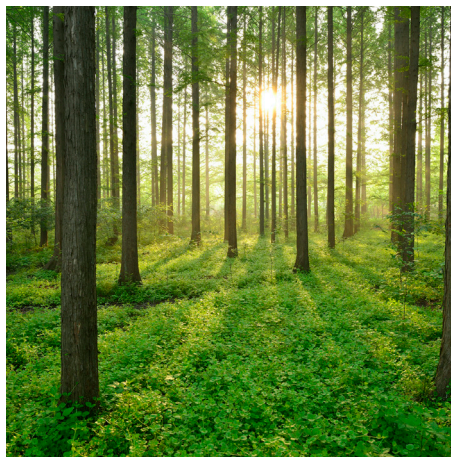


UTVÄRDERING AV SLAGGBETONG EFTER 10 ÅRS EXPONERING

RAPPORT 2025:1077



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Utvärdering av slaggbetong efter 10 års exponering

MÅRTEN JANZ
INGEMAR LÖFGREN
OLLE RUNNÉRUS

ISBN 978-91-89919-77-8 | © Energiforsk januari 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Inblandningen av slagg i vattenbyggnadsbetong innebära mindre CO₂ vid tillverkning, och minskar därför dess klimatpåverkan. Hur detta påverkar betongens beständighet har dock inte varit känt förrän detta genomfördes i Skogsforsens kraftverk 20213. Nu har 10 år gått sedan försök genomfördes med både "traditionell" vattenbyggnadsbetong och vattenbyggnadsbetong med inblandning av masugnsslagg, och den första utvärderingen har kommit i detta projekt.

I projektet "Utvärdering av klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong efter 10 års exponering" så syftar resultatet till att ge underlag och rekommendationer för val av betongsammansättning vid klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong. Utöver dessa underlag så syftar projektet till att ge vägledning i kommande utvärderingar, i form av indata och tidigare genomfört arbete.

Projektet har utförts av Mårten Janz, på Afry. Projektet har finansierats av Energiforsk genom FoU-programmet Betongtekniskt program vattenkraft, etapp 2022-2024. Programmets intressenter är Fortum Sverige, Holmen Energi, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Statkraft Sverige, Sydkraft/Uniper, Tekniska Verken, Umeå Energi samt Vattenfall Vattenkraft. Projektets referensgrupp har utgjorts av en representant från programmets styrgrupp: Mats Persson.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar 10 års exponering av betong gjuten med inblandning av mald granulerad masugnsslagg och kalksten och en referensbetong gjuten med Anläggningscement.

År 2013 göts isutskovet vid Unipers anläggning Skogsforsen i Ätran igen med två betongkvaliteter, dels med idag traditionell vattenbyggnadsbetong med Anläggningscement (CEM I) och dels med betong med inblandning av mald granulerad masugnsslagg och kalksten. Samtidigt tillverkades 5+5 provpaneler av samma betongkvaliteter som placerades på dammens uppströmsida i vattenlinjen. Syftet med att gjuta med två kvaliteter och sätta ut provpaneler var att öka kunskapen kring beständighetsaspekter i vattenkraftsmiljö då portlandklinker ersätts med alternativa bindemedel.

Nu efter ca 10 års exponering har en första utvärdering de båda betongkvaliteterna genomförts. Även om vissa trender kan ses så är inte huvudsyftet att redan nu dra långtgående slutsatser om beständigheten, utan undersökningen syftar snarare till att redovisa en första omgång resultat som ska följas upp igen efter en lämplig tidsperiod. Vid kommande uppföljningar kan man då se om betongens egenskaper förändrats och hur beständig betong med inblandning av mald granulerad masugnsslagg och kalksten är i jämförelse med en betong baserad på Anläggningscement.

Det går att notera små skillnader mellan de båda betongerna. För egenskaper som har direkt samband med erosion så är skillnaderna i dagsläget små. De skillnader som kan noteras kan bero på andra aspekter än betongens beständighet. I stort är skillnaderna ännu så begränsade att det inte går att dra några slutsatser om det finns skillnader som påverkar beständigheten över tid och det finns inget som tyder på att betongen med slagg har sämre eller bättre beständighet i en vattenbyggnadsmiljö än referensbetongen med traditionell anläggningsbetong.

Denna uppföljning och analys ska ses som en första mätning som framtida utvärderingar kan ha som referensmätning. Om en ny analys utförs om ca 5 till 10 år bör eventuella skillnader vara tydligare.

Nyckelord

Fältförsök, urlakning, frostbeständighet, erosion, slaggbetong

Summary

This report summarizes 10 years of exposure of concrete cast with an admixture of ground granulated blast furnace slag and limestone and a reference concrete cast with Anläggningscement.

In 2013, a small spillway at Uniper's Skogsforsen hydro power plant in Ätran was closed with concrete slab. The concrete that was used consisted partly of traditional concrete with Anläggningscement (CEM I) and partly of concrete mixed with ground granulated blast furnace slag and limestone. At the same time, 5+5 test panels were made of the same concrete qualities and placed on the upstream side of the dam in the waterline. The purpose of casting with two grades and putting out test panels was to increase knowledge about durability aspects in a hydropower environment when portland clinker is replaced with alternative binders.

Now after about 10 years of exposure, a first evaluation of both concrete qualities has been carried out. Even if certain trends can be seen, the main aim is not to draw far-reaching conclusions about the durability now, but rather the survey aims to report a first round of results that must be followed up again after a suitable period of time. In future follow-ups, one can then see whether the properties of the concrete have changed and how durable concrete with admixture of ground granulated blast furnace slag and limestone is in comparison with the concrete with Anläggningscement.

It is possible to note small differences between the two concretes. For properties that are directly related to erosion, the differences are currently small. The differences that can be noted may be due to aspects other than the durability of the concrete. In general, the differences are still so limited that it is not possible to draw any conclusions about whether there are differences that affect durability over time and there is nothing to indicate that the concrete with slag has worse or better durability in the hydro power environment than the reference concrete with traditional construction concrete.

This measurement should be regarded as the first reference point for future evaluations. If a new analysis is conducted in approximately 5 to 10 years, any differences should become clearer.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	syfte och mål	8
1.3	organisation	8
1.4	Avgränsningar	8
2	Material och konstruktion	9
2.1	Provpaneler	11
2.2	Isutskov	11
3	Resultat och diskussion	14
3.1	Vattenanalys	14
3.2	Urlakning	15
3.3	Frysprovning	17
3.4	Tryckhållfasthet	18
3.5	Kapillärsugning	20
3.6	3D skanning	21
	3.6.1 Paneler	22
	3.6.2 Isutskov	24
4	Slutsatser	26
5	Referenslista	27

Bilagor

Bilaga 1	Vattenanalys, ALS, 2023-06-16
Bilaga 2	Urlakningsdjup hos betong från Skogsforsen, RISE 2023-11-14.
Bilaga 3	Frostprovning enligt SS 137244:2005.

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Vid byggandet av vattenkraftens betongkonstruktioner har under lång tid funnits tillgång till väl beprövade och för branschen väl anpassade cement. Under huvuddelen av den svenska vattenkraftsutbyggnaden fanns Limhamn LH som var anpassat för att gjuta grova konstruktioner med låg och långsam värmeutveckling. Tillverkningen av detta upphörde 1979 och ersattes från 1983 av Anläggningscement som har en moderat värmeutveckling. Både Limhamn LH och Anläggningscement är rena portlandcement (CEM I) med 95-100 % portlandklinker.

I dagsläget råder det inom betongbyggsektorn stort fokus på att minska utsläppen av CO₂ och en viktig del av detta är att ställa om cementproduktionen till cement och bindemedel med lägre CO₂-utsläpp. Tillverkning av portlandklinker medför stora utsläpp av CO₂ då kalksten kalcineras. Vid karbonatisering återbinds CO₂ som gått ut i atmosfären vid kalcineringen till betongen, men detta är – speciellt för grova och fuktiga konstruktioner med relativt lågt *vct* som är normalfallet vid vattenkraftsanläggningar – en extremt långsam process. Ett viktigt sätt att minska CO₂-utsläppen vid uppförandet av betongkonstruktioner är därför att blanda in alternativa bindemedel/tillsatsmaterial som medför lägre CO₂-utsläpp. Ett exempel på det är Anläggningscement FA (CEM II/A-V) där portlandklinkern ersätts med upp till 20 % flygaska. Ett annat tillsatsmaterial som idag används kommersiellt är slagg från ståltillverkningen (mald granulerad masugnsslagg). Slaggbetong har använts historiskt vid vattenkraftsutbyggnaden, t.ex. vid vissa anläggningar som STORA uppfört längs Dalälven (Rosenqvist, 2018).

Framtidens cement 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 Limhamn LH och 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.

År 2013 göts isutskovet vid Unipers anläggning Skogsforsen i Ätran igen med två betongkvaliteter, dels med idag traditionell vattenbyggnadsbetong med Anläggningscement (CEM I) och dels med betong med inblandning av mald granulerad masugnsslagg och kalksten. Samtidigt tillverkades 5+5 provpaneler av samma betongkvaliteter som placerades på dammens uppströmssida i vattenlinjen. Nu efter ca 10 års exponering är det tid för en första utvärdering av denna gjutning och de provpaneler som utplacerades.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Det övergripande syftet med projektet är att öka kunskapen kring beständighetsaspekter då portlandklinker ersätts med alternativa bindemedel. Undersökningen begränsas till betong med slagg och kalkstensfiller men kan tillsammans med andra pågående fältförsök såsom långtidsexponeringen i Älvkarleby (Nordström och Bryne, 2021) ge en delmängd till en ökad förståelse.

Betongen i Skogsforsen har 2023 exponerats i 10 år och nu görs en första utvärdering av beständigheten. Syftet är inte att redan nu dra långtgående slutsatser om beständigheten, utan undersökningen syftar snarare till att redovisa en första omgång resultat som ska följas upp igen efter en lämplig tidsperiod. Vid kommande uppföljningar kan man då se om betongens egenskaper förändrats.

1.3 ORGANISATION

Studien har utförts av Mårten Janz på AFRY, Ingemar Löfgren och Carlos Gil Berrocal på Thomas Concrete Group (TCG) samt Olle Runnérus på Uniper. Till projektet har en referensgrupp knutits som består av Mats Persson på Vattenfall och Martin Rosenqvist på AFRY. För laboratorieprovningar har interna laboratorieresurser på Thomas Concrete Group och externa laboratorier använts. Vilka laboratorier som använts för respektive analys redovisas i samband med redovisningen av resultaten.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Gjutning av provpaneler och igengjutning av isutskovet med två betongkvaliteter utfördes inom ett "vanligt" byggprojekt på anläggningen, dvs. huvudsyftet var inte att skapa en fältstation med många olika varianter av betongkvaliteter. Därav har endast en slaggbetong och en referensbetong med Anläggningscement gjutits. I rapporten presenteras i första hand resultat som i kommande utvärderingar av betongen i Skogsforsen och tillsammans med andra fältförsök kan användas för mer omfattande analys.

2 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 % av totalt bindemedel. Byggcement Skövde innehåller upp till 20 % kalkstensfiller. Den bindemedelskombination som användes motsvarar således ett CEM II/C-M (S-LL) enligt SS-EN 197-5.

Den slagg som använts är Slagg Bremen från Tyskland. Enligt produktdatablad så har Slagg Bremen egenskaper enligt Tabell 2.1. Med Byggcement har slagget en effektivitetsfaktor $k = 0,8$.

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 2.2.

Tabell 2.1 Fysikalisk och kemisk data enligt produktdatablad för Slagg Bremen

Egenskap	Värde
<i>Fysikaliska egenskaper</i>	
Specifik yta (Blaine)	420 ±20 m ² /kg
Kompaktdensitet	2900 ±50 kg/m ³
Skrymdensitet	1150 ±200 kg/m ³
Aktivitetsindex* 7/28/91d	≥ 55/75/100 %
Bindetid*	≤ 1,3
<i>Kemiska egenskaper</i>	
Kalcium (CaO)	40 vikt-%
Kisel (SiO ₂)	35 vikt-%
Aluminium (Al ₂ O ₃)	12 vikt-%
Magnesium (MgO)	7 vikt-%
Titan (TiO ₂)	≤ 1,2 vikt-%
Mangan (Mn ₂ O ₃)	≤ 0,6 vikt-%
Sulfat (SO ₃)	≤ 0,2 vikt-%
Klorid (Cl ⁻)	≤ 0,05 vikt-%
Alkalitet (Na ₂ O _{eq})	≤ 1,2 vikt-%
Glödförlust	≤ 2,0 vikt-%
Glashalt	≥ 90 %

* Standardbruk med 50 % OPC (CEM I 42,5) och 50 % GGBS, relativt 100% OPC

Tabell 2.2 Betongsammansättning

	Referens, Anläggningscement	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/vctekv	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 %

Hållfasthetstillväxten för betongen med Byggcement och slagg kommer dels bero på en reaktion mellan portlandsklinker och vatten och dels på en puzzolan reaktion mellan slagg och kalciumhydroxid (Ca(OH)₂). Vid reaktion mellan portlandsklinker och vatten bildas kalciumsilikathydrat (C-S-H) som ger hållfasthetstillväxt och (Ca(OH)₂). Därefter sker en reaktion mellan slagg och en delmängd av den (Ca(OH)₂) som tidigare bildats som ger ytterligare C-S-H som bidrar till hållfasthetstillväxt och minskad porositet.

Hållfasthetstillväxten för betongen med Anläggningscement sker endast via reaktion mellan portlandsklinker och vatten.

En konsekvens av att slaggen bidrar till hållfasthetstillväxt och minskad porositet via reaktion med (Ca(OH)₂) är att det finns mer (Ca(OH)₂) i betongen med Anläggningscement som enklare kan lakas ur.

2.1 PROVPANELER

Provppaneler tillverkades i samband med igengjutning av isutskovet i december 2013. 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, dvs. ca 9,5 år efter gjutning.



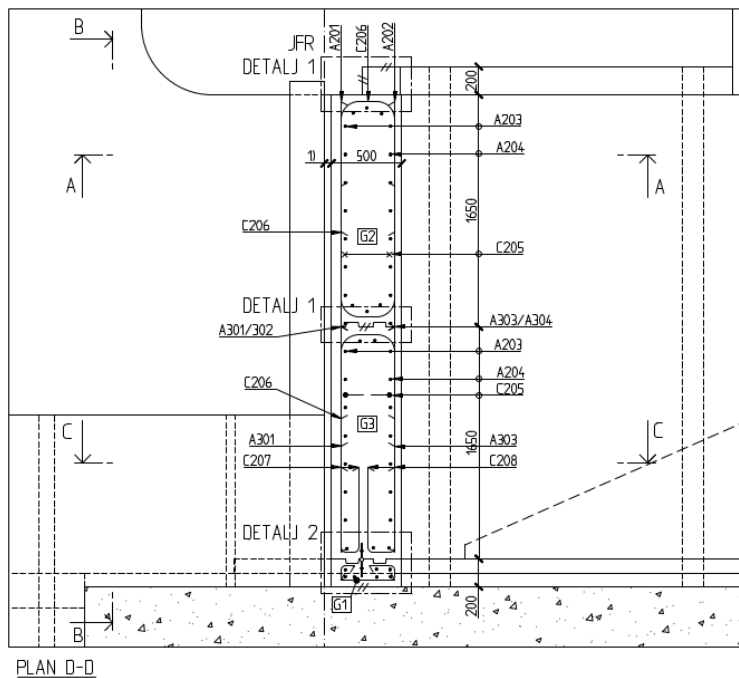
Figur 1 Paneler på dammens uppströmssida

2.2 ISUTSKOV

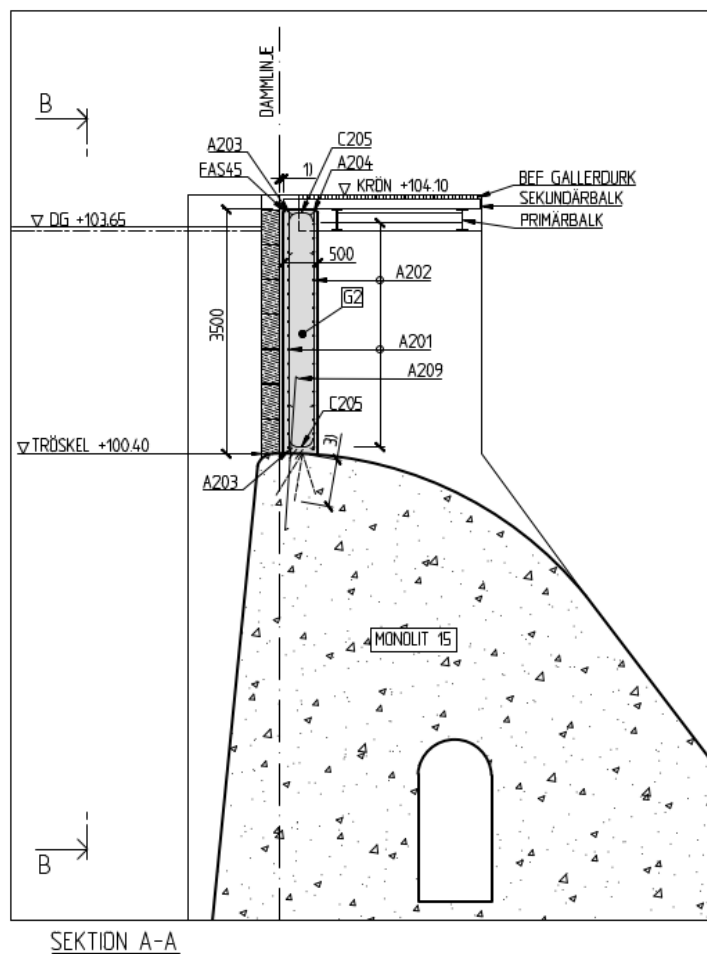
Isutskovet göts igen december 2013 och vid gjutningen delades utskovet med en vertikal gjutfog för att kunna använda två betongrecept. I skibordet intill stationsbyggnaden finns en dilatationsfog som fortsätter upp i igengjutningen. Detta medför 3 gjutetapper där etapp 1 utgör en liten gjutning mot stationsväggen fram till dilatationsfogen och etapp 2 och 3 som delar resterande del av utskovet i två delar. Vänster del sett i strömningsriktningen (gjutetapp 2) utgörs av slaggbetong och övriga gjutdelar av referensbetong med anläggningscement, se Figur 2 och Figur 3.

Befintliga sättar utgjorde stöd för uppströms form. Efter gjutning togs sättar och form bort till en nivå under vattenlinjen så att betongytan exponeras för vatten.

Figur 4 och Figur 5 visar foton från uppströms- respektive nedströmssidan. I dagsläget kan man se en något större erosion på referensbetongen jämfört med slaggbetongen på uppströmssidan. Då skillnaden är liten kan det bero på mängd formolja, tid mellan det att olja applicerades och gjutningens utfördes eller andra mindre skillnader vid utförandet. Det är för tidigt att dra några långtgående slutsatser på de noterade skillnaderna. På nedströmssidan går det okulärt inte se någon skillnad alls.



Figur 2 Plan av isutskovet. G2 är gjuten med slaggbetong och G1 och G3 med referensbetongen.



Figur 3 Sektion av isutskovet. G2 är gjuten med slaggbetong och G1 och G3 med referensbetongen.



Figur 4 Uppströmsvy av isutskovet. Till vänster slaggbetong och till höger anläggningsbetong. Magasinet avsänkt för provtagning.



Figur 5 Nedströmsvy av isutskovet. Till höger i bilden slaggbetong och till vänster anläggningsbetong.

3 Resultat och diskussion

3.1 VATTENANALYS

Betongen exponeras mot vattnet i Ätran och i syfte att veta vattnets egenskaper och för att enklare jämföra exponeringen i Skogsforsen med andra vattendrag har en vattenanalys utförts. Analysen utfördes av ALS Scandinavia AB (Bilaga 1). I analyspaketet ingick ett flertal parametrar varav majoriteten inte är intressanta avseende urlakning men samtliga redovisas i Tabell 3.1.

En låg kalciumhalt medför att vattnet är mer aggressivt avseende urlakning. Kalciumhalten är relativt hög vid dammen. Enligt Sahlén Zetterberg och Fölster (2022) som studerat 3664 sjöar slumpmässigt utspridda över Sverige ligger kalciumhaltens medelvärde på 7,0 mg/l. Trenden över tid har varit att kalciumhalten minskat på grund av minskad försurning (Sahlén Zetterberg och Fölster, 2022) varför det kan vara bra att kontrollera vattenkemin även vid kommande provtagningar. I (Rosenqvist, 2016) presenteras kalciumhalten i 15 vattendrag i Sverige (Ätran är inte med) och även i jämförelse med dessa resultat är här uppmätt kalciumhalt relativt hög. I Dalälven är kalciumhalten 5,22 mg/l (Rosenqvist, 2016) vilket bör beaktas vid jämförelse med resultat som kommer att komma fram från fältstationen i Älvkarleby (Nordström och Bryne 2021).

Tabell 3.1 Vattenanalys

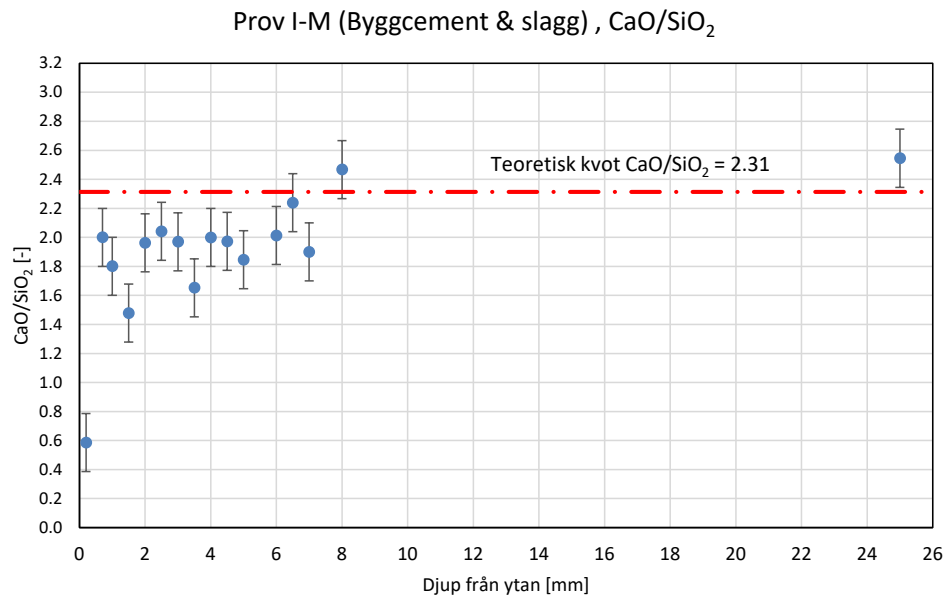
Metaller och grundämnen	Resultat	Mätosäkerhet
Al, aluminium	23,2 µg/l	± 3,5 µg/l
As, arsenik	0,282 µg/l	± 0,036 µg/l
Ba, barium	19,8 µg/l	± 3,0 µg/l
Ca, kalcium	13,6 mg/l	± 1,7 mg/l
Cd, kadmium	0,0120 µg/l	± 0,0020 µg/l
Co, kobolt	0,0408 µg/l	± 0,0064 µg/l
Cr, krom	0,129 µg/l	± 0,020 µg/l
Cu, koppar	1,15 µg/l	± 0,16 µg/l
Fe, järn	0,111 mg/l	± 0,017 mg/l
Hg, kvicksilver	<0,002 µg/l	-
K, kalium	1,44 mg/l	± 0,17 mg/l
Mg, magnesium	1,87 mg/l	± 0,22 mg/l
Mn, mangan	23,9 µg/l	± 3,2 µg/l
Mo, molybden	0,425 µg/l	± 0,063 µg/l
Na, natrium	7,19 mg/l	± 0,86 mg/l
Ni, nickel	0,424 µg/l	± 0,066 µg/l
P, fosfor	4,66 µg/l	± 0,76 µg/l
Pb, bly	0,0967 µg/l	± 0,0142 µg/l
Si, kisel	2,41 mg/l	± 0,28 mg/l
Sr, strontium	32,5 µg/l	± 4,6 µg/l
V, vanadin	0,143 µg/l	± 0,021 µg/l
Zn, zink	2,99	± 0,51 µg/l

3.2 URLAKNING

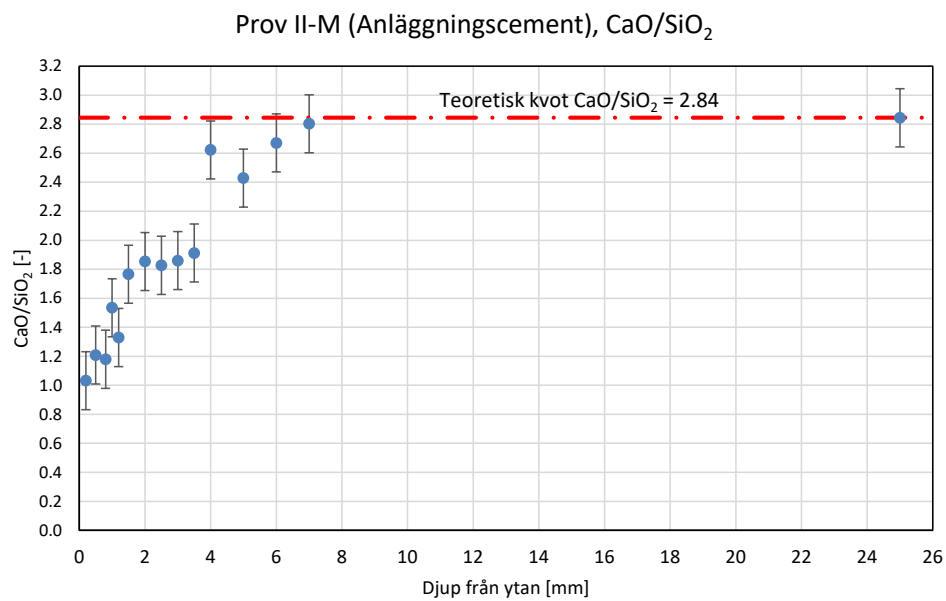
Urlakningen kontrollerades dels genom strukturanalys i tunnslip och dels genom en kemisk analys av betongens sammansättning med SEM/EDS. Provingen utfördes av RISE och redovisas i sin helhet i Bilaga 2. Prov som RISE i Bilaga 2 refereras till som I-M är betongen med Byggcement och slagg och II-M är referensbetongen med Anläggningscement.

Urlakningen är för båda betongtyperna fortsatt liten, men det finns vissa skillnader. Förutsatt att bindemedelskoncentrationen från början varit homogen i betongytan så dras det i Bilaga 2 slutsatsen att det för betongen med slagginblandning finns en tydlig högre kapillärporositet på djupet 0-2,0 mm samt en mindre tydlig observerad förhöjd kapillärporositet på djupet 2-3 mm. För referensbetongen noterades en tydlig högre kapillärporositet på djupet 0-1,0 mm och en svagare förhöjd kapillärporositet på djupet 1,0 till 4,0 eller 4,5 mm. Slutsatsen som dras i bilaga 2 avseende strukturanalysen är: "På djup 0-2,0 mm i prov "I-M" (anm: betong med slagg) ser en stor del av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit) ut att vara nedbruten och urlakad från cementpasta. I prov "II-M" (anm: referensbetong) är liknande områdes djup 0-1,0 mm. På djup 1,0-ca 4,0 mm i prov "II-M" (anm: referensbetong) observerades relativt låg halt av $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dvs. lägre än på större djup i betongen. Enligt vår bedömning indikerar detta en partiell och relativt svag nedbrytning och urlakning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ".

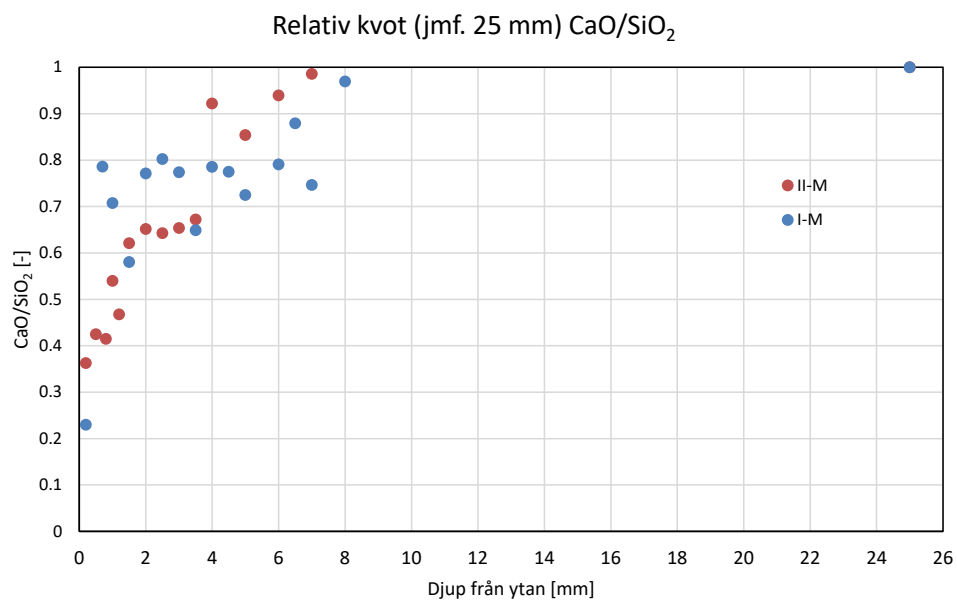
Den kemiska analysen indikerar för båda proven men speciellt för betong med slagg ett större djup på urlakning av kalcium än vad som går att observera med förhöjd kapillärporositet i tunnslip, vilket i bilaga 2 förklaras med att det kan vara en relativt svag nedbrytning och urlakning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som inte är märkbar i tunnslipsanalysen alternativt att urlakningsdjupet varierar något mellan olika områden i betongen. I referensbetongen (II-M) där en mer tydlig förhöjning av kapillärporositeten noteras finns en bättre korrelation mellan observerat maximalt djup hos högre kapillärporositet (4,5 mm) och maximalt djup med CaO/SiO_2 -kvot som indikerar urlakning av kalcium (5,0 mm). För betongen med slaggbetong är skillnaden större. Ökad kapillärporositet noterades till 3,0 mm medan den kemiska analysen visar en CaO/SiO_2 -kvot som indikerar urlakning till max 7,0 mm. I Figur 6 och Figur 7 visas kvoten mellan CaO/SiO_2 för de två betongerna och hur den varierar över djupet. I figurerna visas också den teoretiska beräknade kvoten baserat på cementens och slaggens kemiska sammansättning och där betongen med slagg har en lägre kvot p.g.a en lägre andel CaO och en högre andel SiO_2 . Det är tydligt att betongen med 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. Jämförs kvoten CaO/SiO_2 med värdet vid 25 mm (antas vara "opåverkat") så går det att jämföra de två betongerna, se Figur 8, och det framgår att det är en skillnad i "lakningsprofil".



Figur 6. Kvot CaO/SiO₂ över provkroppens djup för betong med Byggcement och slagg.



Figur 7. Kvot CaO/SiO₂ över provkroppens djup för betong med Anläggningscement.



Figur 8. Relativ kvot CaO/SiO₂ över provkroppens djup för de två betongerna (normerad gentemot djupet 25 mm, "opåverkad").

3.3 FRYSPROVNING

Frysprovning utfördes av Thomas Concrete Group enligt SS 137244 när betongen göts 2013 och bedömningen för båda betongtyperna var att frostbeständigheten är "Mycket god". Protokollen framgår av Bilaga 3.

3.4 TRYCKHÅLLFASTHET

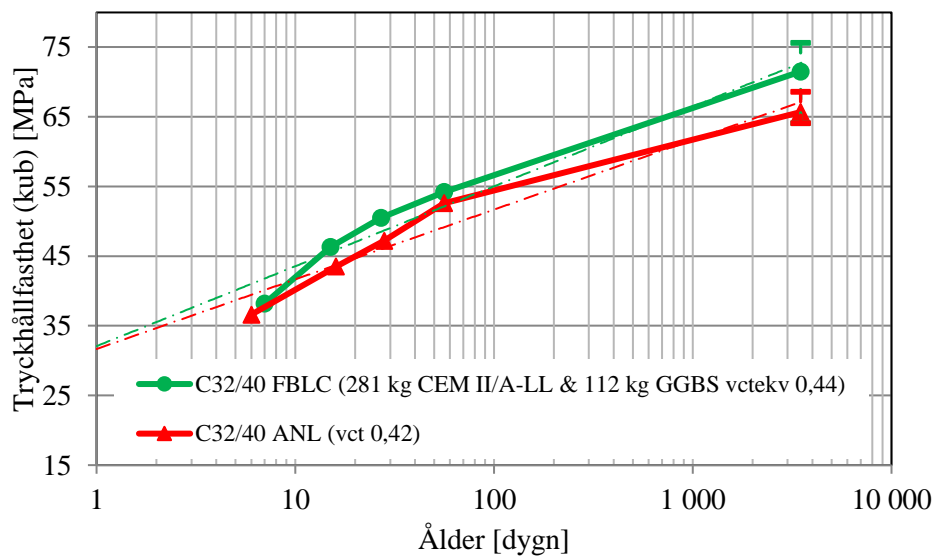
I samband med gjutningen av panelerna och utskovsdammen togs kuber för att bestämma tryckhållfastheten (7, 14, 28 & 56 dygn) och från panelerna som exponerats i ca 10 år togs det 5 st borrhärnor (diameter och höjd 58 mm) fördelade över panelens djup. Tryckhållfastheten för borrhärnorna testades vid Thomas Concrete Group och redovisas i Tabell 3.2 och i Tabell 3.3 redovisas tryckhållfastheten för kuberna. I Figur 9 visas hållfasthetsutvecklingen över tid för de två betongtyperna och i Figur 10 den relativa 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.

Tabell 3.2. Tryckhållfasthet för utborrade prover (diameter 58 mm).

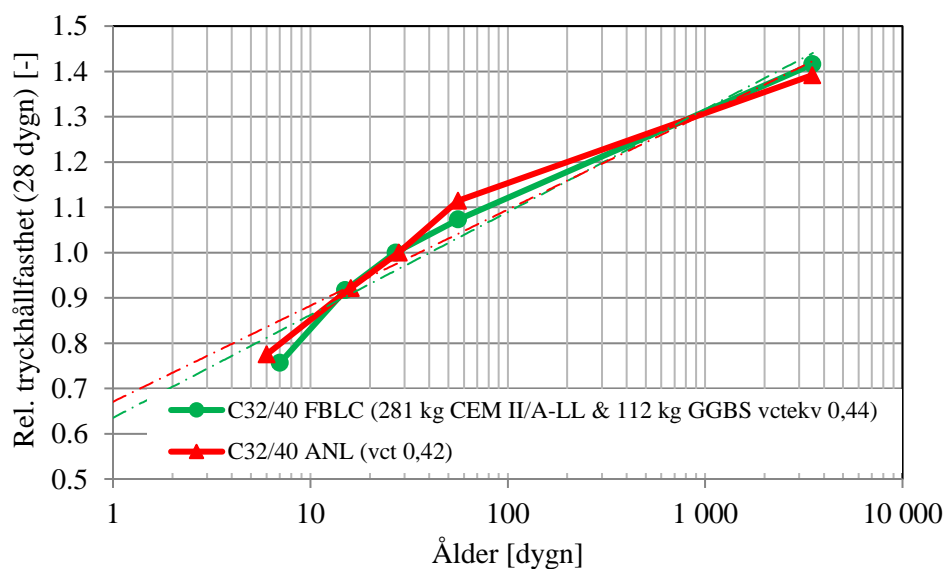
Tryckhållfasthet	C32/40 ANL vct 0,42	C32/40 Bygg & Slagg vct _{ekv} 0,44
1 (överst)	64,9 MPa	75,6 MPa
2	68,6 MPa	75,2 MPa
3	65,9 MPa	73,2 MPa
4	64,1 MPa	69,4 MPa
5 (nederst)	64,9 MPa	64,1 MPa
Medel	65,7 MPa	71,5 MPa
Std.av.	1,75 MPa	4,81 MPa

Tabell 3.3. Tryckhållfasthet för 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



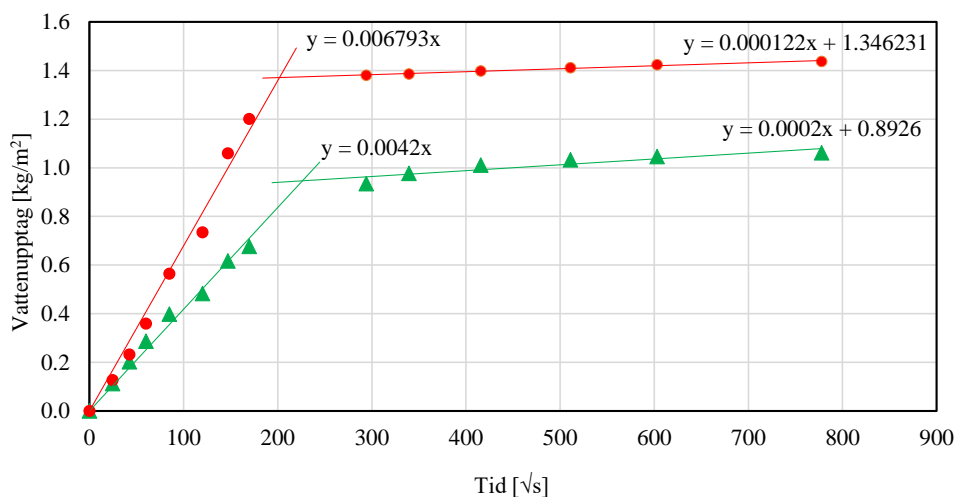
Figur 9. Tryckhållfasthet (kuber tagna i samband med gjutning, 7, 14, 28 & 56 dygn) samt utborrade prover efter 10 år.



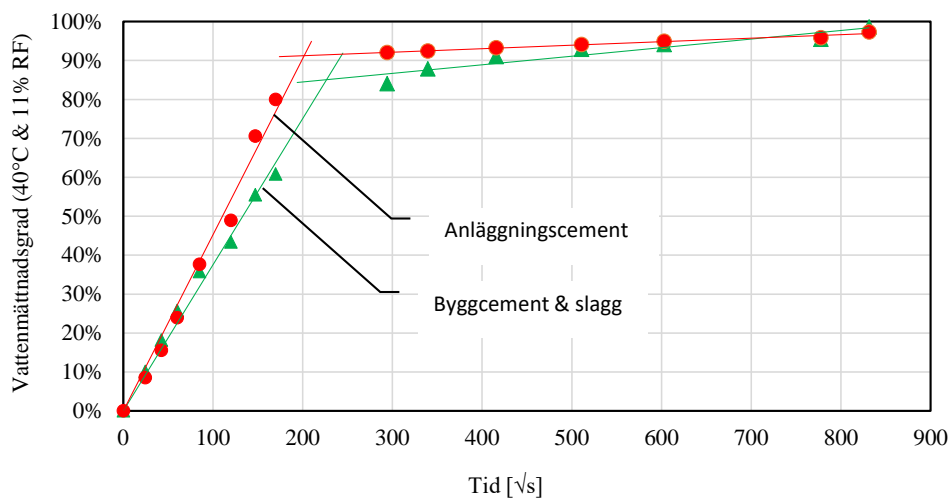
Figur 10. Relativ tryckhållfasthetsutveckling (28 dygn).

3.5 KAPILLÄRSUGNING

Analys av kapillärsugning 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 11 redovisas vattenupptaget (viktökningen) och i Figur 12 vattenmättnadsgraden. I Tabell 3.4 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 12) även om den slutliga vattenmättnadsgraden är lika.



Figur 11. Kapilläruppsugning. Grön linje/trekant = Byggcement + slagg. Röd linje/cirkel = Anläggningscement.



Figur 12. Vattenmättnadsgrad. Grön linje/trekant = Byggcement + slagg. Röd linje/cirkel = Anläggningscement.

Tabell 3.4. Kapilläruppsugningskoefficienter

Betong	Kapillaritetstalet k_{cap} [kg/(m ² vs)]	Motståndstalet m_{cap} [s/m ²]	$v_{t_{cap}}$	Aktiv porositet	Total- porositet
Referens (Anl.)	6,79×10 ⁻³	16,7×10 ⁷	202	8,79 %	13,4 %
Bygg- & Slagg	4,20×10 ⁻³	22,4×10 ⁷	223	6,28 %	11,9 %

3.6 3D SKANNING

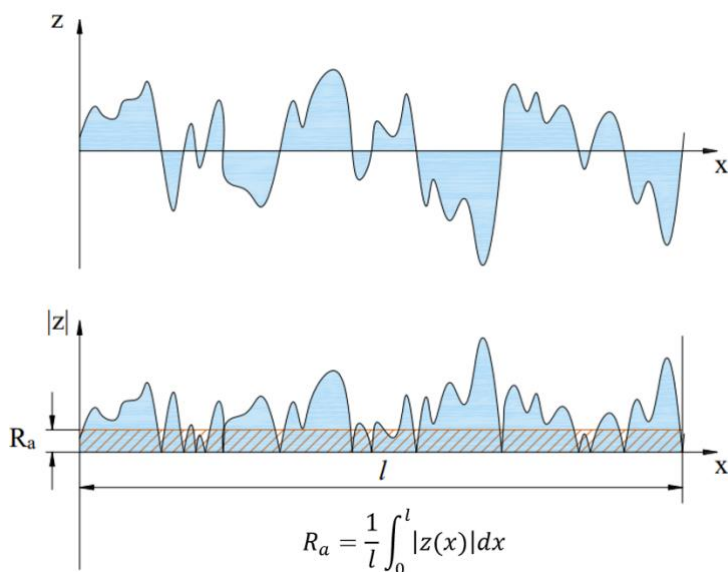
För att jämföra beständigheten mot yterosion hos de två betongerna efter ca 10 års exponering 3D-skannades ytan på panelerna samt en del av det igengjutna isutskovet. Skanningen av elementen genomfördes av Thomas Concrete Group och utfördes med en bärbar laserskanning HandyScan700 från Creaform, med en noggrannhet på 30 µm och en maximal upplösning av det genererade punktmolnet på 0,05 mm.

Idealt sett, genom att skanna panelerna före och efter att ha utsatt dem för fältmiljön, skulle förlusten av ytmaterial kunna beräknas som skillnaden mellan de två skanningarna. Men eftersom en skanning före exponeringsperioden saknades, var det inte möjligt att exakt bestämma den faktiska materialförlusten. Dessutom, på grund av den ojämna ytan och den uppenbara förlusten av pasta på ytan som lämnade ballasten exponerad, var det utmanande att ens skapa en referensplan för att uppskatta det initiala ytillståndet. I stället bestämdes ytans lokala grovhet vid olika punkter som en indikator på den potentiella ytförsämringen.

Samma procedur användes för att bestämma den lokala grovheten hos panelerna och isutskovet. Först delades den skannade ytan i mindre kvadratiska områden på 50×50 mm. I båda fallen uteslöts kanterna på de skannade områdena av olika anledningar: för panelerna var kanterna mer oregelbundna och vissa hörn hade skadats lokalt, möjligen under hanteringen; för isutskovet visade skanningen en lägre kvalitetsupplösning runt kanterna på ena sidan.

Därefter bestämdes grovheten för varje mindre område som medelvärdet av absolutdjupet med avseende på ett passningsplan beläget vid den genomsnittliga z-koordinaten för området enligt Ekv. (2). En grafisk framställning av Ekv. (2) för det endimensionella fallet presenteras i Figur 13.

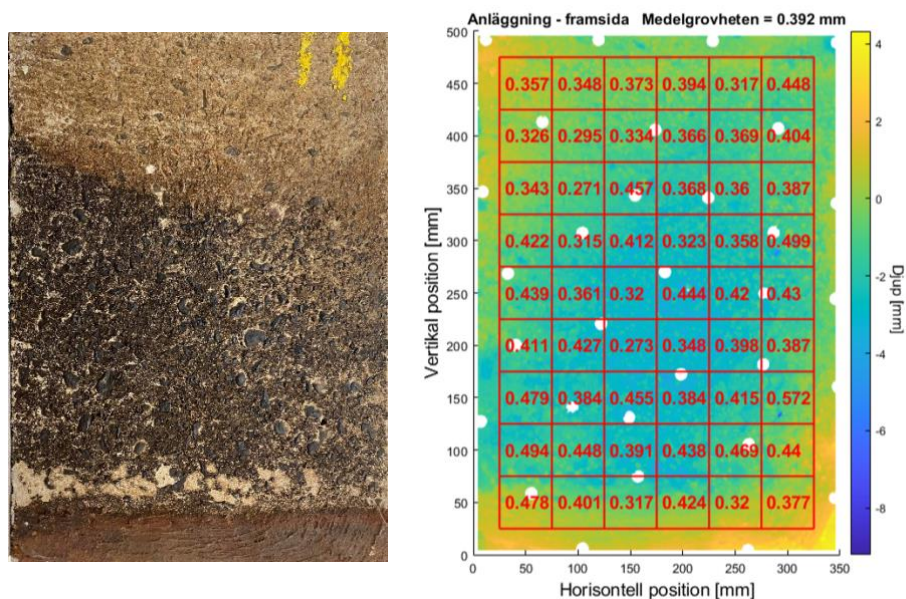
$$R_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| \, dx dy \quad (2)$$



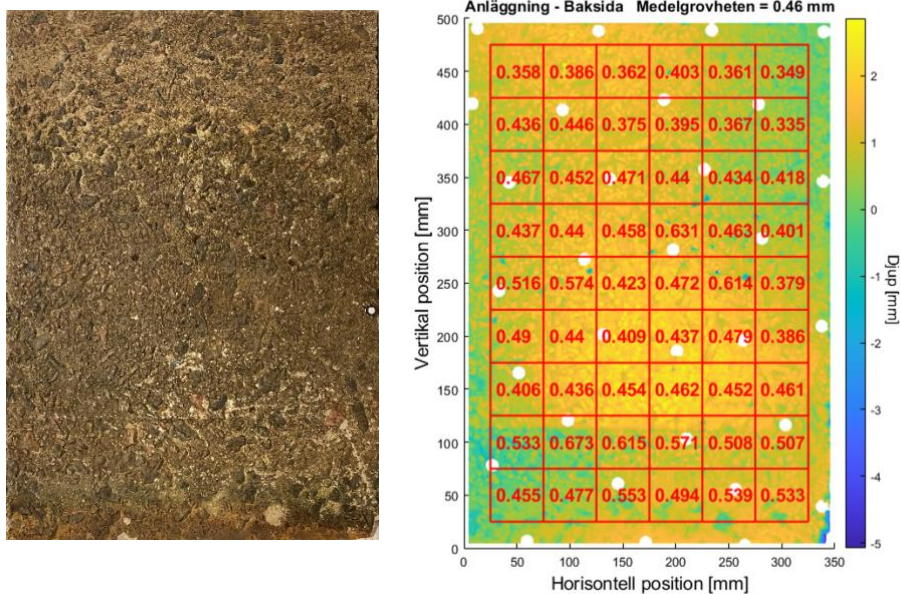
Figur 13. Grafisk representation av grovhetskonceptet som beskrivs av Ekv. 1

3.6.1 Paneler

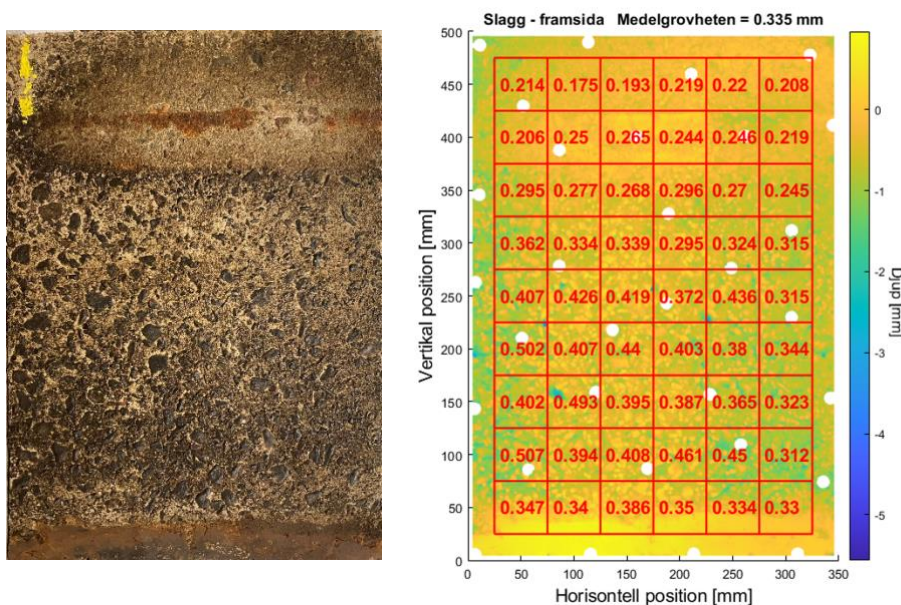
I Figur 14 till Figur 17 visas bilder av panelernas fram- och baksida tillsammans med de analyserade resultaten av 3D-skanningen, där punktmolnet presenteras i en färgskala som representerar de varierande djupen. Dessutom är den genomsnittliga grovheten för varje lokal kvadratisk region överlagrad på punktmolnet. Den genomsnittliga grovheten för hela panelytan och standardavvikelsen för den lokala grovheten sammanfattas i Tabell 3.5.



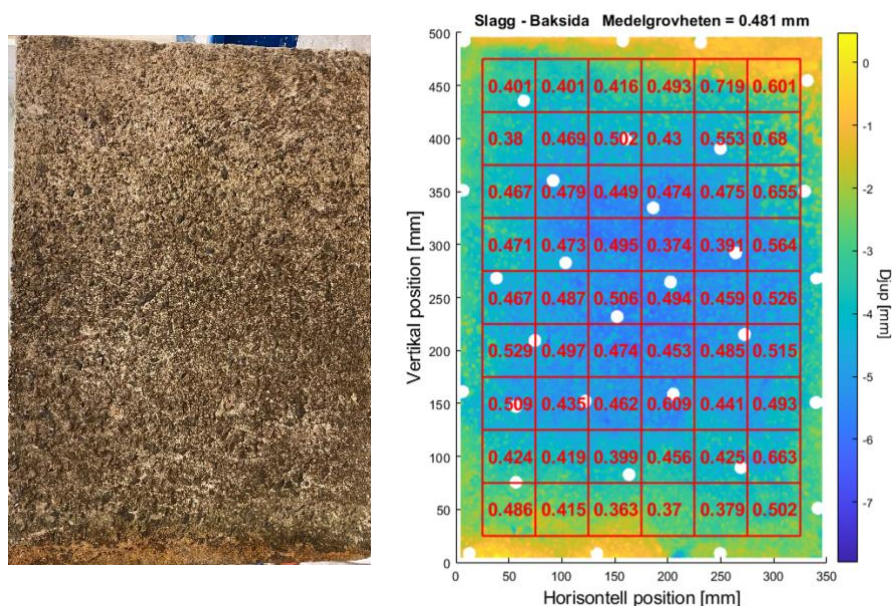
Figur 14. Anläggningscementpanel på framsidan: a) Bild av ytillståndet. (b) 3D-skannad yta som visar skillnaden i djup. Det röda rutnätet indikerar indelningen av panelytan för att beräkna ytans lokala grovhet.



Figur 15. Anläggningscementpanel på baksidan: a) Bild av ytillståndet. (b) 3D-skannad yta som visar skillnaden i djup. Det röda rutnätet indikerar indelningen av panelytan för att beräkna ytans lokala grovhet.



Figur 16. Slaggcementpanel på framsidan: a) Bild av ytillståndet. (b) 3D-skannad yta som visar skillnaden i djup. Det röda rutnätet indikerar indelningen av panelytan för att beräkna ytans lokala grovhet.



Figur 17. Slaggcementpanel på baksidan: a) Bild av ytillståndet. (b) 3D-skannad yta som visar skillnaden i djup. Det röda rutnätet indikerar indelningen av panelytan för att beräkna ytans lokala grovhet.

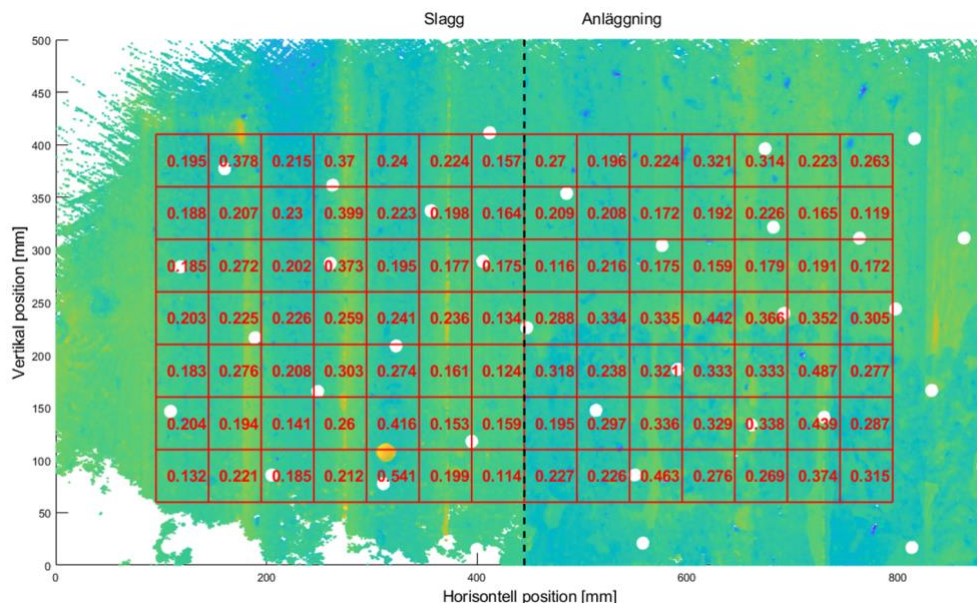
Tabell 3.5. Medelvärde och standardavvikelse av lokala grovheten hos de olika panelerna

Panel	Medelvärde [mm]	Std. Avvikelse [mm]
Anläggningscement - framsida	0,392	0,061
Anläggningscement - baksida	0,460	0,075
Slaggs cement - framsida	0,335	0,085
Slaggcement - baksida	0,481	0,078

Som man kan observera är skillnaden i den genomsnittliga grovheten hos panelerna gjorda med referensbetong med anläggningscement och med slaggcement mindre än standardavvikelsen inom en panelyta. Detta tyder på att de observerade skillnaderna inte är signifikanta och inte kan hänföras till betongsammansättningen. Detta stöds också av att skillnaden i grovhet uppmätt mellan fram- och baksidan av varje panel är större än mellan samma sida av de olika panelerna.

3.6.2 Isutskov

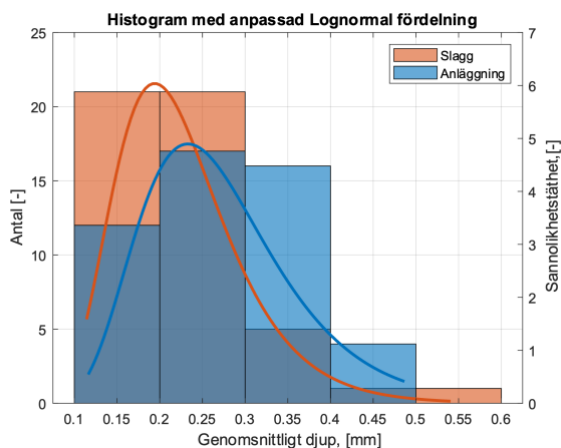
Utöver de två panelerna gjordes ytterligare en skanning på uppströmsytan av isutskovet som göts med båda betongerna. En cirka 1 m bred och 0,5 m hög yta skannades inklusive gränsen mellan de två betongerna (se Figur 18). Innan skanningen borstades ytorna med en kvast för att få bort avlagringar. Vid borstningen försvann även viss mängd löst sittande cementpasta.



Figur 18. 3D-skannad väggyta som visar skillnaden i djup. Vänstra sidan visar delen gjuten med slaggcement och högstra sidan med anläggningscement. Det röda rutnätet indikerar indelningen av väggytan för att beräkna ytans lokala grovhet.

En region på 0,35×0,35 meter valdes inom varje sida av gränsen mellan de två betongerna, och som nämnts tidigare delades dessa regioner upp i 50×50 mm kvadrater, vilket resulterade i totalt 49 mindre områden för varje betong. Därefter bestämdes grovheten för varje mindre område enligt Ekv. (1).

I Figur 19 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.



Figur 19. Histogram för ytråhetsfördelning.

4 Slutsatser

Det går i dagsläget att notera små skillnader mellan de båda betongerna. Noterade skillnader i hållfasthetsutveckling och kapillärsugning 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 t.ex. påverkat ytskiktet något, t.ex. 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 ca 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.

5 Referenslista

Betonghandbok Material. Del 2, Svensk Byggtjänst, 2021.

Produktdatablad Slagg Bremen, Thomas Cement AB, Reviderad 2018-02-19.

Nordström, E., Bryne, L-E. (2021). Långtidsexponering av vattenbyggnadsbetong med SCM. Rapport 2021:768, Energiforsk, Sverige.

Rosenqvist M. (2016). Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures – Interactions between water absorption, leaching and frost action. Doctoral thesis, Report TVBM-1036, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2016.

Rosenqvist M. (2018). Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad. Rapport 2018:481, Betongtekniskt program vattenkraft, Energiforsk, Sverige.

Sahlén Zetterberg, T., och Fölster J. (2022). Har kalciumhalterna i svenska sjöar och vattendrag nått kritiskt låga nivåer? Rapport 2022:8, Sveriges lantbruksuniversitet, SLU.

UTVÄRDERING AV SLAGGBETONG EFTER 10 ÅRS EXPONERING

I byggbranschen som stort finns ett stort fokus på att minska utsläppen av CO₂ och som ett led i detta arbetar cement- och betongindustrin med att minska mängden portlandklinker vid betongtillverkning genom att använda blandcement. Framöver kommer tillgången till rena portlandcement vara begränsad.

Den betong som traditionellt använts inom vattenkraftsindustrin är rena portlandcement (CEM I) och för dessa finns det därför stor erfarenhet med avseende på beständighet och andra viktiga egenskaper. För betong baserad på blandcement finns mer begränsad erfarenhet.

Isutskovet i Skogsforsen göts igen 2013 och för att skaffa mer erfarenhet av blandcement användes dels en traditionell vattenbyggnadsbetong med anläggningscement och dels med en betong med slagg. Vid samma tillfälle göts även provpaneler av samma betongkvaliteter som placerades ut på dammens uppströmssida.

Denna rapport utgör första utvärderingen av betongerna efter 10 års exponering.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.