mycket höga krav på formens täthet och stabilitet. Ett alternativt gjututförande är att gjutning sker under vatten med en betong som är anpassad till UV-gjutning samt är frostresistent.

Detta projekt (SBUF-projekt 11940) har haft som avsikt att studera och sammanställa nyttan för aktörerna i branschen (materialleverantör, entreprenör och beställarna/förvaltare) genom att använda nya utförandemetoder vid gjutning av kajkonstruktioner. Avsikten var att detta skulle leda fram till en längre teknisk livslängd genom bättre beständighet samt minskade underhållskostnader för förvaltaren. Vidare siktade projektet på att reducera kostnaderna vid utförandet genom användning av mer rationella produktionsmetoder med utnyttjande av UV-gjuten frostbeständig betongs specifika materialegenskaper.

Projektet genomfördes tillsammans med materialleverantör, entreprenör (Skanska Sverige AB) och beställaren (Exploateringskontoret Stockholm Stad) i ett fullskaligt projekt (gjutning av krönbalkerna vid Hornsbergs Strand fd kv Kojan, Stockholm) där dagens kunskapsnivå för branschen utvecklades genom provning, mätning och uppföljning. Undersökningar angående betongparametrar har genomförts av LTU, tvångsmätningen genomfördes av KTH.

Till projektet har en referensgrupp bestående av Tekn.Dr. Jan-Erik Jonasson vid Luleå tekniska universitet (LTU) och Tekn.Dr. Mats Emborg vid Betongindustri varit knuten.

Projektet har finansierats genom bidrag från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Exploateringskontoret Stockholm Stad och Skanska Sverige AB.

Carsten Vogt, Hans Hedlund Stockholm, februari 2010.

Sammanfattning

SBUF projektet 11940 hade syftet att utveckla och förbättra produktionsmetoder för byggandet av beständiga kajkonstruktioner genom användning av undervattensgjuten frostbeständig betong. Traditionell gjuts kajkonstruktioner med krav på frostbeständighet i torrhet med frostbeständig anläggningsbetong. Ligger delar av kajkonstruktionen under vattenytan så tätas formen i botten med hjälp av en traditionell undervattensgjutning. Därefter länsas formen från vatten, konstruktionen armeras och gjutning med traditionell frostbeständig betong utförs i torrhet. Objektet som beskrivs i rapporten (krönbalk Hornsbergs Strand, fd kv Kojan) hade i stora delar en ogynnsam geometri för det traditionella utförandet. Konstruktionen är i delen strandpark mycket låg, bara 20- 30 cm ligger ovanför vattenytan. Däremot befinner sig nästa hela konstruktion under vattenytan. Samtidigt är konstruktionen 500 m lång och sinusformad i längdled. Denna geometri skulle göra en konventionell gjutning i torrhet mycket svår och kostsam.

Projektet delades upp i olika steg. I första steget utvecklades ett betongrecept i laboratoriet med god separationsbeständighet vid flöde genom vatten och förhöjd lufthalt för att säkerställa frostbeständigheten. Detta betongrecept, förslag till gjutmetodik och krav på provgjutningar ingick i entreprenadhandlingarna. Provgjutningar genomfördes för att anpassa det föreslagna betongreceptet till produktionen. I en fullskaleprovgjutning demonstrerades utförandemetodens lämplighet. Genom bestämning av fullständiga materialparametrar för betongen och tvångsmätningar i konstruktionen kunde realitetsnära temperatursprickriskberäkningar genomföras. Detta resulterade i att åtgärderna för att erhålla en sprickfri konstruktion kunde minskas drastiskt. Intensiv provning av den färska och hårdnade betongen användes för att kvalitetssäkra konstruktionen.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att användning av undervattensgjuten frostbeständig betong inte bara möjliggjorde utförandet av krönbalken vid Hornsbergs Strand fd kv Kojan, utan också gav en vinst för både, beställaren och entreprenören i form av en beständig konstruktion med ett genomförbart utförande. Självklart är utförandet av en kajkonstruktion med undervattensgjuten frostbeständig betong inte i alla lägen lönsamt. Enklare konstruktioner som befinner sig till stora delar över vattenytan gjuts med fördel med traditionella metoder. Ekonomiska kalkyler och riskanalyser i varje enskild fall avgör vilket utförande som lämpar sig bäst. SBUF-projektet 11940 visar ett möjligt förfarande i alla nödvändiga steg för att framgångsrikt realisera en mycket svårgjuten kajkonstruktion.

Summary

Within the SBUF-project 11940, the construction methods for concrete quay structures should be developed and improved. Frost-resistant underwater concrete should be utilized in order to achieve durable concrete quay structures. Traditionally, concrete quay structures exposed to frost are cast with air-entrained concrete as used in concrete bridges. In case the concrete structure is partly situated below the water level, the bottom of the formwork is sealed with traditional underwater concrete. Then, the formwork is emptied from water, reinforcement is installed and the casting with air-entrained concrete can be done. The concrete structure described in the report (quay at Hornsberg's Strand, former the block Kojan), would be difficult to realize the traditional way. That is due to that almost the complete structure is situated under water. Only 20 -30 cm of the quay are above the water level, the structure is 500 m long and has a sinus-wave shape. Therefore, a conventional casting in a sealed and bailed formwork would be very difficult and costly.

The project was realized stepwise. First, a suitable concrete mix design was developed in the laboratory. This mix design was designed to have good stability against segregation in water and an increased content of entrained air to ensure frost resistance. This mix design was included in the submission papers for the object. Together with the contractor, test castings were performed to adjust the laboratory mix design to production. The suitability of mix design and casting method were demonstrated in a full-scale mock-up casting. Material parameters for the concrete mix were determined and the level of restraint was measured in the concrete structure. With this input data, realistic thermal crack risk calculations were performed. The result of these calculations showed that the originally planned measures to achieve a crack-free structure could be reduced drastically. Intensive on-site testing of fresh concrete properties was an essential part of the quality assurance program.

In summary, it can be stated that the use of frost resistant underwater concrete not only made the construction of the quay at Hornsberg's Strand possible, but also gave benefits to contracting entity and contractor due to a sound structure and a feasible construction method. Obviously the application of frost resistant underwater concrete is not always economical. Simpler concrete quay structures are preferably constructed with traditional methods. Cost calculations and risk assessments in every single case have to decide which construction method to choose. The SBUF project 11940 shows a possible way with all the necessary steps of how to successfully realize a complicated concrete quay structure.

1 Inledning

Undervattensgjutning och undervattensbetong har använts under lång tid inom byggindustrin. Halloran & Talbot (1943) undersökte betongmassans utbredning vid gjutning under vatten. För att uppnå ett bra gjutresultat är betongens sammansättning, arbetbarhet och gjutmetodiken avgörande. Betonghandboken (1992) och ACI (1998) ger rekommendationer för arbetsutförande och betongsammansättningar. Härdningsbetingelser för undervattensgjuten betong är vanligtvis gynnsamma, dock observeras ofta starkt varierande hållfasthet i gjutna konstruktioner. Detta beror oftast på utförandet (Betonghandbok, 1992). Genom tillsats av AUV-medel till betongen kan en jämnare betonghållfasthet säkerställas vid gjutning under vatten (Sonebi & Khayat, 2001). McDonald & Neely (1999) rekommenderar liknande betongsammansättningar och betongegenskaper för undervattensgjuten betong som Bro 2004 och betonghandboken (1992). Slater (2002) konstateras att en självkompakterande betong med hög flytförmåga kan med fördel användas för undervattensgjutning i form, dvs betongen är skyddad från vågerosion under och efter gjutning. Tillsats av AUV-medel höjer dock säkerheten vid gjutning.

I Sverige är undervattensgjutning inom anläggningsbyggandet reglerat i Bro 2004. De följande kraven på en undervattensgjuten konstruktion är hämtade från Bro 2004:

En undervattensgjuten betongkonstruktion med tillsats av AUV-medel ska i sin helhet vara belägen på frostfri nivå. Statiskt verksam armering godtas endast om betongen tillsätts AUV-medel. En undervattensgjuten konstruktion ska gjutas med betong av lägst tryckhållfasthetsklass C 28/35. För en undervattensgjuten konstruktion ska de dimensioneringsvärden som gäller för tryckhållfasthetsklass C 20/25 tillämpas. Med tillsats av AUV-medel godtas att C 25/30 tillämpas.

Frostbeständig undervattensbetong har undersökts på senare åren. Resultat som beskrivs i litteraturen är inte entydig. Khayat (1995) undersökte undervattensbetong med luftporbildare och AUV-medel. Han kommer fram till att doseringen av luftporbildare måste ökas drastiskt i betong med AUV-medel för att skapa ett bra luftporsystem. Dessutom är inte alla luftporbildare kompatibel med de olika AUV-medel. En utökad undersökning av undervattensgjuten betongens frostbeständighet finns beskriven i Khayat (1995). Resultaten av denna undersökning är att undervattensbetong kan tillverkas med bra inre frostbeständighet, avflagningen vid frysning med tössalter är dock hög. Moon et al. (2007) testade frostbeständighet enligt ASTM 666 på undervattensbetong med luftporbildare och AUV-medel. Deras resultat visar att betongens frostbeständighet är i allmänhet dåligt, även om en lufthalt på 6 % åstadkoms i färsk och hårdnad betong. Inblandning av höga halter av

slagg och en lufthalt på 6 % resulterade i något förbättrad frostbeständighet. Deras slutsatser är att den dåliga frostbeständigheten beror på inkompatibilitet mellan luftporbildare och AUV-medel. Detta medför stora, dåligt fördelade luftporer i den hårdnade betongen. En möjlig lösning för att skapa frostbeständig undervattensbetong beskrivs av Nanaumi et al. (1999). Genom att kombinera mikrosfärer, slagg och AUV-medel kan en frostbeständig undervattensbetong erhållas. Mikrosfärer är små ihåliga plastsfärer som agera som fasta luftporer i betongmassan. Nackdelen är dock att mikrosfärer är kostsamma.

Kajkonstruktionen som beskrivs inom SBUF projekt 11940, krönbalken vid Hornsbergs Strand fd kv Kojan, skiljer sig från en traditionell undervattensgjuten konstruktion. Den mest utsatta delen av en kajkonstruktion är skvalpzonen, vilken har ett varierande fukttillstånd mht variationer i vattenstånd. Detta varierande fukttillstånd ställer stora krav på den använda konstruktionsbetongen i såväl färskt tillstånd som slutligt (hårdnat) tillstånd. För kajkonstruktioner i skvalpzonen krävs frostbeständig betong både över och under medelvattenytan.

Vid utförande av dylika konstruktioner gjuts ofta delar under vatten, dvs undervattensgjutning (UV), som ställer krav på att betongmassan ska vara anpassad till gjutmetodiken. För att kunna använda frostbeständig betong i skvalpzonen krävs vanligtvis att gjutningen utförs i torrhet (dvs länshållen form), vilket bl.a. leder till mycket höga krav på formens täthet och stabilitet. Ett alternativt gjututförande är att gjutning sker under vatten med en betong som är anpassad till UV-gjutning samt är frostresistent.

Konventionell betong för undervattensgjutning med tillsats av antiutvaskningsmedel (AUV) är oftast inte frostbeständig till följd av att betongens luftporsystem påverkas negativt av AUV-tillsatserna.

Ytterligare inverkan på kajkonstruktionens beständighet är de komplexa fastlåsningarna som uppkommer från anslutande, ingjutna samt motgjutna konstruktionsdelar. Dessa komplexa fastlåsningar, som verkar på den nygjutna betongen, skapar ett yttre tvång och ökar därmed risken för skadlig sprickbildning i konstruktionen. Sprickbildningen reducerar kraftigt den tekniska livslängden och ökar förvaltarens underhållskostnader för att ändå bibehålla den tekniska livslängden för konstruktionen.

2 Syfte

Föreliggande projekt finansierades av bl. a. SBUF. I ansökan till SBUF beskrevs syftet på följande sätt:

I projektet avses att studera och sammanställa nyttan för aktörerna i branschen (materialleverantör, entreprenör och beställarna/förvaltare) genom att utreda, utveckla och föreslå förbättrade utförandemetoder vid gjutning av kajkonstruktioner. Detta ska leda fram till att erhålla förväntad teknisk livslängd genom bättre beständighet samt minskade underhållskostnader för förvaltaren. Vidare avser projektet att reducera kostnaderna vid utförandet genom användning av mer rationella produktionsmetoder med utnyttjande av UV-gjuten frostbeständig betongs specifika materialegenskaper.

Genom att utföra gjutningarna med frostbeständig UV-betong minskas risken för bristfälligt gjutresultat med avseende på inläckage av vatten från form som deformeras under gjutarbetet. Samtidigt reduceras kostnaden för tätning av formen före länsning. Kostnaderna för länsning reduceras till noll.

Genom utökade kunskaper om den komplexa tvångssituationen från fastlåsningar för den nygjutna konstruktionen skapas förutsättningar för att med hjälp av förkalkyler erhålla en sprickfri konstruktion med relevanta insatser gällande kylnings- och värmningsåtgärder i produktionen.

Med hjälp av laboratorieundersökning verifieras temperatur- och hållfasthetsutveckling gällande frostbeständig UV-betong, för att kunna utnyttja den hållfasthetsökning i tidigt hydrationsstadium som materialsammansättningen förväntas kunna ge.

Fortlöpande undersökningar av lufthalten i färsk och hårdnad betong samt frystester skapar underlag för korrelation mellan lufthaltsmätningar, planslip och frostbeständighet för denna typ av betong.

3 Genomförande

Projektet genomfördes tillsammans med materialleverantör, entreprenör och beställaren i ett fullskaleprojekt (Hornsbergs Strand fd kv Kojan, Stockholm) där dagens kunskapsnivå för branschen utvecklas genom provning, mätning och uppföljning.

Först utvecklades ett lämpligt betongrecept i laboratoriet. Betongreceptet anpassades till ballastmaterialet från betongfabriken och produktionsmetoden. Betongreceptet och gjutmetodiken testades med hjälp av provgjutningar. I samband med gjutningarna i entreprenaden utfördes fördjupade undersökningar gällande luftporsystemet i den färska betongmassan som jämfördes med resultat från planslipsundersökning av hårdnad betong. Betongens egenskaper (värmeutveckling, tidiga mekaniska egenskaper, mm) provades vid LTU för att erhålla komplett indatauppsättning till för- och efterkalkyler angående temperatursprickor.

Gjutningar i fullskala instrumenterades med töjningsgivare för att fastställa tvånget i den verkliga konstruktionen. Under projektet studerades och karterades konstruktionen gällande uppsprickning, gjutresultat och frostbeständighet i förhållande till förväntat resultat.

I projektet har följande moment ingått:

- Framtagande och utvecklande av en frostbeständig UV-betong.
- Sprickriskanalyser och åtgärder.
- Kylning av trånga UV-gjutna konstruktioner.
- 3D-analyser av den komplexa tvångssituationen.
- Laboratorieundersökning av den unga betongens egenskaper för aktuellt betongrecept.
- Kvalitet på utförande och metoder.
- Fältmätningar av töjningar för verifiering av tvångssituationen.
- Uppföljning av sprickrisker, temperaturer och töjningar.
- Analyser av lufthaltsvariation i frostbeständig UV-betong.
- Sammanställning av erfarenheter och utformning av rekommendationer.

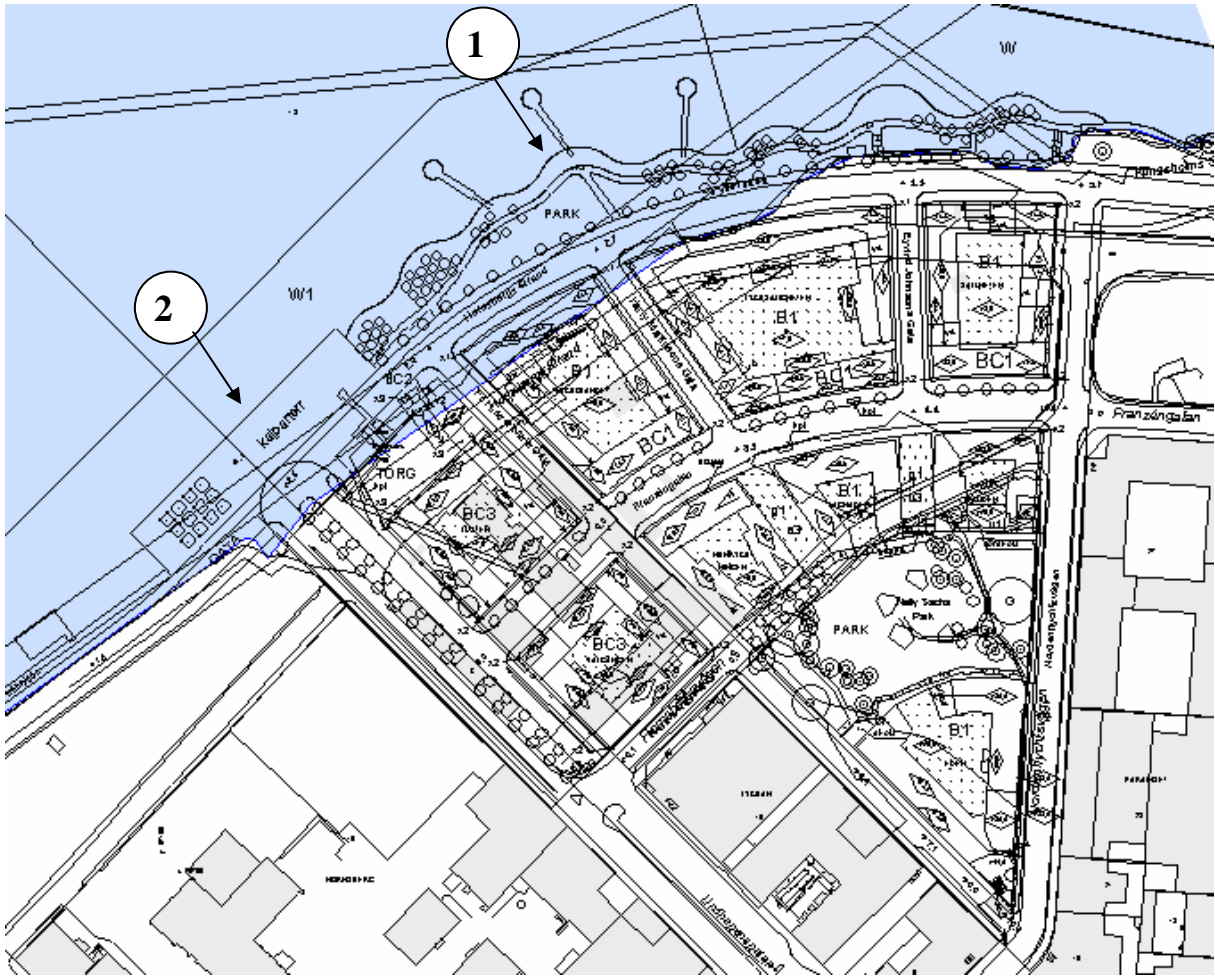
4 Kortfattad beskrivning av konstruktionen

Spontkrönbalkar är en konstruktion som utförs i skvalpzonen med en del ovan vatten och en del under vattnet. Vid gjutning med konventionell undervattensbetong erhålls inte en betong som uppfyller kraven på frostbeständighet. Ett sätt att utföra gjutningarna är att arbeta med normal frystestad brobetong i torrhet. Vid utförandet med torrhetsgjutning är erfarenheten den att problem ofta uppstår med inläckande vatten och deformationer av form p g a vattentrycket. För denna spontkrönbalken har det valts att utföra gjutningarna såväl under som över vattnet med en betong som skall klara kraven gällande frostbeständighet och samtidigt vara lämplig för undervattensgjutning.

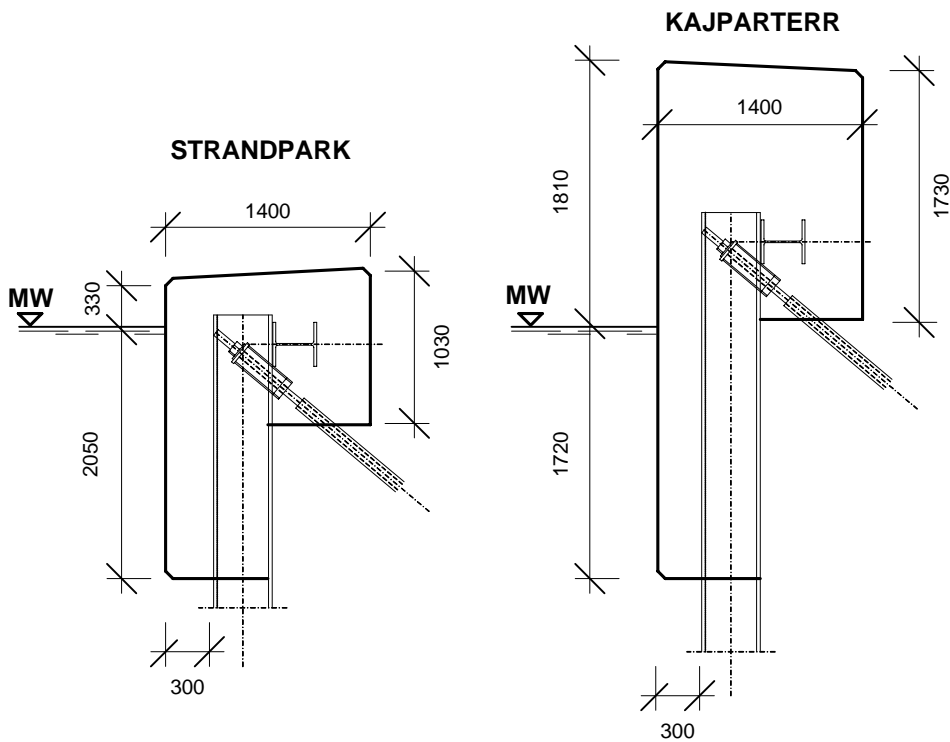
Spontkrönbalken är den del av spontkonstruktionen för projektet som medger utfyllnad i Ulvsundasjön med 14 000 kvm ny mark. Utfyllnaden möjliggör 400 nya bostäder av totalt 1200 i projektet Hornsbergs Strand i Stockholm. Utformningen av spontkrönbalken, konstruerad av SWECO VBB, som ingår i projektet (Entreprenad Hornsbergs Strand fd kv Kojan) är något speciellt. Konstruktionen består av två delar, sektion ”strandpark” och sektion ”kajparter”. Konstruktionen är i delen strandpark mycket låg, bara 20- 30 cm ligger ovanför vattenytan. Däremot befinner sig nästa hela konstruktion under vattenytan. Denna geometri skulle göra en konventionell gjutning i torrhet mycket svår och kostsam. Krönbalkens längd i delen strandpark är cirka 500 m. Figur 1 och Figur 2 visar en vy och tvärsnitt på konstruktionen.

De krav som ställs på betongen av konstruktören kan sammanfattas enligt följande:

- Teknisk livslängd L100.
- Exponeringsklass XD 3 + XF 4.
- Hållfasthetsklass C32/40.
- Gjutningen ska ske i en vattenfylld form.



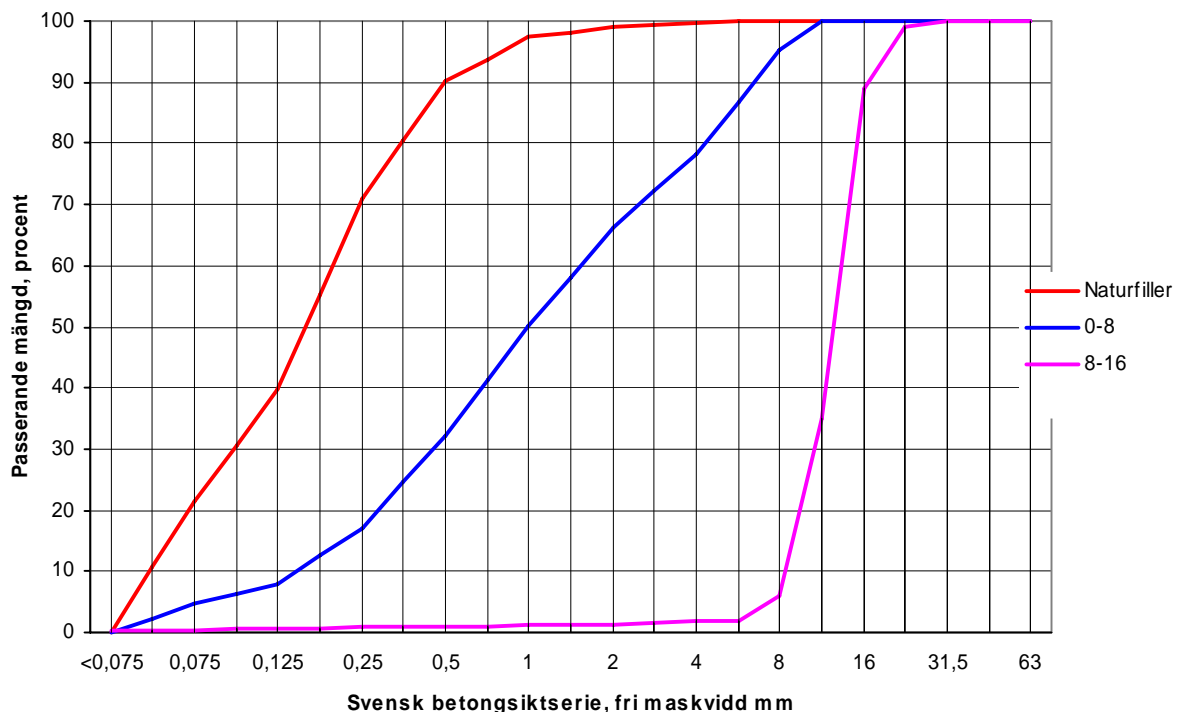
Figur 1: Vy Kv. Kojan, sinusformad krönbalk 1 (strandpark) och rak geometri 2 (kajparterr).



Figur 2: Tvärsnitt av krönbalken, till vänster strandpark och till höger kajparterr, skiss, ej måttenligt.

5 Laboratorieundersökningar

I början av receptutvecklingen utfördes provblandningarna för att undersöka kompatibiliteten mellan tillsatsmedlen. Tillsatsmedlen som undersöktes var olika AUV-medel, luftporbildare, flyttillsatser och viskositetsstyrande medel. Blandningarna utfördes på satsstorlekar av 20 liter. Betongens vct fick inte överstiga 0,40 (krav enligt exponeringsklass XD3), maximalt ballaststorlek fastställdes till 16 mm i samråd med konstruktören. Betongens arbetbarhet bedömdes med hjälp av flytsättnått och okulär besiktning, lufthalten i den färska betongmassan bestämdes med lufthaltsmätaren. Figur 3 visar siktcurvor för de använda ballastmaterialen.



Figur 3: Kornstorleksfördelningen för de tre olika ballastmaterialen i betongen.

De inledande provblandningarna med inblandning av AUV-medel visade att:

- Betongen blir mycket seg och stabil. Sannolikt har betongen inte tillräckligt bra flytförmåga att fylla formen och omsluta alla ingjutningsgods i den komplicerade krönbalkskonstruktionen. Detta beror antagligen på det låga vct (krav på vct = 0,40 vid exponeringsklass XD3) i kombination med AUV-medel.
- Lufthalten blev för låg. Luftporbildande medel och AUV-medel var inte kompatibla, vilket medförde att AUV-medlet inaktiverade luftporbildningen.

Istället för AUV-medel introducerades naturfiller och viskositetshöjande medel i proportioneringen för att åstadkomma stabilitet och sammanhållning i betongen. Det visade sig också att betongen blev mer lättflytande med tillräckligt hög stabilitet. Tabell 1 visar betongreceptet som provades fram. Resultaten kan sammanfattas enligt följande:

- Betongen blev mindre seg men tillräckligt stabil.
- Lufthalten ökade med ökad dosering av lufttillsatsmedel, vilket inte var fallet med AUV-medel.

Tabell 1: Receptförslag för frostbeständig undervattensbetong efter laboratorieprovningar. Vattenhalten är korrigerad med vatteninnehållet i tillsatsmedlen.

Material	kg/m ³
Anläggningscement	440
Vatten	169
Naturfiller	250
Grus 0-8 mm	830
Sten 8-16 mm	554
Luftporbildare	4,0
Flytmedel	2,83
Viskomedel	1,5
vct	0,40

Konsistensförlusten och stabiliteten av luftporsystemet i den färska betongen provades på olika satsstorlekar i laboratoriet. Resultatet av konsistensmätningarna framgår av Tabell 2. Som framgår av Tabell 2 beror konsistensförändringen med tiden på satsstorleken. Det är troligen lättare att kontrollera konsistensförändringen ju större satsstorleken är. Lufthalten var stabil och konsistensoberoende.

Tabell 2: Färska betongens egenskaper för olika satsstorlekar, betongrecept enligt tabell 1.

Statsstorlek	20 liter	60 liter	80 liter
Flytsättnmätt	mm	mm	mm
0 min	420	635	670
30 min	330	440	640
60 min	280	370	530
90 min	-	310	410
Lufthalt	%	%	%
0 min	11,5	12,5	11,0
30 min	10,5	12,5	11,2
60 min	10,7	11,5	11,2
90 min	-	12,0	11,1

Flytsättmättet efter en viss tid bör inte understiga ett visst värde. Vad som är acceptabelt i detta avseende måste emellertid alltid justeras och kontrolleras med en fullskaleprovning. Lufthalten var mycket stabil mellan blandningstillfället och upp till 90 minuter efter blandning, se Tabell 2. Lufthalten i den färska betongmassan var, jämfört med vanlig brobetong, högt. Det bedömdes dock att lufthalten i den färska betongen bör ligga på ca 10-11% för att säkert uppnå 7-8 % i den hårdnade betongen. Det bedömdes att det krävs en marginal i lufthalten med tanke på att gjutningen ska ske under vatten. I en tät betong som denna, dvs en lättkompakterbar betong med vct 0,40 och hög andel filler, bör lufthalterna ligga kring denna nivå för att skapa marginal med god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 som mål. Med denna marginal kan vissa undertramp tillåtas ner till 5 % lufthalt i den hårdnade betongen. Egenskaperna hos den hårdnade betongen redovisas i Tabell 3. Resultaten visar att betongen uppfyller kraven på hållfasthetsklass C32/40. Noterbart är den förhållandevis låga densiteten som beror på hög lufthalt. Lufthalten i kombination med avståndsfaktorn som bestämdes i den hårdnade betongen bedömdes vara tillräckligt för att ge god frostbeständighet enligt SS 13 72 44. Enligt Fagerlund (1993) bör avståndsfaktorn vara mindre än 0,20 mm för att säkerställa frostbeständigheten vid frysning i saltvatten. Detta verifierades genom frysprovning enligt SS 13 72 44, metod A, se senare.

Tabell 3: Densitet, tryckhållfasthet och luftporanalys i hårdnad betong efter 28 dygn, provuttag från konsistensblandning 3 (60 min och 90 min efter vattentillsats).

Prov Nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållfasthet MPa	Lufthalt, total %	Powers avståndsfaktor mm
60min 1	2150	46,0	8,8	0,216
60min 2	2160	46,0		
60min 3	2150	47,0		
Medel	2150	46,0		
stdavv	6	0,6		
90min 1	2150	48,0	7,2	0,188
90min 2	2170	48,0		
90min 3	2160	48,0		
Medel	2160	48,0		
stdavv	10	0,0		
Betongklass	C 32/40		Enligt EN 206-1, inledande provning	

Det utfördes ett antal små provgjutningar genom vatten, i början i en vattenfylld L-låda, senare i ett vattenfyllt plastkärl. Resultande provkroppar sågades och undersöktes okulärt på separation och vatteninblandning, se Figur 5. Provgjutningarna i L-lådan visade att betongen klarar att motstå vatteninblandning medan den är i rörelse. Stenseparation uppkom inte.



Figur 4: Provgjutning i vattenfylld L-låda.



Figur 5: Sågad yta efter gjutning i en vattenfylld L-låda. De grova ballastkornen är väl fördelade i längd- och höjddled, detta indikerar god stabilitet i betongen.

För att undersöka hur pass bra betongen omsluter armeringen och alla ingjutningsgods (spont, hammarband, dragstag, mm) i krönbalken, gjordes en provgjutning i ett större vattenfyllt plastkärl, se Figur 6. Ihopsvetsade stålplåtar och armeringsjärn skulle simulera ingjutningsgodset. Betongen göts genom ett rör för att undvika fritt fall genom vattnet. Lätt vibrering utfördes. Efter härdningen sågades flera snitt för att kunna undersöka eventuell stenseparation och omslutning av ståldetaljerna. Det borrades ut kärnor för att bestämma tryckhållfasthet, lufthalt och frostbeständighet.

Okulär undersökning visade att betongen omslöt alla ingjutningsgods mycket bra och stenseparation observerades inte, se Figur 6.



Figur 6: Gjutning i vattenfyllt plastkärl med förenklat ingjutningsgods, gjutning genom ett rör, borrning av prover och omslutning av ståldetaljer.

Prover från gjutningen i det vattenfyllda kärlet hade en tryckhållfasthet som klarar kraven på betongklass C32/40 (provuttag från färdig konstruktion, utvärdering enligt BBK 04, bilaga A), se Tabell 4.

Tabell 4: Densitet, tryckhållfasthet och luftporanalys i hårdnad betong efter 28 dygn, provuttag från simulerad undervattensgjutningen i plastkärlet.

Prov nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållfasthet MPa	Lufthalt, total %	Powers avståndsfaktor mm
Nedre1	2190	43,0	7,6	0,184
Nedre2	2210	48,0		
Övre1	2140	41,0	9,9	0,300
Övre2	2140	46,0		
Medel	2170	44,5		
stdavv	35,6	3,1		
Betongklass:		C 35/45	Enligt BBK 04, Bilaga A	

Densiteten var lägre i de proverna som togs högre upp i betongkroppen. Detta indikerar en viss separation pga egentygnd. Luftporanalyserna bekräftar att en viss separation har skett, eftersom lufthalten är högre i de övre delarna av betongkroppen. Värdena på lufthalten och avståndsfaktorn i den hårdnade betongen som göts under vatten bedömdes dock att vara tillräckligt för att betongen bör klara kravet på frostbeständighet.

Frostbeständigheten testades enligt SS 13 72 44 metod A på kuber från konsistensblandningarna och på borrkärnor från den simulerade undervattensgjutning i plastkärlet. En betong har mycket god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 om avflagnings är mindre än 0,1 kg/m² efter 56 fryscyklar. Alla prover visade mycket god frostbeständighet.

Tabell 5: Resultaten av frysprovningsen enligt SS 13 72 44 metod A. nedre= nedre delen, övre= övre delen (simulerad UV-gjutning).

Prov märkt	Metod	Avflagnat material (kg/m ²) efter:				
		7	14	28	42	56 cykler
Kub 1	I A	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Kub 2		< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,02
Nedre 1	III A	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Nedre 2		0,01	0,04	0,05	0,05	0,05
Övre 1		0,01	0,02	0,03	0,03	0,03
Övre 2		0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Medelvärde		0,01	0,02	0,02	0,02	0,03

I laboratoriemiljö visade det sig att det går att ta fram en separationsstabil och lättkompakterbar UV-betong med naturfiller men utan AUV-medel. Det är på sin plats att påpeka att i en produktionsmiljö krävs fortsatt utvecklingsarbete med den här typen av

betong. Gjutmetodik och utförandekontroll har mycket stor inverkan på kvaliteten av den färdiga konstruktionen.

6 Teknisk beskrivning

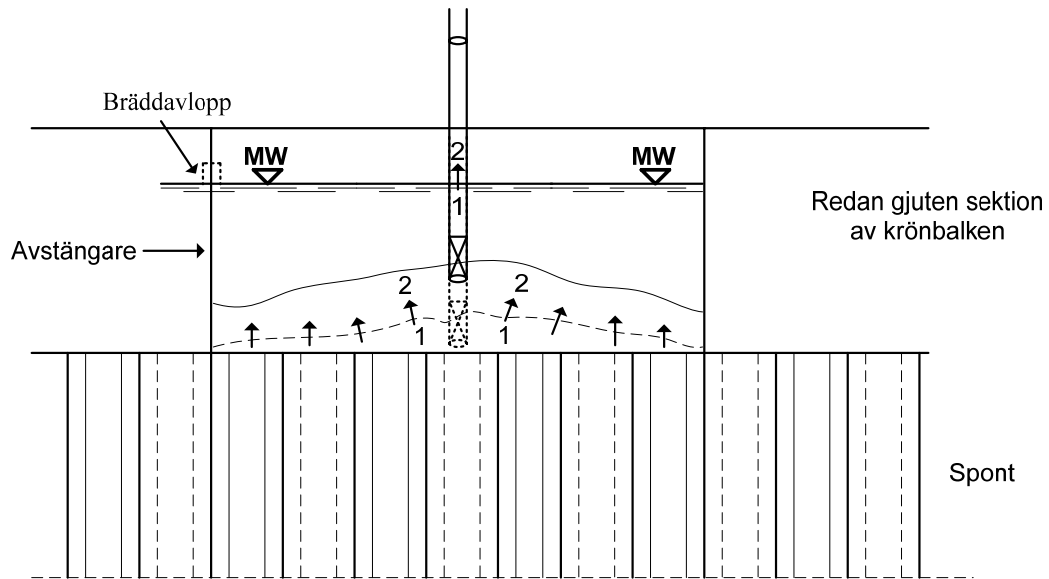
Med utgångspunkt från resultat från laboratorieundersökningarna i kapitel 5 bestämde beställaren att krönbalken i Hornsbergs Strand fd kv Kojan skulle utföras med frostbeständig undervattensbetong. Därför togs det fram en Objektteknisk beskrivning (OTb) för gjutningen av krönbalken i Hornsbergs Strand fd kv Kojan (bilaga A) för att kunna erhålla jämförbara anbud. I beskrivningen ingick specifikationer angående:

- Form och formrivning.
- Betong med avseende på lufthalt i färskt och hårdnat tillstånd.
- Gjuttemperatur.
- Förslag till betongrecept enligt laboratorieundersökningar i kapitel 5.
- Provning av färsk och hårdnad betong under produktion.
- Provgjutningar.
- Temperaturmätning.
- Gjutmetodik.
- Gjutetappsindelning.
- Efterbehandling och härdning.
- mm.

Ett av de viktigaste momenten för ett lyckat resultat ansågs vara användning av lämplig gjutmetodik. I Figur 7 och Figur 8 visas föreslagen gjutmetodik från OTb som ansågs kunna ge önskat resultat. Användning av undervattensventil ansågs vara nödvändig. Följande krav formulerades i OTb, tillhörande Figur 7: ”Gjutning skall utföras på sådant sätt att hela överytan fås att stiga. Betong får inte stiga upp utanför gjutröret så att överytan överrullas med betong. Gjutröret skall hållas nedsänkt minst 50 cm i den nygjutna betongen. I de centrala delarna i anslutning till gjutröret skall betong tillföras så att ytan med god marginal stiger över vattenytan, därefter bearbetas betongen kontinuerligt så att slamskiktet avlägsnas genom bräddavlopp på formen.”

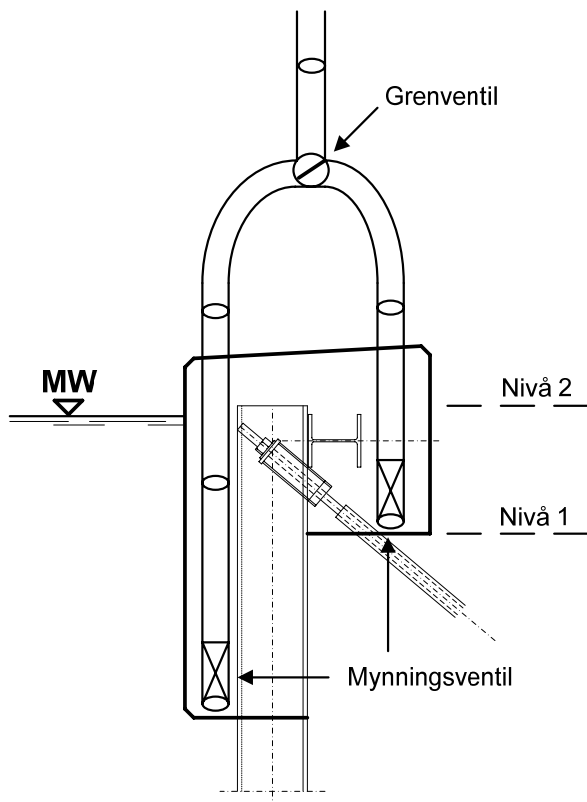
Eftersom krönbalken består av en låg- och högdal med sponten som avskiljare behövdes ifyllning av betong på båda sidor om sponten. Lösningen för detta problem ansågs vara användning av en grenventil i pumpslangen, istället för två pumpar. Följande krav formulerades i OTb, tillhörande Figur 8: ”Under gjutningen är det nödvändigt att när gjutfronten vid spontens utsida når nivå 1 eller strax över att starta tillförsel av betong på insida spont. Gjutfronter på in- och utsida spont skall samordnas så att slam och vattenblandad betong inte tillförs ovanpå gjutfronten från endera hållet innan fronterna sammanförts vid nivå 2”.

Förslag gjutmetodik



Figur 7: Föreslagen gjutmetodik, vy i längdled.

STRANDPARK Gjutmetodik



Figur 8: Föreslagen gjutmetodik, vy i tvärlid.

7 Provgjutningar

Provgjutningar enligt OTb ingick i entreprenaden för att verifiera betongreceptets lämplighet efter fabriksanpassning och vald gjutmetod. Det utfördes två provgjutningar, den första i oktober 2006 med syfte att jämföra laboratorie- och fabriksrecept. Andra provgjutningen genomfördes i februari 2007, aktuell geometri i avsnitt strandpark simulerades.

7.1 Väggjutningar för val av betongrecept

Entreprenören anpassade föreslaget betongrecept till egen ballast och något lägre vct för att kunna säkerställa erforderlig hållfasthet. Av hanteringsskäl på betongfabriken önskades att naturfillret skulle bytas ut mot en blandning av finballast och kalkstensfiller, detta med bibehållen partikelkurva. För att verifiera att dessa ändringar inte hade negativa effekter på betongens egenskaper genomfördes första provgjutningen, se Figur 9 till Figur 11. Två väggar (armerade) med en tjocklek på 0,5 m, en höjd på 1,5 m och en längd på 6 m skulle gjutas i en vattenfylld container. En vägg göts med betong enligt laboratorieproverna (naturfiller) och den andra väggen göts med ”fabriksanpassad” betong. Den färska betongens egenskaper bestämdes i fabrik och på plats. Prover borrades ut efter härdningen från båda väggar. På dessa prover bestämdes tryckhållfasthet, lufthalt på hårdnad betong, frostbeständighet och grovballastfördelning.



Figur 9: Vattenfylld container med väggformarna.



Figur 10: Betongen pumpas bara från en sida, formen är vattenfylld, pumpslangen flyttas inte.



Figur 11: Avformad vägg med borrhärnor tagna på ”pumpsidan” (vänster) och ”flytsidan” (höger) i olika höjd.

I Tabell 6 redovisas de betongrecept som användes vid provgjutningen. I princip är recepten mycket likartade, cementhalten är identisk och genom användning av flera ballastfraktioner efterliknades korngredningen som användes i laboratoriet (se kapitel 5). I fortsättningen betecknas betongreceptet med naturfiller som CBI-recept, det fabriksanpassade betongrecept med en blandning av kalkstensfiller och finballast betecknas som Skanska-recept.

Tabell 6: Betongrecepten som användes vid provgjutning 1. Vattenhalten är korrigerad med vatteninnehållet i tillsatsmedlen.

Recept	Skanska	CBI	Laboratoriet
Mängder	kg/m³	kg/m³	kg/m³
Anläggningscement	440	440	440
Vatten	165	169	169
Naturfiller	-	250	250
Kalkfiller Limus 40	126	-	-
Grus 0-8 mm	-	-	830
Sten 8-16 mm	-	-	554
Fingrus 0-2 mm	274	32,8	-
Grus 0-8 mm	640	753	-
Sten 8-11 mm	295	370	-
Sten 8-16 mm	348	255	-
Luftporbildare	5,72	4,00	4,00
Flytmedel	2,95	2,83	2,83
Viskomedel	1,10	1,50	1,50
vct	0,39	0,40	0,40

Den färskas betongens egenskaper bestämdes i fabriken direkt efter blandning och på plats efter cirka 20 min transport, se Tabell 7. Flytbarheten på plats var bra, det tillsattes extra viskomedel för att höja betongens stabilitet mot utvaskning och säkerställa hög lufthalt vid gjutning under vatten.

Tabell 7: Färskbetongegenskaper, bestämda på plats och i fabrik.

	Flytsättningsmått	Lufthalt
Skanska	mm	%
Fabrik	740	7,5
På plats	780	6,5
+2 liter viskomedel (innan pump)	520	4,5
Efter pump	570	4,6
CBI		
Fabrik	780	9,5
På plats	650	6,6
+1 liter viskomedel (innan pump)	490	3,0*
Efter pump	480	7,0

* sannolikt fel i mätningen m h t lufthalt i den hårdnade betongen.

Lufthalten i den färska betongen var lägre än riktvärdet i OTb på 10 % men låg i närheten av minimivärdet på 8 %. Därför kasserades inte blandningarna. Efter tillsats av viskemedel sjönk den uppmätta lufthalten i den färska betongmassan på plats.

Det togs prover i form av kuber innan betongen pumpades i formen. Efter avformningen borrades cylindrar ut från väggarna, 3 cylindrar på ”pumpsidan” på olika höjder och 3 cylindrar på ”flytsidan” (se Figur 11). Med pumpsidan betecknas den del av väggen där betongen pumpades i formen, flytsidan avser den motsatta sidan väggen dit betongen fick flyta genom vattnet. Cylindrarna 1-3 togs på pumpsidan, cylindrarna 4-6 borrades ut på flytsidan.

I Tabell 8 redovisas lufthalten i den färska och hårdnande betongen, bestämd på prover från flytsidan och kuber. Analyserna gjordes på prover från flytsidan eftersom sannolikheten att upptäcka effekter av vatteninblandning bedömdes vara högre för dessa prover. Lufthalten för alla prover låg över den uppmätta lufthalten i färskbetongen och översteg minimikravet i OTb på 5 % i den hårdnade betongen. Luftporsystemet var välutbildat med små pordiametrar och en liten avståndsfaktor vilket borde ge bra frostbeständighet. I bilaga G redovisas analyser av luftporsystemet på planslip.

Tabell 8: Lufthalt (%) i färsk och hårdnad betong, avståndsfaktor (mm) i parentes. Proverna var cylindrar från flytsidan.

	Skanska		CBI	
	Hårdnad btg.	Färsk btg.	Hårdnad btg.	Färsk btg.
Kub	5,5 (0,201)	4,5	6,6 (0,154)	3,0 *
Nere	8,6 (0,312)	4,6	8,2 (0,254)	7,0
Mitten	8,3 (0,264)	4,6	9,4 (0,228)	7,0
Övre	8,0 (0,175)	4,6	8,8 (0,223)	7,0

* sannolikt fel i mätningen m h t lufthalt i den hårdnade betongen.

Tryckhållfastheten bestämdes på utborrade cylindrar från pumpsidan och flytsidan samt på gjutna kuber. I Tabell 9 redovisas resultat på tryckhållfasthet för kuber gjutna i samband med provgjutningen för det fabriksanpassade receptet (Skanska) och originalreceptet med naturfiller (CBI). Tryckhållfastheten var för alla provtillfällen högre för Skanska-receptet, detta visar effekten av lägre vct och finare kalkstensfiller. Båda recepten klarar kravet för betongklass C32/40 med marginal, det beror på det låga vct som är ett krav vid exponeringsklass XD3.

Tabell 9: Tryckhållfasthet på kuber från provgjutningen efter 7, 14 och 28 dygn.

Ålder dygn	Skanska			CBI		
	Kub nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållf f _{c,cube} MPa	Kub nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållf f _{c,cube} MPa
7	S 1	2340	53,0	C 1	2290	44,5
	S 2	2370	53,5	C 2	2290	43,5
14	S 3	2370	61,0	C 3	2390	64,0
	S 4	2390	61,0	C 4	2350	53,0
28	S 5	2370	69,0	C 5	2310	59,0
	S 6	2390	69,0	C 6	2310	58,5
	S 7	2360	68,5	C 7	2330	62,5

Borrkärnor som togs ur väggarna gjutna under vatten provtrycktes efter 28 dygn, se Tabell 10. Trenden som visade sig vid provtryckning av kuber fortsatte, det fabriksanpassade receptet hade en högre tryckhållfasthet. Alla prover klarar kravet på betongklass C32/40, spridningen är dock större än för gjutna kuber. Det syns en liten inverkan av betongens förflyttning genom vatten, möjligtvis pga vatteninblandning. Samtliga prover på flytsidan har en något lägre tryckhållfasthet än prover från pumpsidan. En annan förklaring kan vara en högre lufthalt i betongen på flytsidan, den lägre densiteten tyder på detta.

Tabell 10: Tryckhållfasthet på borrkärnor diameter 100 mm från provgjutningen efter 28 dygn. Prover från flytsidan kursiv.

Skanska			CBI		
Kärna nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållf f _c MPa	Kärna nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållf f _c MPa
S 1	2420	76,0	C 1	2350	66,5
S 2	2380	72,0	C 2	2340	64,0
S 3	2320	68,0	C 3	2250	61,5
<i>S 4</i>	<i>2270</i>	<i>61,5</i>	<i>C 4</i>	<i>2220</i>	<i>62,5</i>
<i>S 5</i>	<i>2260</i>	<i>59,0</i>	<i>C 5</i>	<i>2160</i>	<i>55,0</i>
<i>S 6</i>	<i>2170</i>	<i>59,0</i>	<i>C 6</i>	<i>2200</i>	<i>58,0</i>

Betongens frostbeständighet bestämdes på utborrade kärnor och kuber, se Tabell 11. Frysprovet förlängdes till 112 fryscykler, vilket vanligtvis används för betong med inblandning av silikastoft. Detta gjordes för att säkerställa att luftporsystemet är tillräckligt

bra med hänsyn till den ökade tätheten med kalkstensfiller. Samtliga prover klarade kravet på mycket god frostbeständighet med saltvatten enligt SS 13 72 44 metod A. Ingen ökning av avskalning efter 56 fryscyklar observerades. Prover från undervattensgjutningen hade lika bra frostbeständighet som gjutna kuber. Det observerades inga skillnader mellan fabriksanpassad betong och originalreceptet.

Tabell 11: Resultat från frysprovning enligt SS 13 72 44 metod A med 112 cykler, kuber och kärnor provades.

Prov märkt	Avflagnat material (kg/m ²) efter cykler									
	7	14	30	42	56	70	84	98	112	
cylindrar	C 4	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	C 5	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	C 6	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	S 4	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	S 5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
	S 6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
kuber	C 8	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	C 9	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	S 8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	S 9	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Jämförelse mellan fabriksanpassat betongrecept (Skanska) och originalrecept (CBI) visade att det inte finns några tydliga skillnader mellan de båda recepten. Betongens stabilitet, tryckhållfasthet och frostbeständighet är jämförbara och uppfyller kraven som ställdes. Det fabriksanpassade receptet uppnår något högre tryckhållfasthet. Med ledning av resultaten bestämdes det att använda det fabriksanpassade receptet i produktionen.

Skillnaden som upptäcktes mellan den uppmätta lufthalten i färsk och hårdnad betong ledde till ett antal provblandningar för att undersöka fenomenet. I Tabell 12 redovisas resultaten för lufthalten i den färska och hårdnade betongen från en provblandning där tillsatsmedel tilläggsdoserades flera gånger. Den uppmätta lufthalten i färskbetongen (mätt av olika provtagare med olika lufthaltsmätare) var i medeltal två procentenheter lägre än lufthalten

som bestämdes på motsvarande hårdnad betong. Bara i ett fall uppmättes något högre lufthalt i den färska betongen än i den hårdnade betongen. Avståndsfaktorn som bestämdes på den hårdnade betongen var liten, detta borde resultera i en betong med bra frostbeständighet. I bilaga G redovisas analyser av luftsystemet på planslip.

Tabell 12. Lufthalt i färsk och hårdnad betong för en provblandning med tilläggsdosering. Avståndsfaktor i parentes i kolumnen hårdnad betong.

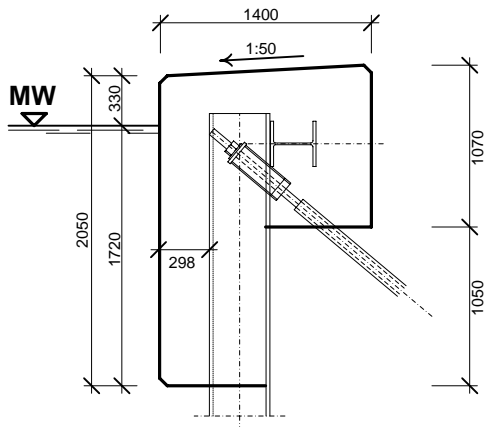
Tid efter blandning	Beteckning	Färsk betong				Kommentar	Hårdnad betong
		FSM	Lufthalt (Skanska)	Lufthalt (CBI)	Densitet		Lufthalt
min		mm	%	%	kg/m ³		% (mm)
0						Blandning	
20	t ₀	780	6,4	6,1	2306		
40	t ₀ [R]			4,8	2388	omrörning	7,0 (0,244)
50	t ₃₀	630	8,5	7,8	2288		9,3 (0,184)
60	t ₃₀ [R]			6,2		omrörning	
60	t ₄₀	575	9,3	8,6	2263	+0,8 l viskomedel	8,3 (0,204)
60	t ₄₀ [R]			7,4	2306	omrörning	10,0 (0,246)
80	t ₆₀ [f]	640	8,5	7,5	2288	+0,45 l flytmedel	10,5 (0,163)
90	t ₆₀ [f] [R]		7,6	6,9	2306	omrörning	8,0 (0,161)

7.2 Fullskaleprovning i vattenfylld container

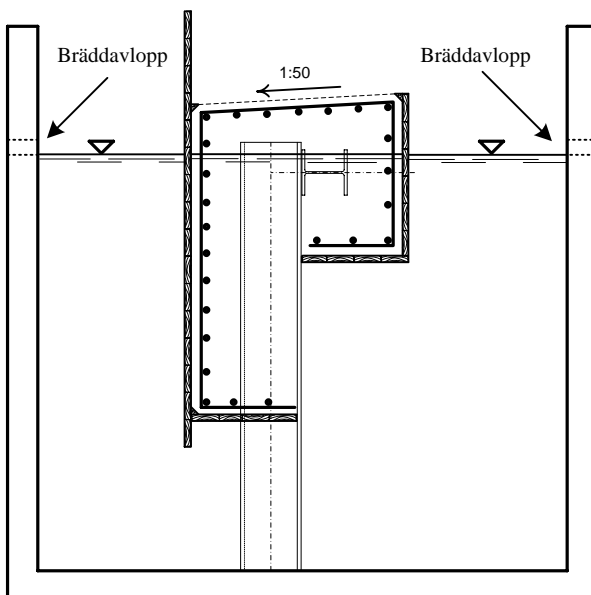
Denna provgjutning föreskrevs i OTb före produktionsstart. Samtliga ingjutningsgods (spont, hammarband, armering, mm) var inkluderade. Provgjutningen skulle visa lämplighet av gjutmetoden och tillåta provtagning från olika delar av konstruktionen. Beställaren ville undvika utbörning av prover från den färdiga krönbalken, all provning skulle utföras på gjutna provkroppar. Därför behövdes korrelering mellan prover från undervattengjuten betong och gjutna kuber i torrhet. Figur 12 visar ett tvärsnitt av provgjutningen, Figur 13 till Figur 21 visar bilder av genomförandet samt resultat.

Provgjutning

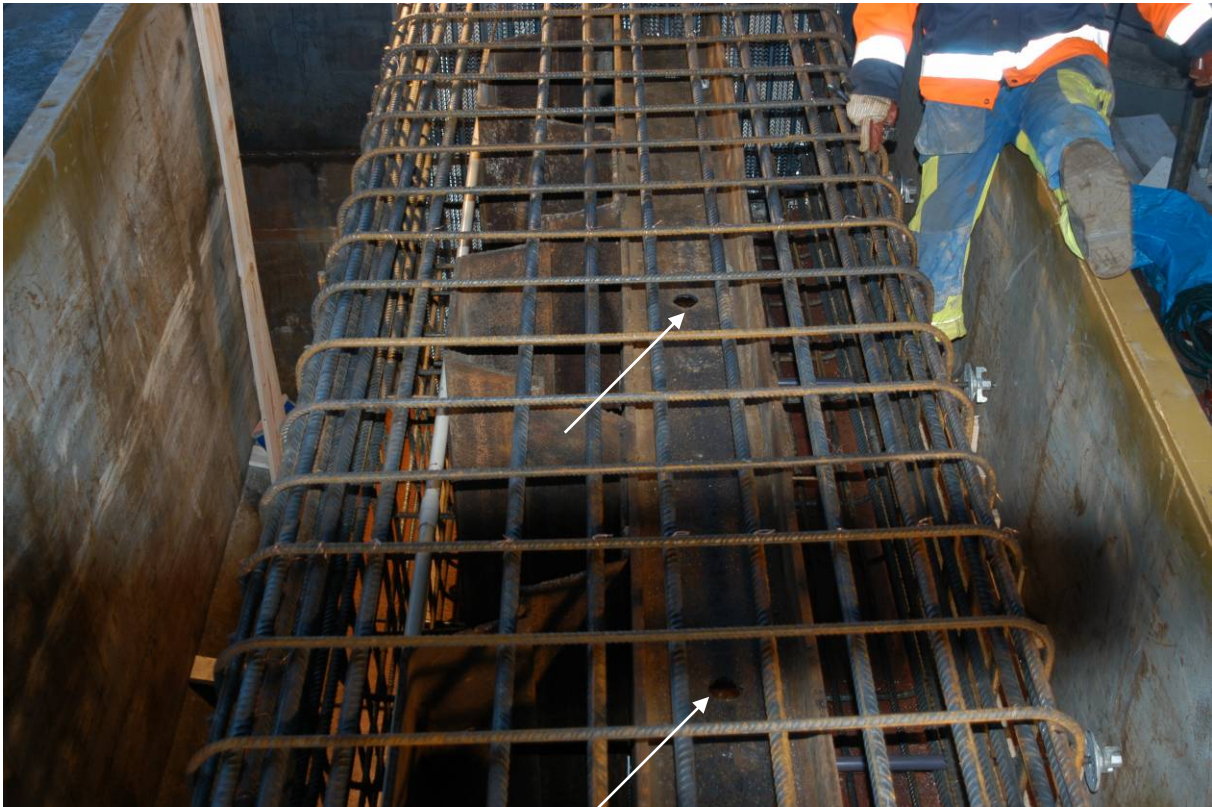
Provgjutningen skall simulera gjutningen av krönbalksavsnitt "Strandpark"



Gjutningen skall utföras i en vattenfylld container, gjutmetodiken enligt skiss, armering enligt armeringsritningar



Figur 12: Tvärsnitt av provgjutningen i vattenfylld container.



Figur 13: Armering, spont och hammarband för fullskalegjutningen. Observera evakueringshål för instängd luft och vatten i hammarbandet.



Figur 14: Delad gjutslang med 2 undervattensventiler.



Figur 15: Formsatt fullskalegjutning, observera vattennivå i underkant hammarband.



Figur 16: Avslutad provgjutning.



Figur 17: Provgjuten krönbalk efter avformning före sågning.



Figur 18: Undersidan av krönbalken med trekantslist i hörnan, mycket bra kvalité av betongytan.



Figur 19: Sågning av provgjutningen, 1 meter från flytsidan.



Figur 20: Sågsnittet, alla ståldetaljer var väl omslutna av betong, ingen stenseparation observerades.



Figur 21: Detaljbild av hammarband och kylrör, komplett omslutna av betong. Inga luftansamlingar eller hålrum upptäcktes. Hammarbandet var deformerat redan före gjutningen.

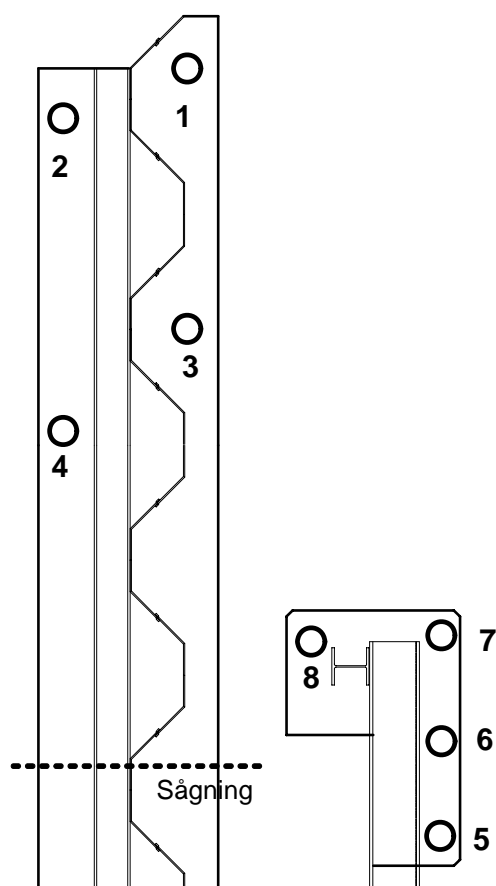
Den färska betongens egenskaper bestämdes i fabriken direkt efter blandning och på plats efter cirka 20 min transport, se Tabell 13. Flytbarheten på plats var bra, det tillsattes extra viskomedel för att höja betongens stabilitet mot utvaskning. I förhållande till föregående provgjutning ökades betongens flytsättningsmått vid gjutning något, detta med ledning av den mera komplicerade geometrin och den goda stabiliteten som observerades tidigare. Lufthalten som bestämdes för den färska betongen var stabil över tiden och bedömdes vara tillräcklig för att uppnå god frostbeständighet i den hårdnade betongen. I bilaga G redovisas analyser av luftporssystemet på planslip.

Tabell 13: Färskbetongegenskaper, bestämda på plats och i fabrik.

	Flytsättningsmått	Lufthalt	Densitet	Temperatur
	mm	%	kg/m ³	°C
Lass 1 - på fabrik	680	5,8		
På plats	620	5,5	2325	13,5
Efter tillägg 1 (Flyt + Stream)	750			
Efter tillägg 2 (Stream)	560			
Lass 2 – på fabrik	720	6,9		
På plats	710	5,7	2260	11,3
Efter tillägg 1 (Stream)	640	6,6		
Efter 25 min	640			
Lass 3 – på fabrik	790	6,5		
På plats	780	5,8	2300	13,0
Efter tillägg 1 (Stream)	620	5,9	2270	

Provgjutningen var problemfri. Lätt vibrering utfördes efter att betongen hade stigit över vattenytan.

Efter att betongen härdats avformades provgjuten krönbalk och en sektion 1 m ifrån flytsidan sågades bort. Cylindrar med en diameter av 100 mm borrades ut enligt Figur 22 för bestämning av tryckhållfasthet, luftporstruktur i hårdnad betong och frostbeständighet.



Figur 22: Provtagning i fullskalegjutningen.

Tabell 14 redovisar lufthalt i hårdnad betong i förhållande till färsk betong samt tryckhållfasthet och densitet. Som observerats tidigare så var lufthalten i den hårdnade betongen högre eller minst lika hög som den lufthalt som bestämdes i den färska betongmassan. Lufthalten var på alla analyserade prover högre än 5 % i den hårdnade betongen och alla analyserade prover hade en liten avståndsfaktor, vilket borde ger mycket bra frostbeständighet. Enligt Fagerlund (1993) bör avståndsfaktorn vara mindre än 0,20 mm för att säkerställa frostbeständigheten vid frysning i saltvatten.

Tabell 14: Lufthalt (%) i färsk och hårdnad betong för kuber och cylindrar, avståndsfaktor (mm) i parentes. Tryckhållfasthet och densitet på kuber och cylindrar.

	Lufthalt		Tryckhållfasthet MPa	Densitet kg/m ³
	Hårdnad btg.	Färsk btg.		
Kub Lass 2	8,1 (0,204)	6,6		
Kub Lass 3	6,0 (0,165)	5,9	69,0	2360
Cyl. 1	6,9 (0,110)		54,0	2040
Cyl. 4	7,2 (0,145)		70,5	2320
Cyl. 5	7,4 (0,157)		58,5	2290
Cyl. 7	5,4 (0,120)		65,5	2230

Tryckhållfastheten uppfyller kraven för betongklass C32/40 med marginal, spridningen är dock rätt stort. Den lägsta tryckhållfastheten observerades på prov 1, samma provkropp har också låg densitet. Detta antyder stenseparation och möjligtvis måttlig vatteninblandning, förmodligen pga att för lite betongmassa avlägsnades efter att betongen hade stigit över vattenytan i samband med glättning.

Tabell 15 redovisar resultat från frysprovningen enligt SS 13 72 44 metod A av utborrade cylindrar från provgjutningen. Frysprovningarna förlängdes till 112 fryscykler, vilket vanligtvis används för betong med inblandning av silikastoft. Detta gjordes för att säkerställa att luftporsystemet är tillräckligt bra med hänsyn till den ökade tätheten med kalkstensfiller. Samtliga prover klarade kravet på mycket bra frostbeständighet med saltvatten enligt standard. Ingen ökning av avskalning efter 56 fryscykler observerades.

Tabell 15: Resultat från frysprovningen enligt SS 13 72 44 metod A 112 cykler.

Prov märkt	Avflagnat material (kg/m ²) efter cykler								
	7	14	30	42	56	70	84	98	112
1	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
4	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01

Figur 23 visar ett planslip för bestämning av lufthalt i hårdnad betong. Luften som introduceras i betongmassan med hjälp av luftporbildare ger ett luftporsystem med mycket små, väl fördelade luftporer som skapar ett expansionsutrymme för vatten vid frysning. Planslipet i Figur 23 är taget på cylinder 7 från flytsidan av provgjutningen. Betongens transport genom vatten hade inga negativa konsekvenser på luftporsystemet.



Figur 23: Planslip av cylinder 7, impregnerad med vit epoxi, för bestämning av lufthalt på hårdnad betong, hög andel fina luftporer med liten avståndsfaktor.

Provgjutningen var lyckad, gjutmetodiken fungerade och samtliga prover uppfyllde kraven. Därmed uppfylldes kraven som ställdes av beställaren i OTb. Entreprenören fick därmed använda sig av det fabriksanpassade betongreceptet och den utprovade gjutmetodiken i utförandet. Samtidigt ingick intensiv provning av färsk och hårdnad betong under utförandet i entreprenaden för att säkerställa kvalitén. Med ledning av de undersökningar som utfördes på provgjutningen kunde man fastställa att all provning skulle utföras på gjutna prover. Uttag av prover genom borring av den färdiga konstruktionen kunde undvikas.

8 Temperatursprickrisk

Sprickor orsakade av betongens värmeutveckling under härdning kan leda till beständighetsproblem. Genom beräkning av sprickrisken och eventuella åtgärder som kylning eller förlängd formrivning kan sprickrisken minskas och uppsprickning undvikas. För att erhålla realistiska resultat i en sprickriskberäkning krävs aktuella materialparametrar för den använda betongen och verklighetsnära tvångsmodellering.

8.1 Materialparametrar

Materialparametrar för hårdnande betong bestämdes för aktuellt betongrecept på LTU. Syftet med undersökningen var att ta fram materialparametrar för beräkning av sprickrisken i samband med betongens hårdnande med hjälp av datorprogrammet ConTeSt Pro. Betongens hållfasthetsutveckling, hydratationsvärme, krymp- och krypegenskaper och utveckling av E-modul provades. Genom att använda provade materialparametrar blir beräkningarna mera verklighetsnära och därmed kan en lägre spricksäkerhetsfaktor tillämpas (Bro 2004, bilaga 4.11). Metodiken och erhållna resultat redovisas i bilaga B.

8.2 3D elastisk tvångsanalys

Skanska utförde teoretiska, elastiska tvångsanalyser med hjälp av en förenklad 3D FE modell som representerade kajkonstruktionen. Analyser, antaganden och resultat finns bifogade i bilaga C. Tvångsfaktorn är ett mått på konstruktionens fastlåsningsgrad och kan variera mellan 1 (fullständig fastlåsningsgrad) och 0 (fri rörelse). För kompletterande information angående tvång och temperatursprickor rekommenderas litteraturen, t.ex. Hedlund (2000). Tvångsanalyserna utfördes med förutsättningen att gjutetappslängden är lika med 8 m. Analysen resulterade i en beräknad dimensionerande tvångsfaktor på 0.12 för gjutetapp 2 och efterföljande 8 m långa etapper. Därmed skulle sprickrisken för en krönbalk pga värmeutveckling och yttre tvång under härdning och krympning vara låg.

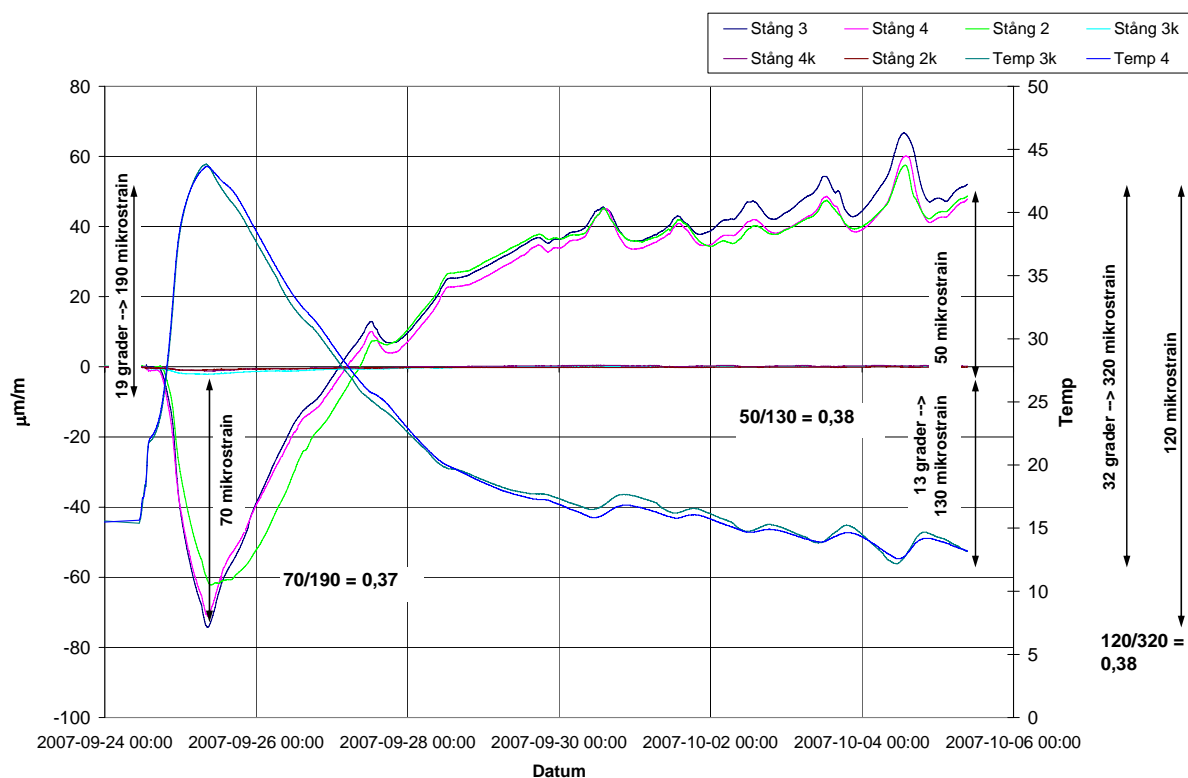
Med anledning av observerade skador på liknande konstruktioner bedömdes därför det teoretiskt beräknade tvånget var en underskattning med hänsyn till den komplexa geometrin och andra svårmodellerade yttre fastlåsnings effekter. En ökad detaljeringsgrad av 3D FE modellen för att fånga upp inverkan av fastlåsnings effekter från anslutande konstruktioner utfördes ej vidare. För bestämning av tvånget verkande på krönbalkarna utfördes i stället töningsmätningar med ingjutna givare, se nästa avsnitt.

8.3 Tvångsmätning

En tvångsmätning utfördes på etapp nr 7 med hjälp av ingjutna töjningsmätare. Som töjningsmätare användes 2 m långa stålstånger med pålimmade trådtöjningsgivare och ändförankringar i ett stålrör. Stålstången kan röra sig fritt i stålröret men utsätts för töjning eftersom den är förankrad i betongen. Töjningsmätningen utfördes temperaturkompenserad. Före mätningen i krönbalken verifierades utrustningen i en 3 m lång provbalk på Solna betongfabrik. Ingjutna töjningsmätare (stålstång) jämfördes med mätning av yttre deformation. Det registrerades ingen töjning i stålstången eftersom provkroppen kunde röra sig fritt, detta indikerar att temperaturkompensationen fungerade korrekt. Mätningen av yttre deformationen visade förlängning under uppvärmningsfasen och förkortning under avsvälning. I denna provning konstaterades att utrustningen fungerade som planerat. Däremot uppstod problem med strömförsörjningen under provningen, mätdata är ofullständiga och kan inte redovisas. Strömförsörjningen kompletterades med batteribackup för att undvika förlust av mätdata vid töjningsmätningen i etapp nr 7. Tre mätstånger med en längd av 2 m göts in i etapp 7 i krönbalken. Figur 24 visar mätstången ovanpå hammarbandet strax före gjutningen. Med hjälp av den uppmätta töjningen i mätstången och samtidigt utförd temperaturmätning kan tvångssituationen i den undersökta sektionen av krönbalken uppskattas.



Figur 24: Mätstång med ändförankring i etapp 7 före gjutning.



Figur 25: Temperatur- och töjningsmätning i etapp 7 av krönbalken. Skala för töjning på vänster sida av digrammet, temperatur på höger sidan.

Figur 25 visar resultat från töjnings- och temperaturmätningen i etapp 7 av krönbalken. Kurvorna för temperatur och töjning har ett förlopp som kan anses vara rimligt för hårdnande betong. Mätningen av töjningen var mycket känsligare än förväntat, t.ex. resulterar avformningen (efter 4 dygn) i en något förminskad töjning i krönbalken och inflytande av förändringar i omgivningstemperaturen blir tydliga. Den teoretiska utvidgningen resp. sammandragningen av stålstången kan beräknas genom att multiplicera uppmätta temperaturförändringar med stålets längdutvidgningskoefficient. Detta ger ett teoretisk värde på töjningen som skulle mätas i stålstången vid 100 % tvång. Den teoretiska töjningen dividerat med den praktiskt uppmätta töjningen i stålstången under respektive uppvärmnings- eller avsvältningsfas ger därmed ett mått på tvånget i konstruktionen. I Tabell 16 sammanställs resultaten av töjningsmätningen och resulterande tvång i konstruktionen.

Tabell 16: Sammanställning tvångsanalys.

	Uppvärmning	Avsvälning	Totalt
Temperaturändring	25°C - 44°C	28°C - 15°C	44°C - 12°C
Temperaturskillnad	-19°C	13°C	32°C
Teoretisk töjning	-190 µm/m	130 µm/m	320 µm/m
Uppmätt töjning	-70 µm/m	50 µm/m	120 µm/m
Tvång = teoretisk töj. / uppmätt töj.	-70/-190=0,37	50/130=0,38	120/320=0,38

Tvånget bestämdes med hjälp av en töjningsmätning till att motsvarar 38 %. En betongkonstruktion som utsätts för tvång i denna storleksordning kan spricka under betongens härdning (Jonasson et al, 2001). Eftersom undersökning av liknande konstruktioner visade på delvis kraftig uppsprickning ansågs att resultaten av töjningsmätningen var mera trovärdiga än FEM beräkningar. Även om resultaten av töjningsmätningen möjligtvis överskattar tvånget så skulle användning av detta tvång generera resultat på säkra sidan i en temperatursprickriskberäkning.

8.4 Temperatursprickriskberäkningar

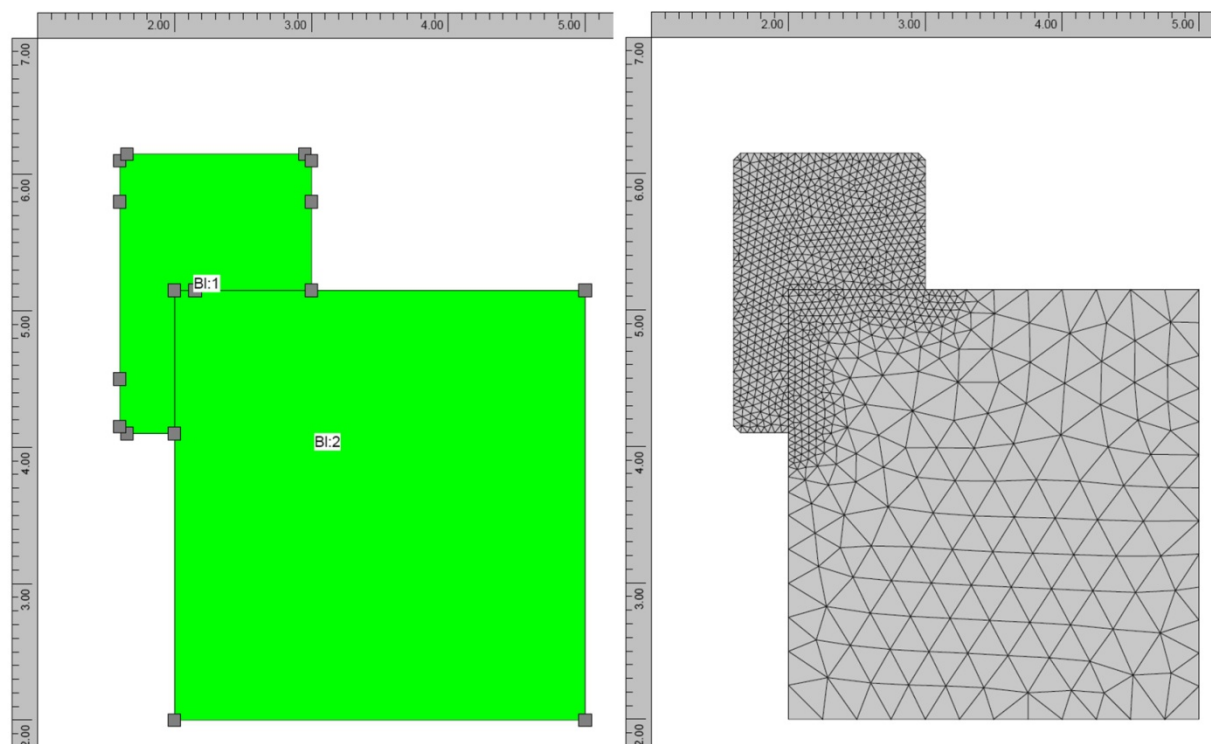
Med provade aktuella materialparametrar för betongen och uppmätt tvång som ingångsvärden utfördes temperatursprickriskberäkningar. Inledande beräkningar med generella materialparametrar för betongen enligt Bro 2004, bilaga 4.11 visade behov av kylning. Genom användning av provade parametrar kan en lägre spricksäkerhetsfaktor enligt Bro 2004 tillämpas. Resultaten av temperatursprickriskberäkningarna visade att kylningsåtgärder inte behövde vidtas och entreprenören hade en mycket större frihet angående formrivningstidpunkt. Tabell 17 sammanställer resultat av utförda temperatursprickriskberäkningar. Bara för vinterfallet var formrivning efter 1 dygn resp. 2 dygn olämplig med hänsyn till risk för tidig uppsprickning i ytan.

Tabell 17: Resultat av temperatursprickriskberäkningar uttryckt som spänningskvot. Risk för ytsprickor i kursiv stil och risk för genomgående sprickor i normal stil i parentes. Maximalt tillåten spänningskvot i aktuell exponeringsklass enligt Bro 2004, Bilaga 4.11 är 0,80.

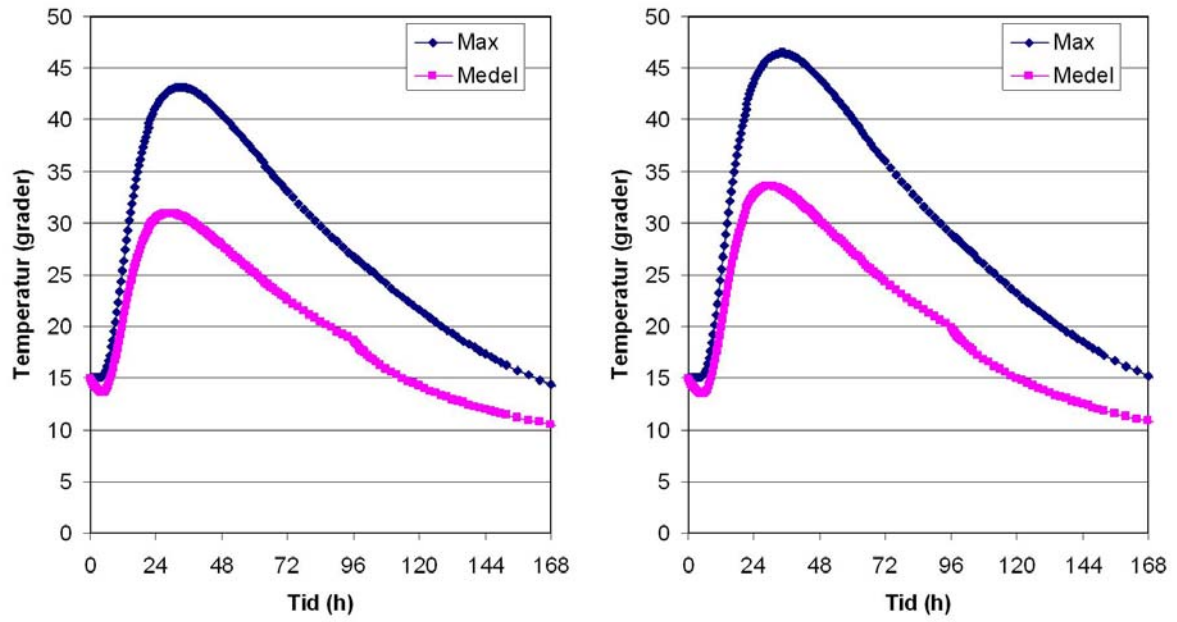
Temperatur (°C)			Formrivning				
Luft	Betong	Vatten/mark	16 timmar	1 dygn	2 dygn	4 dygn	7 dygn
15	20	20	0,52 (0,45)	0,56 (0,44)	0,51 (0,45)	0,45	0,45
15	20	15	0,62 (0,49)	0,65 (0,49)	0,59 (0,50)	0,51	0,50
15	20	10	0,70 (0,53)	0,75 (0,53)	0,67 (0,55)	0,56	0,56
10	15	15	0,46 (0,45)	0,56 (0,45)	0,52 (0,45)	0,46	0,45
10	15	10	0,52 (0,49)	0,65 (0,49)	0,60 (0,50)	0,51	0,51
10	15	5	0,57 (0,53)	0,75 (0,53)	0,69 (0,55)	0,56	0,56
5	15	10	0,51 (0,52)	0,65 (0,52)	0,60 (0,52)	0,53	0,53
5	15	5	0,56 (0,57)	0,75 (0,57)	0,68 (0,58)	0,59	0,58
0	15	5	0,55 (0,60)	0,74 (0,60)	0,67 (0,60)	0,60	0,60
0	15	0	0,46 (0,64)	0,83 (0,64)	0,74 (0,62)	0,65	0,64
-5	15	0	0,44 (0,68)	0,83 (0,68)	0,73 (0,68)	0,68	0,67

I Figur 26 till Figur 28 nedan redovisas beräkningsuppsättning och några resultat för två temperatursprickriskberäkningar för våren (10°C lufttemperatur, 15°C betongtemperatur och

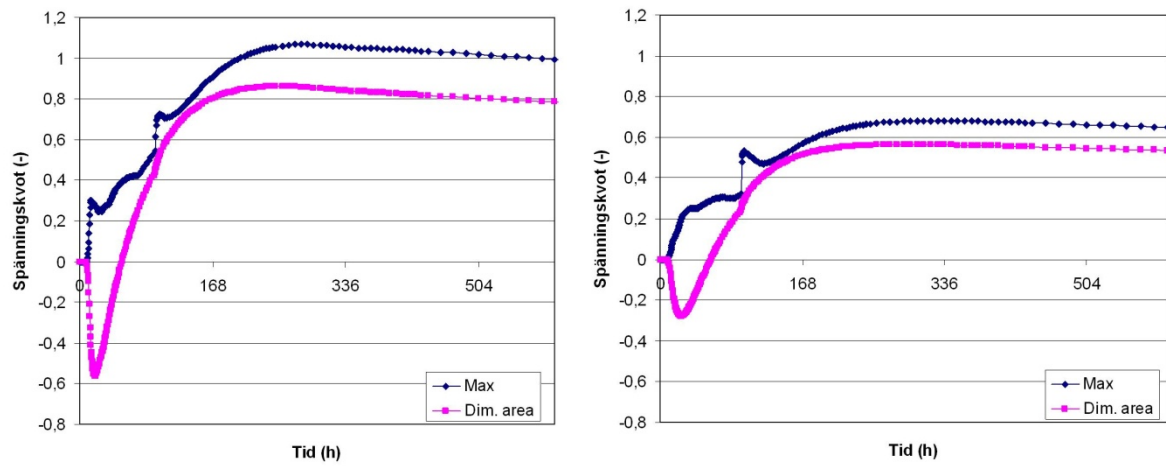
5°C vattentemperatur) med 4 dygns formrivning. Exempel 1 är modellerat med generella betongparametrar för C50/60 betong och i exempel 2 används provade materialparametrar för undervattensbetongen. Tryckhållfastheten i båda betongerna är likvärdig, geometri och tvång är modellerade identiskt. I exempel 1 blir den dimensionerande spänningskvoten maximalt 0,85, vilket betyder att sannolikheten för uppkomst av sprickor är hög. Spricksäkerheten i exempel 1 är 1,18 vilket är lägre än tillåtet, därmed skulle kylningsåtgärder behövas. I exempel 2 blir den dimensionerande spänningskvoten 0,56 vilket motsvarar en spricksäkerhet på 1,79. Spänningskvoten är lägre än tillåtet, ingå åtgärder behövs. Beräkningar utfördes med andra temperaturförhållanden och formrivningstidpunkter för undervattensbetongen, se Tabell 17 för resultat.



Figur 26: Geometri och FEM-nät för temperatursprickriskberäkningar.



Figur 27: Temperaturutveckling i betong C50/60 (vänster) och UV-betong (höger), beräknad med ConTeSt.



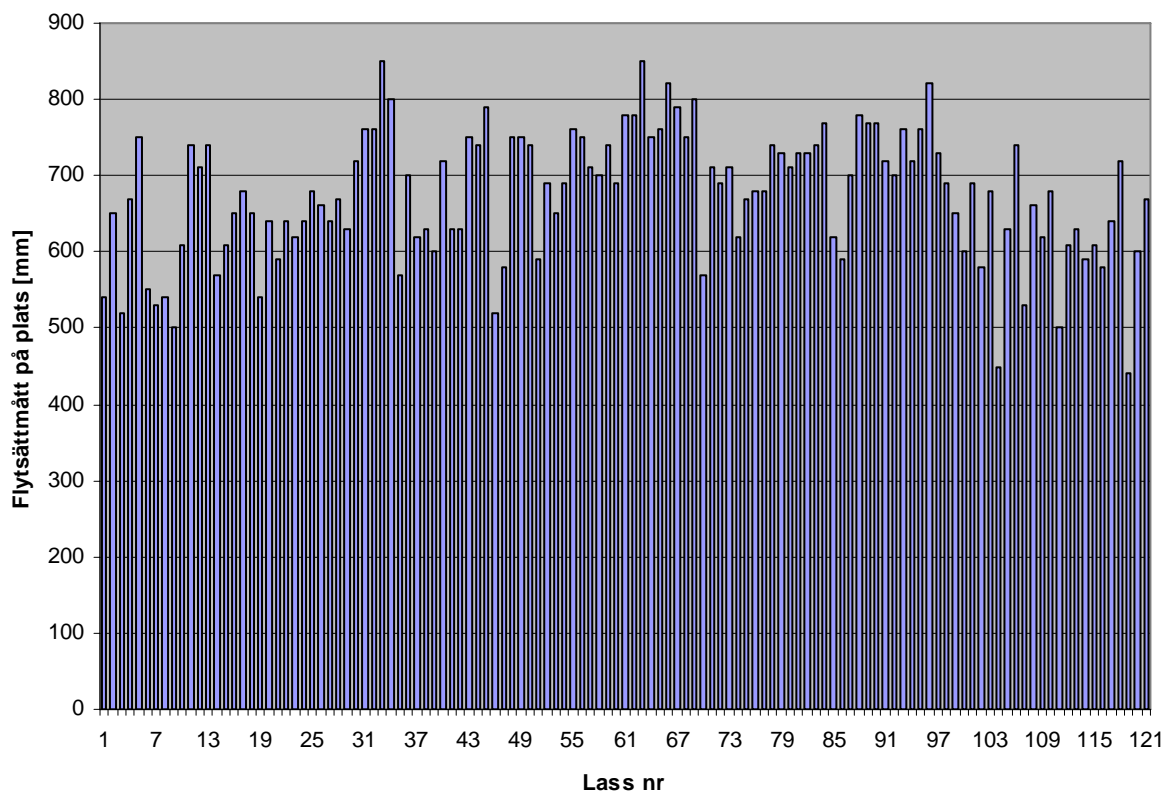
Figur 28: Spänningskvot i betong C50/60 (vänster) och UV-betong (höger), beräknad med ConTeSt.

9 Fortlöpande provning

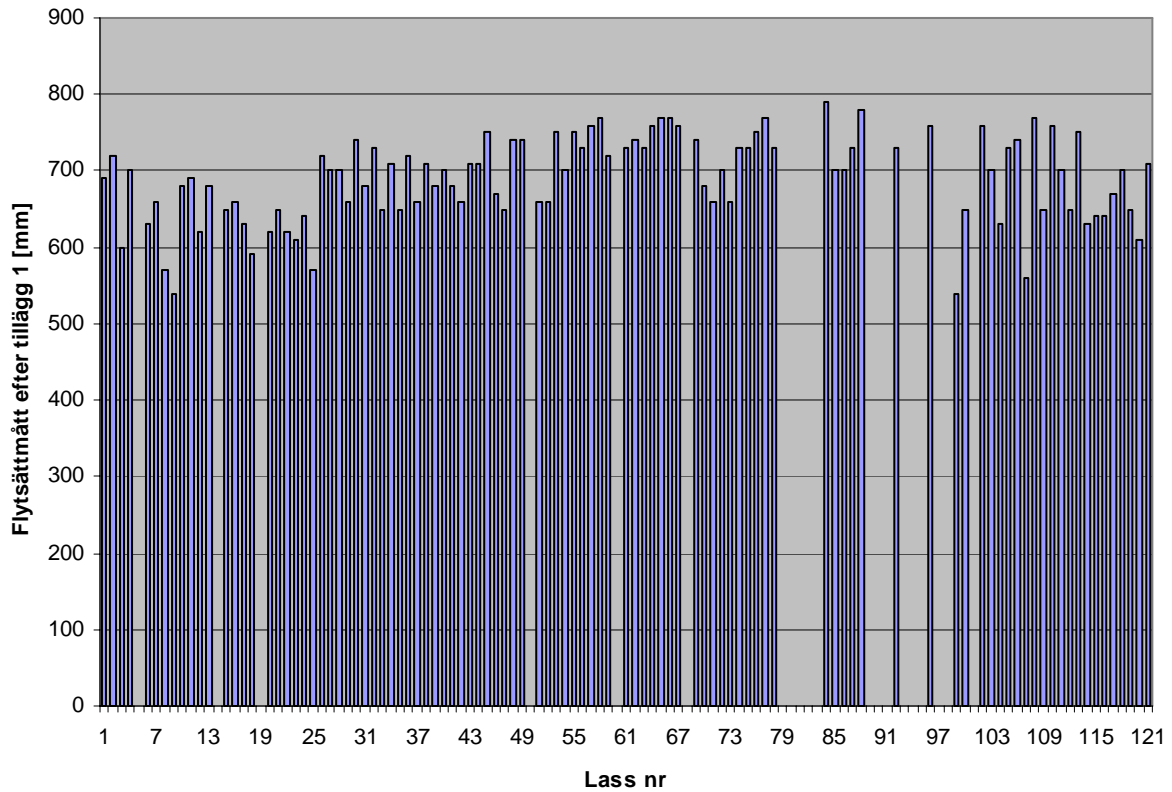
Under projektets gång utfördes intensiv provning av den färska och hårdnade betongen. Provningsomfattning föreskrevs i OTb och var mycket större än för vanliga anläggningskonstruktioner. Anledningen till den utökade provningen var bland annat beställarens krav att inte utföra utborring av prover från den färdiga konstruktionen.

9.1 Färsk betong

Under produktionen provades betongens konsistens och lufthalt på vartenda lass. I fall det var nödvändigt tillsattes extra flytmedel, viskomedel eller båda för att justera konsistensen. Flytsättningsmättet provades på fabrik, efter att betongen kom till arbetsplatsen och efter tilläggsdoseringarna. I bilaga D sammanställs all mätdata. Figur 29 redovisar flytsättningsmättet efter att betongen anlände till bygget. Medelvärdet av alla värden var 674 mm med en standardavvikelse på 85 mm. Det syns ingen trend kopplad till årstiden (gjutningar pågick mellan september 2007 och april 2008), flytsättningsmättet skiftar mellan cirka 450 mm och 830 mm. Efter tilläggsdosering var flytsättningsmättet i medeltal 690 mm med en standardavvikelse på 56 mm, se Figur 30. Spridningen minskades betydligt. Detta förtydligar att kontroll av konsistensen på arbetsplats och lämplig tilläggsdosering av tillsatsmedel behövdes.

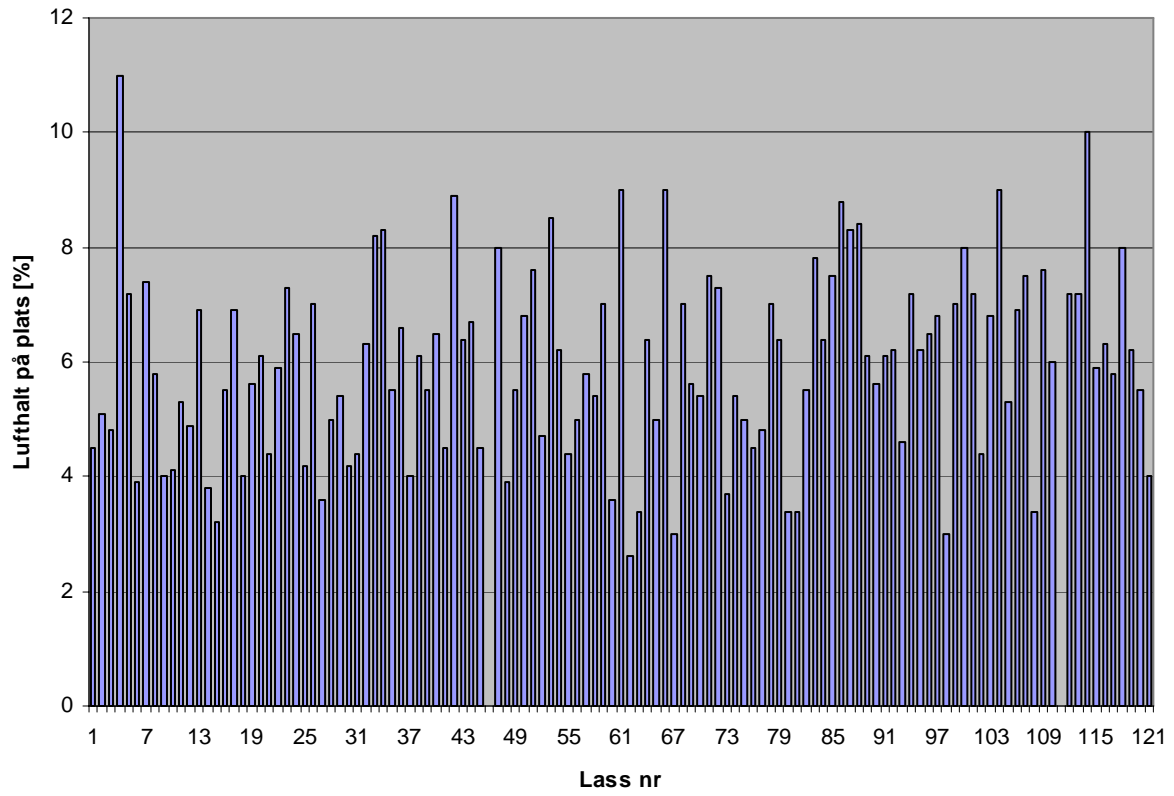


Figur 29: Flytsättningsmätt för alla lass, bestämt på plats.



Figur 30: Flytsättningsmått efter tillägg 1, i vissa fall saknas data.

I Figur 31 redovisas lufthalten i betongen, mätt på arbetsplats. Lufthalten var i medeltal 6,0 % i den färska betongen med en standardavvikelse på 1,6 %. Det är svårare att hålla lufthalten konstant, speciellt om betongen inte tillverkas i någon större omfattning och under en längre tidsperiod i betongfabriken. I föreliggande fall tillverkades 4- 5 lass betong med upp till en veckas mellanrum för varje gjutning. Detta kan knappast anses som regelmässig tillverkning. För några lass uppmättes en lufthalt i den färska betongmassan omkring 3 %. Normalt skulle dessa lass kasseras, det resulterande gjutstoppet bedömdes dock ha allvarigare konsekvenser än den låga uppmätta lufthalten. Frysprovningen av uttagna prover från dessa lass klarade kravet på god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 metod A (se avsnitt 9.2).



Figur 31: Lufthalt för undervattensbetongen, bestämt på plats, i två fall saknas data.

9.2 Hårdnad betong

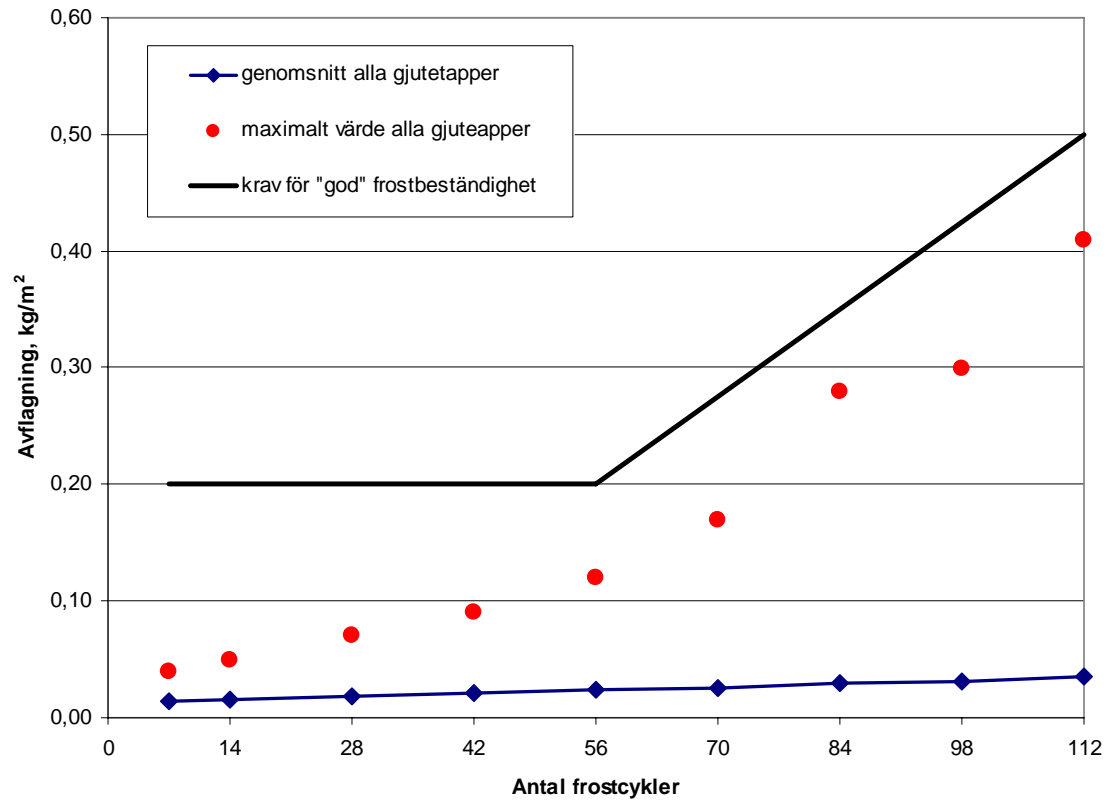
I bilaga E redovisas provresultat för tryckhållfasthet och frostbeständighet på alla 49 gjutetapper av krönbalken. Betongens tryckhållfasthet var i medeltal 67 MPa med en standardavvikelse på 7 MPa. Det lägsta värdet på tryckhållfastheten bestämdes till 51 MPa. Därmed klarar betongen kravet på betongklass C 32/40 med marginal. Detta beror på kravet på det låga vattencementtalet vid exponeringsklass XD3.

I samband med provtagning för bestämning av tryckhållfasthet och frostbeständighet tillverkades planslip för bestämning av lufthalt på den hårdnade betongen för etapp 1 till 6, se Tabell 18. Lufthalten i den hårdnade betongen låg mellan 4,6 % och 9,4 %. Provet med 4,6 % luft togs i etapp 5, lufthalten kan anses vara något låg. Frostprovnings på motsvarande provkropp visade dock att betongen klarar kravet på bra frostbeständighet efter 112 cykler (se bilaga E). I bilaga F redovisas analyser av luftporsystemet på planslip.

Tabell 18: Lufthalt på hårdnad betong för etapp 1-6, löpande produktion.

Etapp	Lufthalt (%)	Avståndsfaktor (mm)
1	8,6	0,21
2	6,6	0,19
3	9,0	0,17
4	9,4	0,15
5	4,6	0,26
6	5,4	0,21

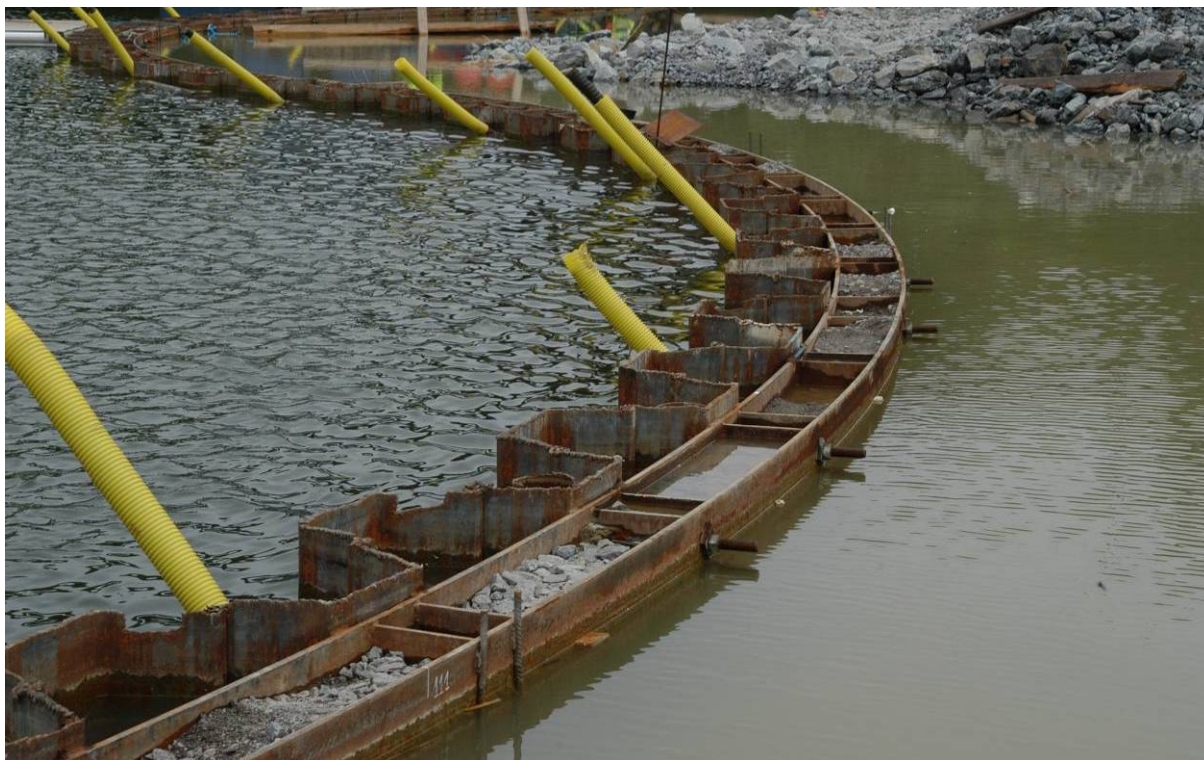
I Figur 32 redovisas medel- och maximalvärdet på frostavskalning för prover från alla gjutetapper. I medeltal klarar alla provade prover kravet på ”mycket god” frostbeständighet. Det fanns 3 prover som hade en något större avskalning men klarar fortfarande kravet på ”god” frostbeständighet. Dessa prover hade samtidigt högsta tryckhållfastheten, detta tyder på att lufthalten i betongmassan var lägre.



Figur 32: Utvärdering av provning av frostbeständighet enligt SS 13 72 44 metod A 112 cykler för prover från 49 gjutetapper.

10 Produktion

Bilderna nedan visar några steg under produktionen som pågick mellan september 2007 och april 2008.



Figur 33: Spontlinje, innan krönbalksgjutningarna började.



Figur 34: Gjutning med dubbla pumpslangar, en på insidan en på utsidan spont.



Figur 35: Gjutning avslutad.



Figur 36: Etapp 1 till 10 är gjutna.



Figur 37: Alla gjutningar avslutade.

11 Slutsatser

SBUF projektet 11940 hade syftet att utveckla och förbättra produktionsmetoder för byggandet av beständiga kajkonstruktioner genom användning av undervattensgjuten frostbeständig betong. Objektet som beskrivs i rapporten (krönbalk Hornsbergs Strand fd kv Kojan) hade till stora delar inte kunnat utföras med traditionella produktionsmetoder.

Projektet delades upp i olika steg. I första steget utvecklades ett betongrecept i laboratoriet med god separationsbeständighet vid flöde genom vatten och förhöjd lufthalt för att säkerställa frostbeständigheten. Detta betongrecept användes som underlag i entreprenadhandlingarna. Provgjutningar genomfördes för att anpassa det föreslagna betongreceptet till produktionen. I en fullskaleprovgjutning demonstrerades utförandemetodens lämplighet. Genom bestämning av fullständiga materialparametrar för betongen och tvångsmätningar i konstruktionen kunde realistiska temperatursprickriskberäkningar genomföras. Detta resulterade i att åtgärderna för att erhålla en sprickfri konstruktion kunde minskas drastiskt. Intensiv provning av den färska och hårdnade betongen användes för att kvalitetssäkra utförandet.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att användning av undervattensgjuten frostbeständig betong inte bara möjliggjorde utförandet av konstruktionen, utan också gav en vinst för både beställaren och entreprenören i form av en beständig konstruktion med förenklat utförande.

Referenser

ACI (1998): Guide to Underwater Repair of Concrete, ACI report 546.2R-98, American Concrete Institute, 1998.

BBK 04, Boverkets handbok om betongkonstruktioner.

BETONGHANDBOK (1992): Arbetsutförande, utgåva 2 – projektering och byggande, AB Svensk byggtjänst och Cementa AB, 1992.

BRO 2004 publ. 2004:56, Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar.

FAGERLUND, G.: The critical spacing factor. Report TVBM-7058, Lund, 1993.

HALLORAN P J, TALBOT K H (1943): The properties and behaviour underwater of plastic concrete, ACI Journal, proceedings 1943 (39).

HEDLUND, H.: Hardening concrete – measurement and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses, Doctoral thesis 2000:25, Luleå Tekniska Universitet, Luleå,

JONASSON, J.-E.; WALLIN, K.; EMBORG, M.; GRAM, A.; SALEH, I.; NILSSON, M.; LARSON, M.; HEDLUND, H.: Temperatursprickor i betongkonstruktioner, Del D, Teknisk rapport LTU 2001:14, Luleå, 2001, ISSN 1402-1536.

KHAYAT K H (1995): Frost Effect of Antiwashout admixtures on Fresh Concrete Properties, ACI Materials Journal, Vol 92, No 2, 1995.

KHAYAT K H (1995): Frost Durability of Concrete Containing Viscosity-modifying Admixtures, ACI Materials Journal, Vol 92, No 6, 1995.

McDONALD J E, NEELY B (1999): Underwater Concrete Placement: Materials, Methods and Case Studies, in proceedings of the International Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Constructions, Dundee, Scotland, 1999.

MOON H-J, SHIN K-J (2007): Frost attack resistance and steel bar corrosion of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol 21, 2007.

NANAUMI T, AYUTA K, YAMAKAWA T (1999): Effect of blast-furnace slag on frost resistance and compressive strength of antiwashout underwater concrete containing plastic micro-spheres, *JCA Proceedings of Cement & Concrete*, Vol 53, 1999.

SLATER D (2002): Marine and Underwater Concrete – Buildability and Durability, in proceedings of the International Conference on Concrete for Extreme conditions, Dundee, Scotland, 2002.

SONEBI M, K KHAYAT K H (2001): Effect of Mixture Composition on relative strength of Highly Flowable Underwater Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol 98, No 3, 2001.

Bilagor

Bilaga A: Objektteknisk beskrivning (OTb), utfört av CBI, 19 s.

Bilaga B: Bestämning av materialparametrar för betongen, utfört av LTU, 18 s.

Bilaga C: 3D elastisk tvångsanalys, utfört av Skanska, 15 s.

Bilaga D: Temperatursprickriskberäkningar, utfört av CBI, 45 s.

Bilaga E: Resultat fortlöpande provning färskbetong, utfört av CBI och Skanska, 14 s.

Bilaga F: Resultat fortlöpande provning hårdnad betong, utfört av CBI, 3 s.

Bilaga G: Resultat av luftporanalyser på hårdnad betong, utfört av CBI, 31s.