



## **Klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong utan kylbehov**

Downloaded from: <https://research.chalmers.se>, 2026-04-04 00:57 UTC

Citation for the original published paper (version of record):

Nordström, E., Löfgren, I., Gil Berrocal, C. (2022). Klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong utan kylbehov. *Bygg och teknik*, 6/2022

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

# Klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong utan kylbehov

Foto: Kent Nilsson, NCC



Gjutning av kranfundament i Lilla Edet.

Sedan 2021 pågår byggfasen i ett projekt med fokus på flödesanpassning och delförnyelse av utskovsdammen vid Vattenfalls anläggning Lilla Edet i Göta älv. Till den nya dammdelen kommer cirka 8000 m<sup>3</sup> betong att användas under uppförandet. För att minska koldioxidavtrycket från den betong som ska användas och för att reducera risken för temperaturrelaterad sprickbildning har en klimatförbättrad betong med mindre cement utvecklats.

## Mindre cement ger klimatförbättrad betong och sänkt risk för temperatursprickor

Vid cementtillverkning genereras stora utsläpp av koldioxid och att minska cementinnehållet i anläggningsbetong ger därför en direkt sänkning av klimatbelastningen från nyproducerad betong. Ett sätt

att minska cementmängd och värmeutveckling internationellt, är att använda bi-produkter som har puzzolana egenskaper (reagerar tillsammans med cement).

Gjutning av grova betongkonstruktioner ställer vidare stora krav på hantering av den temperaturutveckling som uppstår inne i betongen vid hydrataion av cementet vilket annars kan ge sprickbildning följt av bland annat potentiella beständighetsproblem. Idag är det vanligt med kostsam efterkylning via kylrör inne i de grova betongkonstruktionerna för att



**Erik Nordström**  
Vattenfall AB, Research & Development



**Ingemar Löfgren**  
Thomas Concrete Group AB, C-lab



**Carlos Gil Berrocal**  
Thomas Concrete Group AB, C-lab

dämpa temperaturökningen och minska risken för sprickbildning. Även här ger reduktionen av cementmängden således en reducerad sprickrisk.

Inför starten av Lilla Edet-projektet har Vattenfall R&D undersökt olika metoder för att reducera mängden cement i anläggningsbetong och därigenom minska såväl klimatbelastningen som behovet av kylning i grova anläggningskonstruktioner. Målsättningen har varit att definiera ett klimatförbättrat betongkoncept färdigt att implementeras vid byggstart. Detta under förutsättning att bibehållen eller förlängd livslängd kan säkerställas på konstruktionerna samt att det ur produktionssynpunkt är ett robust betongkoncept som inte ger störningar och kostnadsökningar i byggfasen.

## Från examensarbeten till fullskaliga provgjutningar

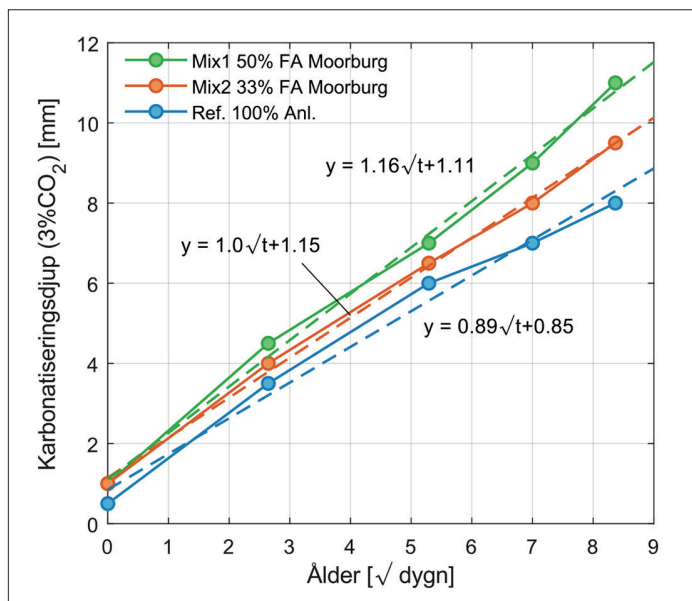
Genom examensarbeten (till exempel [1], [2]), eget teoretiskt och praktiskt utvecklingsarbete [3] har bland annat inverkan av ersättning av cement med olika tillsatsmaterial och ökad största stenstorlek provats för att reducera cementmängden. Inverkan på temperaturutveckling, mekaniska egenskaper, frostbeständighet och känslighet för karbonatisering jämfört med traditionell vattenbyggnadsbetong har studerats.

Alla provade tillsatsmaterial (flygaska, slagg, trass och silika) kan ersätta delar av cementet med bibehållen, eller högre, hållfasthet samt reducerad värmeutveckling och sänkt koldioxidavtryck. Effektivast och lämpligast i vattenbyggnadsmiljö visade sig flygaska från stenkolpulvereldade kraftverk (härefter kallad flygaska) vara. Enligt regelverken finns dock begränsningar i hur stor andel av cementet som får ersättas med hänsyn till hållfasthet och beständighet vid olika exponeringsklasser.

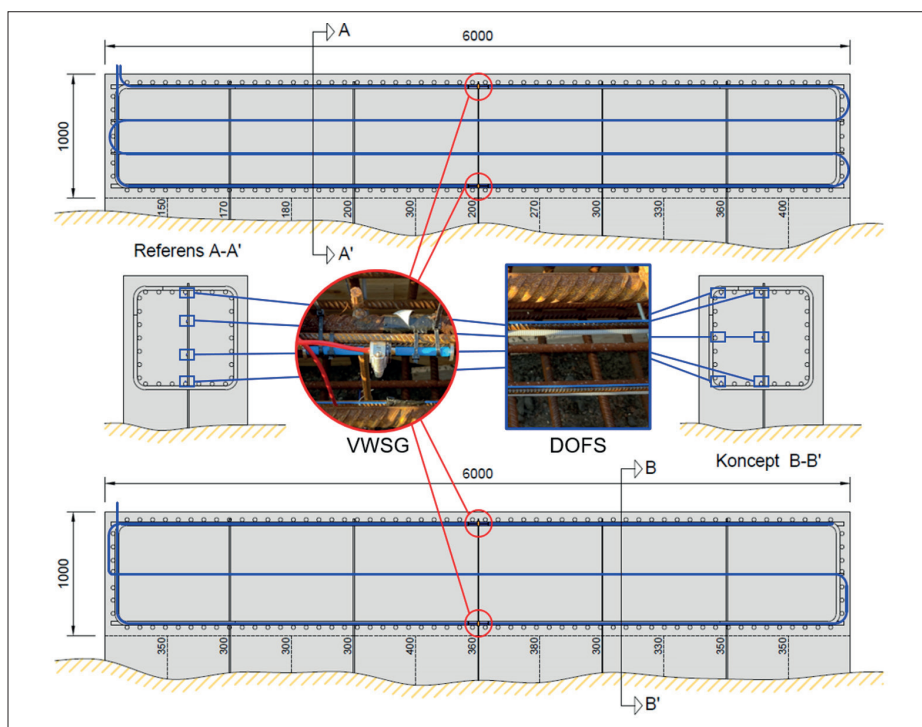
I betongmixen som ska användas i Lilla Edet kommer kvoten mellan mängden flygaska och cement vara ungefär 0,5

Mix	$K_{acc}$ [mm/ $\sqrt{t}$ ]	$K_{nat}$ [mm/ $\sqrt{t}$ ]	Karbonatiseringsdjup 100 år [mm]
Referens anl. vct 0,50	0,89	2,57	26
50% FA vct <sub>ekv</sub> 0,50	1,16	3,34	33
33% FA vct <sub>ekv</sub> 0,49	1,00	2,88	29

**Tabell 1:** Karboniseringshastighet (accelererad och naturlig) samt beräknat karboniseringsdjup efter 100 år (vid 57% relativ fuktighet).



**Figur 1:** Karboniseringsdjup vid accelererad karbonisering enligt SS-EN 12390-12.



**Figur 2:** Geometri och position för sensorer i fullskaliga provkroppar.

(<0,33 enligt standard) och största stenstorlek kommer vara 45 mm mot det idag vanligaste 16 eller 27 mm. Det kommer tillsammans ge en reduktion motsvarande cirka 25-30 procent på värmeutvecklingen, och behovet av kylrör för att minska sprickrisken kommer i de flesta gjutetapper elimineras helt vilket ger en betydande kostnadsbesparing och en klar förbättring av arbetsmiljön. Den minskade cementmängden kommer ge cirka 20 procent reduktion av CO<sub>2</sub>-avtrycket.

För att säkerställa att det utvecklade

betongkonceptet funkar i praktiken och med en fullskalig produktionsapparat har utvecklingen av betongkonceptet tagits vidare tillsammans Thomas Concrete Group och NCC med justering av mixdesign till lokalt tillgängliga material.

#### Laborierprovnings av produktionsmix

Det produktionsanpassade betongkonceptet testades med hänsyn på karboniseringshastighet (SS-EN 12390-12) och frostbeständighet (SS 137244). Accelererad karbonisering innebar att prover

lagrades i en kammare med 3.0 procent CO<sub>2</sub> (jämfört med 0,4 procent som är den naturliga koncentrationen). Vid provningarna användes två olika inblandningsnivåer av flygaska, en hög andel som var 50 procent av cement vikten och en lägre andel som var 33 procent av cementvikten. I SS-EN 206 tillåts att flygaskan medräknas i ekvivalent vatten-cementtal med en k-faktor som är 0,4 men enbart för en andel som är max 33 procent av cementvikten, det som överstiger får inte medräknas. Anledningen till att prova betongens karboniseringsmotstånd är att flygaska förbrukar kalciumhydroxid i den puzzolana reaktion som sker och med höga halter så kan karboniseringshastigheten påverkas negativt [4].

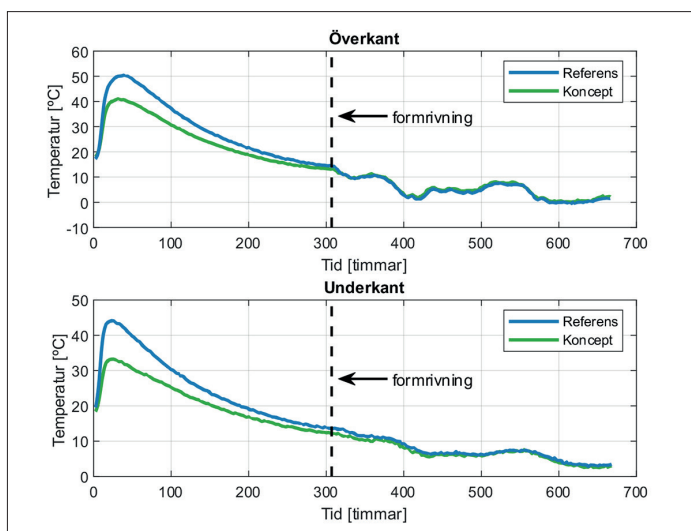
Karboniseringsdjupet vid provningen visas i figur 1 och i tabell 1 redovisas karboniseringshastigheten och det beräknade karboniseringsdjupet efter 100 år. Med 33 procent flygaska så ökade karboniseringshastigheten/-djupet med 12 procent och med 50 procent var ökningen 27 procent. Det bör påpekas att karboniseringshastigheten är för 57 procent relativ fuktighet (som används i SS-EN 12390-12 och vid ett högre RE, som är att förvänta i konstruktionen så blir hastigheten lägre. I studierna har det påvisats att begränsningarna vid användning av flygaska med avseende på hållfastheten är onödigt strama, och så även för beständighet när det gäller vattenbyggnadsbetong i utomhusmiljö.

För frostprovningen, med färskvatten, så var avlagningen mycket låg – vilket i och för sig är att förvänta – och det är heller ingen tendens till någon accelererande avlagning. Det är inga större skillnader mellan 33 och 50 procent flygaska, även om den senare faktiskt fick lite lägre avlagning.

#### Fullskalig provgjutning

Som ett slutgiltigt test genomfördes även en demonstrationsgjutning i full skala. Det gav möjlighet att provpumpa betongen en längre sträcka och att betongarbetare fick möjlighet att prova arbeta med betongen för att utvärdera om egenskaperna rent praktisk var acceptabla. Två 6 meter långa och 1 meter breda provkroppar göts, en med en referensbetong och en med konceptbetongen. Provkropparna göts mot marken och armerades med Ø32 stänger, s 100 mm runt om, samt Ø32 byglar längs hela längden.

Demonstrationsgjutningen gick utmärkt utan pumpstopp och med mycket nöjda betongarbetare. Samtidigt gjordes uppföljning av temperaturutveckling och töjningar under hårdnandet med hjälp av en kombination av distribuerade fiberoptiska



Figur 3: Uppmätta temperaturutveckling i mitt tvärsnitt för referens- och konceptbetong.

sensorer (DOFS) och vibrerande trådtöjningsgivare (VWSG) i samverkan med Chalmers Tekniska Högskola.

Fiberoptiska mätningar genomfördes vid olika höjder längst huvudarmeringen medan vibrerande trådtöjningsgivare installerades på över- och underkantarmeringen i mitt-tvärsnittet. Geometrin av provkropparna samt positionen av sensorerna visas i figur 2.

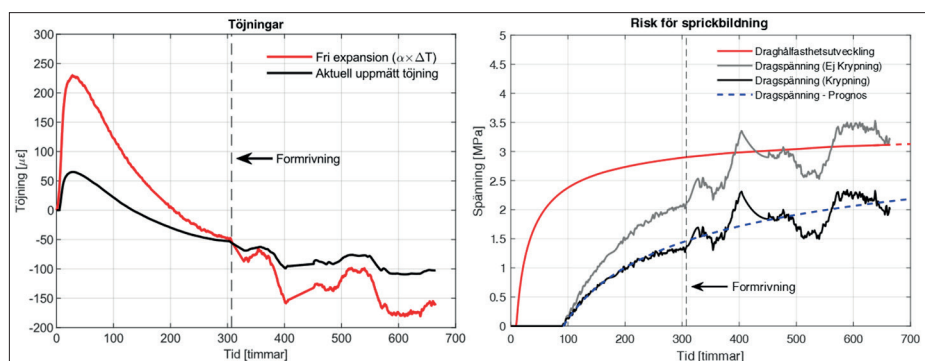
Direkt efter gjutning installerades 50 mm tjocka skivor stenull på sidorna och ovasidan för att simulera förutsättningarna i ett betongelement med representativ tjocklek. Formen och stenullen satt kvar cirka 13 dagar då formrivning skedde. I figur 3 jämförs temperaturutvecklingen vid överkanten och underkanten i mitt-tvärsnittet för både referens och konceptbetongen.

Resultaten visar att maxtemperaturen i referensbetongen nådde 50.4°C och 44.2°C vid överkanten respektive underkanten. För konceptbetongen var den maximala uppmätta temperaturen i samma positioner 41°C respektive 33.4°C, vilket innebär en sänkning av maxtemperaturen i betongen med cirka 19 procent och 24 procent. Därför visar temperaturmätningar att användningen av konceptbetongen är ett effektivt sätt att minska behovet av kylning.

Dessutom kan töjningsmätningarna ge ytterligare insikt om risken för sprickbildning. I figur 4 (vänster) jämförs den uppmätta töjningen i övre armeringen med den teoretiska töjningen orsakad vid fri temperaturrörelse i samma position, vilket ger en uppfattning om graden av tvång i elementet. Samtidigt kan utvecklingen av dragspänningar i betongen beräknas utifrån dessa kurvor och jämföras med den förväntade utvecklingen av draghållfasthet för att uppskatta risken för sprickbildning, se figur 4 (höger).

Tidpunkten när dragspänningarna börjar byggas upp definieras genom att identifiera den temperatur när den termiska kontraktionen i betongen är lika med den elastiska delen av den termiska expansionen [5]. Därefter beräknas dragspänningarna som skillnaden mellan de totala (uppmätta) och de termiska (teoretiska) töjningarna multiplicerad med betongens elasticitetsmodul. Observera att efter formrivningen måste krymptöjningarna läggas till de termiska töjningarna.

Temperaturmätningarna användes även för att uppskatta utvecklingen av tryckhållfastheten med hjälp av mognadsmetoden baserad på Arrhenius-funktionen. Därefter beräknades de härledda egenskaperna (draghållfasthet, elasticitetsmodul) utifrån de teoretiska sambanden



Figur 4: Aktuell uppmätt töjning på övre armeringen i konceptbetongen och teoretisk töjning vid fri temperaturrörelse (vänster). Uppskattad risk för sprickbildning baserad på töjningsmätningar (höger).

som anges i Eurokod 2. Slutligen justerades de erhållna dragspänningarna för att ta hänsyn till effekten av krypning, vilket gjordes inkrementellt genom att beakta spänningsökningen i varje tidssteg. Resultaten visar a risk för sprickbildning i konceptbetongen är acceptabel där spänningskvot är ca. 0.67 efter 28 dagar.

### Implementering i byggskedet

Under byggfasen kommer ett fortsatt gott samarbete mellan beställare, konstruktör, betongtillverkare och entreprenör vara helt avgörande för att nå ett bra slutresultat. Även om demonstrationsgjutningarna i full skala gick utmärkt måste det finnas en beredskap för eventuella justeringar under projektet då betongens egenskaper kanske inte alltid förändras på exakt samma sätt som konventionell vattenbyggnadsbetong. Det kan till exempel förväntas att betongens egenskaper ändras något mer av omgivningstemperaturen. Längre bindetid och trögare konsistens vid låga temperaturer och tvärt om vid höga omgivningstemperaturer. Det kan påverka behovet av justering av mängden tillsatsmedel, isolering/härdning eller glättnings- och formrivningstider till exempel

Löpande mottagningskontroll för att säkerställa att kraven på lufthalt för god frostbeständighet upprätthålls är en annan viktig kvalitetskontroll vid användning av flygaskabetong. Orsaken är att variationer i restkolhalten kan finnas även om gränsvärdet för maximal halt inte överskrids, vilket kan påverka effekten av de luftporbildande tillsatsmedlen. Konstruktören har även behövt anpassa armeringen i konstruktionen (ökat minsta avstånd) för att den större största stenstorleken ska kunna fungera, samt planera för gjutluckor i armeringen så att den något grövre gjutslangen kan stickas ned. ■

### Referenser

- [1] S. Lagundžija och M. Thiam, Temperature reduction during concrete hydration in massive structures, KTH Betongbyggnad, TRITA-BKN. Master Thesis 514, Stockholm, 2017.
- [2] D. Hofgård och J. Sundkvist, Climate enhanced concrete in the civil engineering industry, KTH Betongbyggnad, TRITA-ABE-MBT-20410, Stockholm, 2020.
- [3] E. Nordström, Temperaturrelaterade sprickor i vattenbyggnadsbetong – alternativa metoder för riskreduktion, KTH Betongbyggnad, rapport nr. TRITA-ABE-RPT-1910, Stockholm, 2019.
- [4] K. Bohlin och R. Snibb, Karbonatisering av slagg- och flygaskabetong - och dess inverkan på transportegenskaper, Bygg & Teknik, pp. 48-52, 7 2016.
- [5] B. Engstrom, Restraint cracking of reinforced concrete structures, Chalmers Tekniska Högskola, Report 2007:10, Ed. 2014, s. 90-91., Göteborg, 2007.