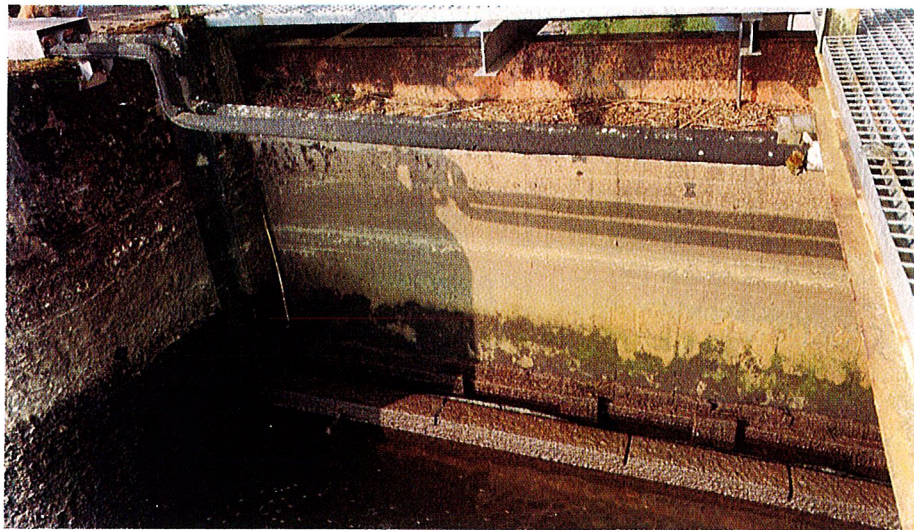


Betong för vattenkraftsbyggnation

- utvärdering av slaggbetong efter 10 års exponering



Uppströmsvy av isutskovet. Till vänster slaggbetong och till höger anläggningsbetong. Magasinet avsänkt för provtagning.

Framtidens cement och betong kommer innehålla lägre andel ren portlandklinker, men exakt vilka bindemedel eller kombinationer av bindemedel som kommer finnas på marknaden i Sverige och därmed tillgängliga för vattenkraftens konstruktioner får framtiden utvisa. Intensiv forskning och utveckling pågår världen över med vulkanaska, flygaska från annan förbränning än kolkraftverk, slagg, kalksten, kalcinerad lera etc. Tillgången till väl beprövade rena portlandcement såsom Anläggningscementet kommer dock vara högst begränsad. Vattenkraftsbranschen måste därför följa med i utvecklingen och skaffa så mycket långtidserfarenheter som möjligt om alternativa bindemedel för att även framöver kunna bygga beständiga betongkonstruktioner. Denna artikel sammanfattar kortfattat resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk.

År 2013 göts isutskovet vid Unipers anläggning Skogsforsen i Ätran igen med två betongkvaliteter, dels med idag tra-

ditionell vattenbyggnadsbetong med Anläggningscement (CEM I) och dels med betong med inblandning av mald granulad masugnsslagg och cement med kalksten (CEM II/A-LL). Samtidigt tillverkades 5+5 provpaneler av samma betongkvaliteter som placerades på dammens uppströmssida i vattenlinjen. Nu efter cirka 10 års exponering är det tid för en första utvärdering av denna gjutning och de provpaneler som utplacerades. Det övergripande syftet med projektet är att öka kunskapen kring beständighetsaspekter då portlandklinker ersätts med alternativa bindemedel. Undersökningen begränsas

till betong med slagg och kalkstensfyller men kan tillsammans med andra pågående fältförsök såsom långtidsexponeringen i Älvkarleby (Nordström och Bryne, 2021) ge en delmängd till en ökad förståelse.

Material och konstruktion

Två betongtyper användes, dels en referensbetong med Anläggningscement och en betong med slagg. Den betong med slagg som användes vid Skogsforsen var framtagen för att ha motsvarande värmeutveckling som en traditionell vattenbyggnadsbetong med Anläggningscement. För att uppnå detta användes Byggcement Skövde (CEM II/A-LL 42,5 R) i kombination med slagg och där andelen slagg var 29 procent av totalt bindemedel. Byggcement Skövde innehåller upp till 20 procent kalkstensfyller. Den bindemedelskombination som användes motsvarar således ett CEM II/C-M (S-LL) enligt SS-EN 197-5.

Referensbetongen med Anläggningscement har $v_{ct} = 0,42$ och hållfasthetsklass C32/40. Betongen med slaggcement har $v_{ct_{ekv}} = 0,44$ och hållfasthetsklass C32/40. Betongsammansättning framgår av Tabell 1.

Provpaneler

Provpaneler tillverkades i samband med igengjutningen av isutskovet i december 2023. Totalt tillverkades 5+5 provpaneler som placerades på dammens uppströmssida så att de vid normal drift sitter i vattenlinjen. En panel av respektive kvalitet togs upp för vidare analys i maj 2023, det vill säga cirka 9,5 år efter gjutning.

Resultat urlakning

Urlakningen kontrollerades dels genom strukturanalys i tunnslip och dels genom en kemisk analys av betongens sammansättning med SEM/EDS. Urlakningen är för båda betongtyperna fortsatt liten, men det finns vissa skillnader. I Figur 2 visas den relativa kvoten mellan CaO/SiO_2 för de två betongerna och hur den varierar över djupet jämfört med opåverkat djup av 25 mm. Det är tydligt att betongen med



Ingemar Löfgren
Thomas Concrete Group,
Adjungerad professor Chalmers



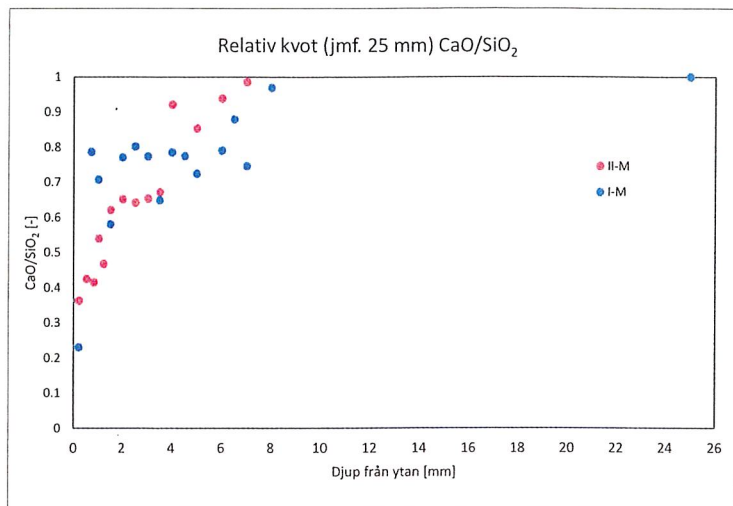
Mårten Janz
AFRY

	Referens, Anlägg- ningscement	Byggcement och slagg
Anläggningscement (CEM I)	390,0 kg/m ³	-
Byggcement Skövde (CEM II/A-LL)	-	281,0 kg/m ³
Slagg Bremen (k = 0,8)	-	112,4 kg/m ³
Vatten	163,8 kg/m ³	163,2 kg/m ³
vct/vct_{ekv}	0,42	0,44
Ballast 0-8	794,5 kg/m ³	785,5 kg/m ³
Ballast 5-8	105,9 kg/m ³	104,7 kg/m ³
Ballast 8-16	177,9 kg/m ³	175,8 kg/m ³
Ballast 16-25	722,3 kg/m ³	714,1 kg/m ³
Glenium 51-18	0,8 %	0,9 %
BASF Micro Air	0,18 %	0,21 %

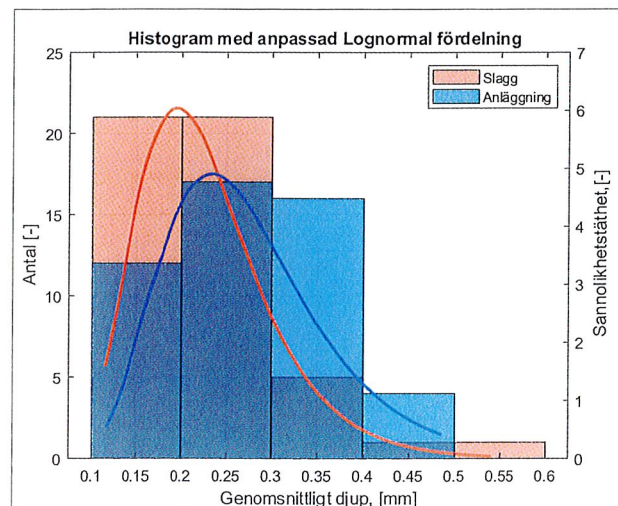
Tabell 1: Betongsammansättning.



Figur 1: Paneler på dammens uppströmssida.



Figur 2: Relativ kvot CaO/SiO_2 över provkroppens djup (jämfört med opåverkat djup 25mm) för betong med Byggcement och slagg (I-M) och betong med Anläggningscement (II-M).



Figur 3: Histogram för ytråhetsfördelning.

Anläggningscement har en bredare zon (ca 4 mm) med betydligt lägre andel CaO. För betongen med slagg är det inte lika tydligt och det är större variationer nära ytan.

Resultat ytråhet

För att karakterisera eventuell nedbrytning, frostsador och nötning/erosion genomförde en 3D-laserskanning på uppströmsytan av isutskovet som göts med båda betongerna. En cirka 1 m bred och 0,5 m hög yta skannades inklusive gränsen mellan de två betongerna. Innan skanningen borstades ytorna med en kvast för att få bort avlagringar. Vid borstningen försvann även viss mängd löst sittande cementpasta. I Figur 3 visas ytråhetsfördelningen för varje betong i form av ett histogram. Samtidigt visas den anpassade sannolikhetstäthetsfunktionen under antagande av en lognormalfördelning. Som kan observeras uppvisar betongen med slagg en lägre genomsnittlig grovhet även om standardavvikelsen är ungefär densamma som för referensbetongen med anläggningscement. Med tanke på den lilla skillnaden i genomsnittlig grovhet

kan man dock dra slutsatsen att båda betongarna visade ett liknande beteende mot miljöns agerande.

Resultat tryckhållfasthet

I samband med gjutningen av panelerna och utskovsdammen togs kuber för att bestämma tryckhållfastheten (7, 14, 28 & 56 dygn) och från panelerna som expo-

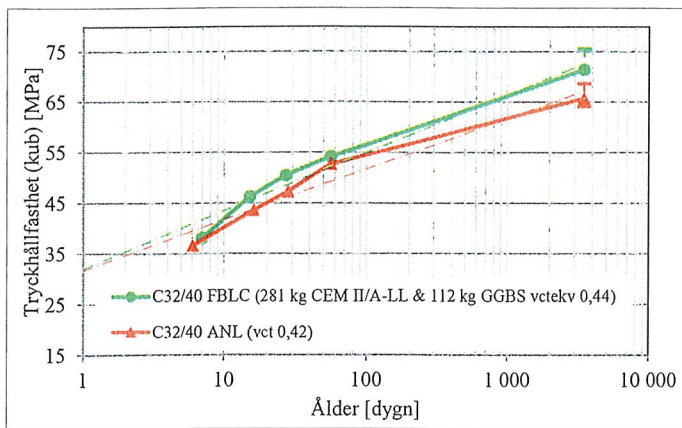
nerats i cirka 10 år togs det 5 stycken borrhärdor (diameter och höjd 58 mm) fördelade över panelens djup. Tryckhållfastheten för borrhärdorna testades vid Thomas Concrete Group och redovisas i Tabell 2 och i Tabell 3 redovisas tryckhållfastheten för kuberna. I Figur 4 visas hållfasthetsutvecklingen över tid för de två betongtyperna och i Figur 5 den relativa

Tabell 2:
Tryckhållfasthet för
utborrade prover
(diameter 58 mm).

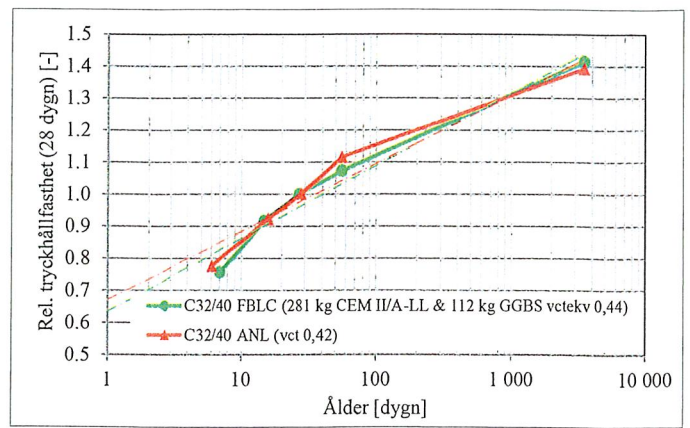
Tryckhållfasthet	C32/40 ANL vct 0,42	C32/40 Bygg & Slagg vct_{ekv} 0,44
1 (överst)	64,9 MPa	75,6 MPa
2	68,6 MPa	75,2 MPa
3	65,9 MPa	73,2 MPa
4	64,1 MPa	69,4 MPa
5 (nederst)	64,9 MPa	64,1 MPa
Medel	65,7 MPa	71,5 MPa
Std.av.	1,75 MPa	4,81 MPa

Tabell 3:
Tryckhållfasthet kuber
tagna i samband med
gjutning.

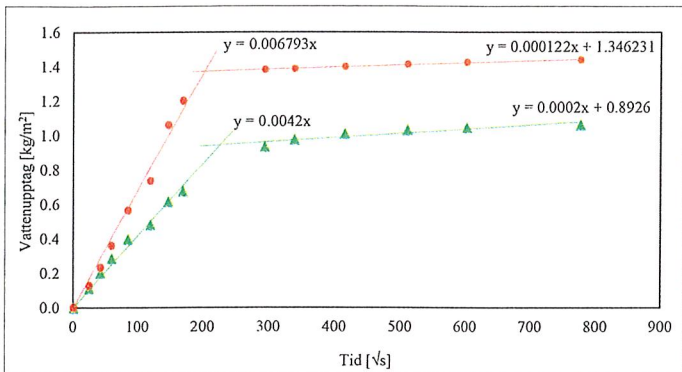
Ålder	C32/40 ANL vct 0,42	Ålder	C32/40 Bygg & Slagg vct_{ekv} 0,44
7	36,6 MPa	6	38,2 MPa
15	43,5 MPa	16	46,3 MPa
27	47,2 MPa	28	50,5 MPa
56	52,6 MPa	56	54,2 MPa



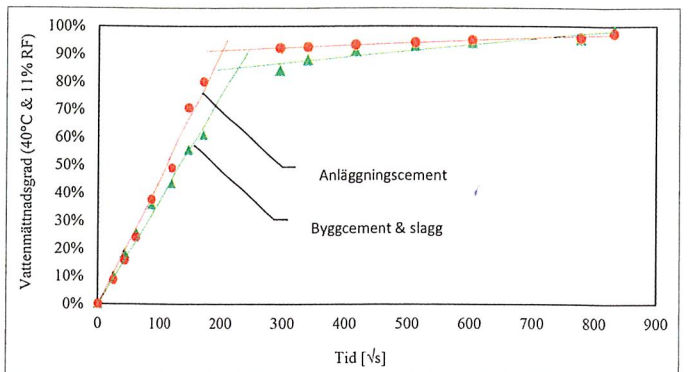
Figur 4: Tryckhållfasthet (kuber tagna i samband med gjutning, 7, 14, 28 & 56 dygn) samt utborrade prover efter 10 år.



Figur 5: Relativ tryckhållfasthetsutveckling (28 dygn).



Figur 6: Kapilläruppsugning. Grön linje/trekant = Byggcement + slagg. Röd linje/cirkel = Anläggningscement.



Figur 7: Vattenmättnadsgrad. Grön linje/trekant = Byggcement + slagg. Röd linje/cirkel = Anläggningscement.

Tabell 4: Kapilläruppsugningskoefficienter.

Betong	Kapillaritetstalet k_{cap} [kg/(m²·√s)]	Motståndstalet m_{cap} [s/m²]	$\sqrt{t_{cap}}$	Aktiv porositet	Totalporositet
Ref. (Anl.)	$6,79 \times 10^{-3}$	$16,7 \times 10^7$	202	8,79 %	13,4 %
Bygg- & Slagg	$4,20 \times 10^{-3}$	$22,4 \times 10^7$	223	6,28 %	11,9 %

tryckhållfasthetsutvecklingen (jämfört med 28 dygn). Den relativa tryckhållfasthetsutvecklingen är likvärdig för de två betongerna och efter 10 år är den relativa hållfastheten 1,39 respektive 1,42 (Anläggningscement respektive Byggcement och slagg). Den relativa tryckhållfasthetsutvecklingen är något lägre än vad som anges i Betonghandbok Material (Del II, figur 14.12:21) där anläggningscement anges ha en relativ hållfasthetstillväxt som är ca 1,6 (luftlagrad inomhus) efter 7 år. Den aktuella betongen har dock exponerats för utemiljö och därmed en lägre medeltemperatur, vilket kan förklara att den relativa tryckhållfasthetsutvecklingen är något lägre.

Resultat kapillärinsugning

Analys av kapillärinsugning genomfördes av Thomas Concrete Group. Från panelerna togs det ut fyra stycken prover för respektive betong och där proverna hade en tjocklek av cirka 15 mm. Proverna konditionerades enligt NT Build 368 och SS-EN 13580, en vecka i 40 °C med 11 % RF, varefter viktökningen för proverna i

kontakt med vatten mättes. I Figur 6 redovisas vattenupptaget (viktökningen) och i Figur 7 vattenmättnadsgraden. I Tabell 4 är en sammanställning av kapilläruppsugningskoefficienterna (kapillaritetstal, motståndstal, aktiv porositet samt total porositet). Det framgår tydligt att betongen med Byggcement och slagg har ett långsammare fuktupptag och också lägre totalporositet och aktiv porositet (tillgänglig för kapillär fukttransport). Detta medför att betongen med anläggningscement snabbare får en hög vattenmättnadsgrad (Figur 7) även om den slutliga vattenmättnadsgraden är lika.

Slutsatser

Det går i dagsläget att notera små skillnader mellan de båda betongerna. Noterade skillnader i hållfasthetsutveckling, E-modul och kapillärinsugning är troligen kopplade till betongen i sig och inte miljöbelastningen. Det ses inte som troligt att någon nedbrytningsprocess i dagsläget påverkat dessa egenskaper.

För urlakning och 3D-skanning som är uppmätta egenskaper som har ett samband

med erosion så är skillnaderna i dagsläget små. Okulärt går det att notera ett litet ytsläpp på referensbetongen som saknas eller är betydligt mindre på betongen med slagg. Skillnaden kan dock bero på andra orsaker än att referensbetongen i sig är mer erosionskänslig. Utförandet kan till exempel påverkat ytskiktet något, till exempel kan det bero på mängd formolja, tid mellan det att olja applicerades och gjutning eller andra mindre skillnader vid utförandet.

Denna mätning ska ses som en första mätning som framtida utvärderingar kan ha som referensmätning. Om en ny analys utförs om cirka 10 år bör eventuella skillnader vara tydligare. I dagsläget finns det inget som tyder på att betongen med slagg har sämre eller bättre beständighet i en vattenbyggnadsmiljö än referensbetongen med traditionell anläggningsbetong. ■

Referenser

- [1] Janz, M., Löfgren, I., & Runnéus, O., (2024). *Utvärdering av slaggbetong efter 10 års exponering*. Rapport 2024:XYZ, Energiforsk, Sverige.
- [2] Nordström, E., Bryne, L-E. (2021). *Långtidsexponering av vattenbyggnadsbetong med SCM*. Rapport 2021:768, Energiforsk, Sverige.

Läs mer:

www.energiforsk.se/