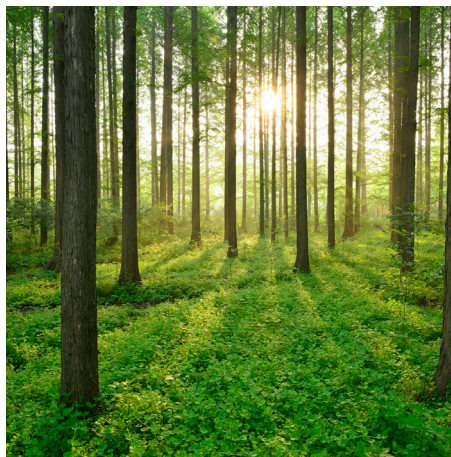


ERFARENHETER AV FLYGASKEBETONG

RAPPORT 2024:1028



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Erfarenheter av flygaskebetong

**KARIN APPELQUIST, BIRGIT FREDRICH
MANOUCHEHR HASSANZADEH**

ISBN 978-91-89919-28-0 | © Energiforsk juni 2024

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

Förord

För att minska koldioxidutsläppen vid tillverkning av cement så kan cementklinker ersättas till viss del med flygaska, vilket introducerades till vattenkraftens betongkonstruktioner på 2010-talet. Syftet med detta var att reducera värmeutvecklingen i betongen i byggnadsskedet. Denna för vattenkraftens konstruktioner mer gynnsamma värmeutveckling har dock inte erhållits.

För att kunna tillmötesgå behovet av reducerad värmeutveckling, så har flygaska på senare år tillförts i betongens beredning, snarare än i cementets tillverkning. Detta har skett i renoveringar och ombyggnationer av kraftstationer och dammar, bl.a Lilla Edet, Forshuvudforsen samt Rengård. Dokumentation av flygaskebetongens prestation vid laboratorie- samt praktiska erfarenheter i fält kan därmed spridas. Projektet "Erfarenheter flygaskebetong" har syftat till att sammanställa denna dokumentation och sprida kunskap och erfarenheter från de olika projekten. Fokus har lagts på att återge praktiska erfarenheter från gjutning och efterbehandling av betongen.

Projektet har utförts av Karin Appelquist, Birgit Fredrich och Manouchehr Hassanzadeh, alla tre med bred erfarenhet och kompetens inom vattenbyggnadsbetong, på Sweco Sverige. 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 representanter från programmets styrgrupp, Per Fektenberg och Martin Rosenqvist.

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

Sammanfattning

Praktiska erfarenheter av betonggjutningar med flygaskebetong har samlats in genom intervjuer med aktörer inblandade i vattenkraftsprojekten Lilla Edet (ny utskovsdamm), Forshuvudforsen (utskovsdamm) och Rengård (ny vattenkraftstation). Frågor har varit utformade med olika frågeställningar mot fyra svarsgrupper: entreprenörer, betongtillverkare, beställare och konsulter.

Genom dessa intervjuer konstateras att flygaskebetong (betong där flygaska tillsätts vid betongens beredning) möjliggjort att grövre vattenkraftkonstruktioner kunnat gjutas utan kylning. Totalt innehåller betongen 30-35% flygaska (inkl ev. flygaska som ingår i cementet). Utöver tillsatsmaterial i form av flygaska har cementmängden och kylbehovet kunnat reduceras genom att använda en grövre ballast ($D_{\max} > 32$).

Projekten har föregåtts av en omfattande förprovning för utvärdering och avvägningar gällande betongens egenskaper. Vissa anpassningar och avsteg gentemot praxis har krävts, för att tillgodose projektens utmaningar gällande den grövre betongens arbetbarhet och pumpbarhet. Dessa inkluderar $v_{ctekv} 0,5$ och att tryckhållfastheten uppnås efter 50/90d istället för 28d (långsammare hållfasthetsutveckling även om den i slutändan är högre), något som också innebär att konstruktionen inte kan belastas efter 28d.

Betongen beskrivs möjliggöra större gjutetapper, färre gjutfogar och en förbättrad arbetsmiljö; samt ge mindre och färre sprickor under betongens avsvanande och hårdnande. Däremot saknas erfarenheter av hur kloridtröskelvärdet påverkas; hur krympning och krypning påverkas; samt hur långtidsegenskaper som betongens frostbeständighet påverkas.

De största skillnaderna mellan projekten är cementtypen (Anläggningscement eller Anläggningscement FA), vilket framförallt påverkar mängden flygaska som kan tillsättas vid betongens beredning; samt att ett projekt valt att låta frostprovning ersätta lufthaltskraven.

Nyckelord

Betong, FA, Flygaska, Klimatförbättrad, Tillsatsmaterial, Vattenkraft

Summary

Practical experiences of concrete castings with fly ash concrete have been collected through interviews with actors involved in the hydropower projects Lilla Edet (discharge dam), Forshuvudforsen (discharge dam), and Rengård (new power station). Questions are designed for four different groups of respondents: contractors, concrete manufacturers, clients, and consultants.

Through these interviews, it has become clear that fly ash concrete (concrete with fly ash addition) has made it possible to cast larger structures without cooling of concrete while still producing high-quality concrete. In total, the concrete contains approx. 30-35% fly ash (including fly ash which is part of the cement). The combination of fly ash additives and the use of coarser aggregate ($D_{\max} > 32$) allowed for a reduced amount of cement and a reduced need for cooling.

The projects were preceded by extensive pre-testing for evaluation and considerations regarding the properties of the concrete. Some adjustments and deviations from standard practices have been required to accommodate the challenges of the projects concerning the workability and pumpability of the coarser concrete. These include a water-binder ratio (w/c_{eq}) of 0.50 and that the compressive strength can be measured after 50 or 90 days instead of the standard 28 days as fly ash concrete has slower but ultimately higher strength development (which also means that the structure should not be loaded after 28 days).

Advantages of the fly ash concrete are described as concrete not needing cooling which enables larger casting sections, fewer construction joints and an improved working environment; high-quality concrete resulting in less and fewer cracks (during the concrete's cooling and hardening). However, there is a lack of experience regarding how the chloride threshold value is affected; how shrinkage and creep are affected; and how long-term properties such as the concrete's frost resistance are affected.

The biggest differences between the projects are the type of cement used (Anläggningscement or Anläggningscement FA), which primarily affects the amount of fly ash that can be added during the preparation of the concrete; and that one project has chosen to let frost testing replace the air content requirements, due to challenges with the consistency of the concrete.

Key words

Climate-improved, Concrete, Fly ash, Hydropower,

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Projektets syfte och rapportindelning	9
1.2	Avgränsningar/Förtydliganden	10
2	Bakgrund - Historisk användning av betong med flygaska i Sverige	11
2.1	Portlandcement / Standardcement från tidigt 1800-tal	12
2.2	cementtillverkning i Sverige (1870-tal och framåt)	12
2.2.1	Slaggcement (tidigt 1900-tal)	13
2.3	1920-talets betong	13
2.4	1930-talets betong	15
2.4.1	Utvecklingen av nya cement under 1930-talet	15
2.4.2	Silikatcement / LH-cement (1932 – 1984)	15
2.4.3	Pansarcement (1930-talet)	16
2.5	1940- till 70-talet	17
2.5.1	E-cement (1941-1954)	18
2.5.2	Vulkacement (1954-1972)	19
2.5.3	Standard Portlandcementbetong (1950 – 70-talet)	19
2.6	1980-talet	20
2.6.1	Massivcement (1978–1982)	21
2.6.2	Standardcement M (ca 1982-1989)	21
2.6.3	Anläggningscement (1983 och framåt)	21
2.7	1990-talets betong	21
2.8	2000-talets betong	22
2.9	2010-talets betong	23
2.9.1	Anläggningscement FA	25
2.9.2	Bascement	25
2.10	2020-talets betong	25
3	Flygaskebetongens egenskaper	29
3.1	Önskvärda Egenskaper för Vattenkraftkonstruktioner	29
3.2	Färska till unga egenskaper	30
3.3	Hårdnade egenskaper	32
3.4	Beständighetsaspekter i hårdnad betong	32
4	Praktiska erfarenheter från gjutning med flygaskebetong	37
4.1	Metod	37
4.1.1	Intervjuer	37
4.1.2	Avgränsningar/förtydliganden	37
4.2	Resultat	37
4.2.1	Lilla Edet	37
4.2.2	Forshuvudforsen	41
4.2.3	Rengård	45

4.2.4	Skillnader/likheter	49
4.3	SLUTSATSER	54
5	Referenslista	55
BILAGA 1: CEMENTEGENSKAPER ENLIGT CEMENTAS PRODUKTDATABLAD 2023		60
BILAGA 2: FRÅGEFORMULÄR		62
BILAGA 3: SAMMANSTÄLLNING AV SVAR FRÅN INTERVJUER		70

1 Inledning

Betongdammar utgör vanligen ett delsystem i en dammanläggnings dämmande funktion. Oavsett konstruktionstyp och konstruktionsutformning ställs höga krav på betongens egenskaper i vattenbyggnadsanläggningar – och särskilt på betongdammar som utsätts för ensidigt vattentryck – inte bara gällande dess stabilitet och hållfasthet, utan även på dess arbetbarhet, vattentäthet och beständighet, egenskaper som också är starkt kopplade och beroende av varandra. Täthet och frostbeständighet är dessutom starkt kopplade till betongens värmeutveckling och eventuell sprickbildning som kan uppkomma under betongens hårdnande, varför en begränsad värmeutveckling är önskvärt i vattenbyggnadskonstruktioner.

För att tillmötesgå behovet av betong med en reducerad värmeutveckling har flera kraftbåda, tagit initiativ till användning av betong med kiselrik flygaska från koleldade kraftverk i Europa. Syftet med inblandningen av flygaska i betongen är att erhålla en lägre och långsammare värmeutveckling, varför flygaska blandas in i betongen, tillsammans med Anläggningscement (CEM I) eller Anläggningscement FA (CEM II/A-V) vid betongens beredning. Denna betong benämns i denna rapport som *flygaskebetong*, men går ibland också under beteckningen *konceptbetong*. Flygaska kan även tillsättas vid cementets tillverkning, men i de fall man gör detta i Sverige idag (Heidelberg Materials Cements *Anläggningscement FA*, ett CEM II/A-V cement), finns PC-klinkern – för att erhålla likvärdiga egenskaper som Anläggningscement – vilket motverkar den önskvärda effekten för grövre konstruktioner gällande begränsad värmeutveckling. Denna typ av betong beskrivs i rapporten som *betong med Anläggningscement FA*.

1.1 PROJEKTETS SYFTE OCH RAPPORTINDELNING

Syftet med rubricerat projekt är att dokumentera flygaskebetongens egenskaper och att påskynda spridningen av kunskap och erfarenheter av gjutning med flygaskebetong. Målet har varit att samla in och beskriva praktiska erfarenheter av gjutning med de olika varianterna av flygaskebetong som utvecklats på senare år och som används i Lilla Edet, Forshuvudforsen och Rengård; och att tillgängliggöra dessa erfarenheter för planering av kommande betongarbeten. Erfarenheter har samlats in genom intervjuer med respondenter från respektive anläggning, indelade i kategorierna Beställare, Entreprenör, Konsult och Betongleverantör.

För att sätta dessa erfarenheter i kontext, görs först (avsnitt 2) en tillbakablick på utvecklingen av olika ”moderna” cementtyper i Sverige (med moderna avses här cement innehållande Portlandcementklinker, dvs. cement som utvecklats sedan 1800-talet); och införandet av flygaskecement och flygaskebetong i Sverige. Avsnitt 3 beskriver flygaskans inverkan på betongens egenskaper. I avsnitt 4 beskrivs metodik och resultat från de intervjuer som genomförts. Skillnader och likheter mellan de tre projekten belyses i avsnitt 4.3.

1.2 AVGRÄNSNINGAR/FÖRTYDLIGANDEN

I denna rapport behandlas framförallt flygaska som tillsatsmaterial i betong. Andra godkända alternativa bindemedel behandlas endast översiktligt i avsnitt 2. Fokus ligger på flygaska som tillsatts vid betongens beredning, även om flygaska även i vissa hänseenden också utgör del av cementet (i dessa fall som CEM II/A-V; Anläggningscement FA). Det bör även noteras att svaren i intervjuer endast reflekterar respondenternas erfarenheter och att dessa inte nödvändigtvis har verifierats genom mätning, provning eller vedertagen uppfattning.

2 Bakgrund - Historisk användning av betong med flygaska i Sverige

För att förstå hur användningen av betong med flygaska sett ut i Sverige, görs först en återblick till hur betonganvändningen sett ut sedan den moderna betongens intåg, dvs. sedan portlandcementets införande, i Sverige.

Historiskt har traditionell betong med portlandcement (CEM I) varit dominerande vid damm- och vattenkraftverksbyggen i Sverige (Rosenqvist 2018; Strand et al. 2020; Ahlberg & Löfgren 2022). Betong som använts har hittills främst varit baserad på Limhamn Standardcement (från 1880-talet fram till LH-cementets införande under 1930-talet), Limhamn LH (från 1930-talet fram till att den svenska vattenkraftsutbyggnaden klingade av under 1970-talet) och Anläggningscement (från 1980-talet och framåt). Idag övergår man till att mer och mer använda Anläggningscement FA (CEM II) i och med att Anläggningscement fasas ut på den svenska marknaden. Det nya cementet har dock, särskilt inom vattenkraftbranschen, mötts med viss skepsis - även om användningen i stort sett fungerar som med Anläggningscement (Appelquist et al. 2023).

Inblandning av mineraliska tillsatsmaterial (flygaska, slagg och trass) har historiskt gjorts med syftet att reducera värmeutvecklingen i betongen vid damm- och kraftverksbyggen. Tillsats av mineraliska tillsatsmaterial har gjort cementets hårdnande långsammare. Även om användningen av flygaska från kolpulverförbränning internationellt är vanligt förekommande vid betongtillverkning, har användningen av flygaska i svensk betong – historiskt - varit begränsad, och särskilt i vattenkraftkonstruktioner. Troligen har detta att göra med att svenska flygaskor, som vanligen kommer från bränslmixer med hög andel biobränslen, inte är särskilt väl lämpade för användning i konstruktionsbetong. Det var egentligen först då hållbarhetsfrågan blev stor och klimatsmartare betong (med reducerade CO₂-utsläpp) efterfrågades som användningen av flygaska aktualiserades i Sverige. Den flygaska som används i Sverige idag importeras från Europa och det bör påpekas att flygaska (liksom slagg) kommer att bli bristvaror i takt med att kolbaserad kraftproduktion avvecklas i Europa och stålindustrin gör framsteg i sin klimatomställning.

Användningen av de olika cement-/betongsorterna som beskrivs i avsnitten nedan överlappar varandra, och utvecklingen av de olika cementsorterna har drivits på av olika historiska incitament genom årtiondena. Idag är det främst miljöskäl och önskan att minimera koldioxidavtrycken från betongen som driver på utvecklingen och införandet av nya alternativa bindemedel. För vattenkraftkonstruktioner har det hittills främst varit incitamentet att med en minskad klinkerandel också minska värmeutvecklingen och risken för sprickbildning i framför allt grövre konstruktioner som driver på utvecklingen av alternativa bindemedel.

För läsaren som endast är intresserad av flygaskebetongens utveckling i Sverige, hänvisas direkt till avsnitt 2.6.

2.1 PORTLANDCEMENT / STANDARDCEMENT FRÅN TIDIGT 1800-TAL

”Modern betong” i form av Standardcementbetong, även kallad Portlandcementbaserad betong, utvecklades under 1800-talet under i princip tre steg. Joseph Aspdin utvecklade under tidigt 1800-tal ett snabbhärdande cement genom bränning av krossad kalk och lermineral som maldes efter bränning. Hans son William Aspdin utvecklade sedan cementet genom att bl.a. öka kalkinnehållet i cementet och att bränna råvarorna vid högre temperatur. Isaac Charles Johnson förbättrade produkten ytterligare genom att använda samma råvaror, men en betydligt högre temperatur (1450°C), vilket också ledde till att bindemedlet fick helt andra egenskaper än Aspdins produkter. I och med detta var grundprincipen för dagens portlandcement klar, även om utvecklingen för förbättrade egenskaper fortsätter än idag. För en mer ingående beskrivning av de viktigaste utvecklingsstegen för betong, rekommenderas avsnitt *Betong – En historia* i Ahlberg & Löfgren 2022. Fram tills dess att den inhemska produktionen av portlandcement startade i Sverige importerades cement från främst Europa.

Betongen som tillverkades under den här tiden var främst oarmerad, och användes inledningsvis för grundläggning och underbyggnader.

2.2 CEMENTTILLVERKNING I SVERIGE (1870-TAL OCH FRAMÅT)

Sveriges första cementfabrik började producera portlandcement i Lomma 1872, men flyttades senare till Limhamn och efterföljdes av fabrikerna i Visby 1884, Degerhamn 1888 och Hellekis 1892 (Edström 1925). Att fabrikerna var koncentrerade till dessa delar av Sverige hade att göra med att berggrunden där består av lämplig kalksten och lerhaltig mörgelsten av utmärkt kvalitet. Kort därefter började dammanläggningar och vatten- och avloppsanläggningar nästan uteslutande byggas med Limhamns cement i Sverige. Inledningsvis med Limhamn standard och senare Limhamn silikatcement / LH-cement (LH-cement beskrivs vidare under stycke 0).

Runt det förra sekelskiftet användes en betydligt lägre andel vatten i betongen än vad som används idag och under 1900-talets tidiga vattenkraftsutbyggnad fanns en tro på att betongens vattentäthet snarast var beroende av konstruktionens mäktighet. En cementfattig stampbetong antogs bli vattentät under förutsättning att konstruktionen var tillräckligt grov. Delar av vattenkraftanläggningarna uppfördes som armerade betongkonstruktioner i slutet av 1890-talet, men det gällde främst balkar, bjälklag och ovan mark belägna trycktuber (Rosenqvist 2018).

I Sverige var Kungliga Vattenfallsstyrelsen pådrivande i betong- och cementforskningen eftersom stora mängder betong krävdes till vattenkraftutbyggnaden. Konstruktioner i dammar och vattenvägar var ofta grova och skulle stå emot ensidiga vattentryck, vilket ställde speciella krav på både gjutegenskaper och hållfasthet. De första kraven på cement och betong fastställdes i statliga normer på 1910-talet. Åtskilliga av de specialcementsorter som togs fram för vattenkraftändamål kom att påverka hela den svenska cementtillverkningen och betonggjutningen (Ahlberg & Löfgren 2022).

I Sveriges första nationella cement- och betongbestämmelser (Svenska Teknologföreningen 1910) definierades portlandcement som ett "hydrauliskt bindemedel med minst 1,7 viktsandelar kalk (CaO) på en viktsdel löslig kiselsyra (SiO_2) + lerjord (Al_2O_3) + järnoxid (Fe_2O_3)". Inga andra typer av cement berördes i bestämmelserna. Portlandcement fick innehålla högst:

- 3 procent för särskilda ändamål gjorda tillsatser.
- 5 procent magnesium i form av MgO .
- 2,5 procent svavel i form av SO_3 (normalt från gips).

Tillsättning av mineraliska tillsatsmaterial eller kemiska tillsatsmedel reglerades ej (Rosenqvist 2018).

2.2.1 Slaggcement (tidigt 1900-tal)

Redan i slutet av 1800-talet fann man att det gick att ersätta en del av portlandcementet med andra oorganiska material i ett cement och ändå få liknande egenskaper. I Tyskland har man använt masugnsslagg (hyttsand) i större mängder som en ersättning för klinker sedan 1882 och i Sverige användes slagg under tidigt 1900-tal i *slaggcement* som till 85 % bestod av slagg eller *järnportlandcement* som innehöll 30 % slagg. Inget av dessa cement fick dock någon större användning pga. dess bristande kvalitet och tillverkningen upphörde snart (Rosenqvist 2018).

2.3 1920-TALETS BETONG

I början av 1920-talet gjordes upptäckten att många av de nya vattenkraft-konstruktionerna hade drabbats av allvarliga skador och läckage. Ägaren (Vattenfall) slog larm om att betong i dammar och kraftstationer på grund av genomsipprande vatten efterhand lakades ur – vilket skapade läckage då den utsattes för ensidigt vattentryck. På dess väg genom betongen löste vattnet ut cementets kalk, vilket sedan följde med vattnet ut ur konstruktionen och under vissa omständigheter bildade vita utfällningar på ytan. Utredningar visade också att de yttre påfrestningarna på vattenbyggnadsbetong är kraftigare än de är för betong i stadsmiljöer. Behovet av att snabbt ta fram en vattentät betong som var resistent mot kalkurlakning föranledde forskningsinsatser och experiment som till en början bedrevs vid Statens provningsanstalt. Försöken inkluderade provningar med hänsyn till bl.a. betongsammansättning och proportionering för att främst erhålla tillräcklig vattentäthet och motstånd mot urlakning i svensk vattenkraftsmiljö. Utredningarna under 1920-talet visade att mängden vatten var avgörande för betongens vattentäthet (och beständighet) varför vattencementtalet (vct) gavs stor betydelse vid betongens proportionering. Utvecklingen gick snabbt framåt, man ändrade arbetssätt gällande betongens sammansättning/proportionering, blandning och bearbetning. Från att ha proportionerats för att erhålla så hög hållfasthet som möjligt med minsta möjliga cementmängd förbättrades betongkvaliteten (särskilt för svenska dammar) genom en kombination av betongproportionering, förbättrad cementkvalitet och optimering av ballastens kornstorleksfördelning, samtidigt som man övergick från stampbetong (ca 1890–1950) och våt- och blötbetong (ca 1900–1930) till vibrerad

betong från 1930-talet och framåt. Vibrerad betong ansågs från denna tid fram till den självkompakterande betongens införande vara en förutsättning för ett så bra resultat som möjligt. Vibreringsteknikens introduktion gjorde det också möjligt att uppföra tunna och hårt armerade konstruktioner med betong av god kvalitet. (Rosenqvist 2018; Nordström & Hassanzadeh 2018; Ahlberg & Löfgren 2022).

Den främsta nackdelen med en högre cementhalt visade sig vara cementets värmeutveckling i samband med betongens hårdnande. Högre cementhalter ledde till kraftigare värmeutveckling som i sin tur kunde leda till en omfattande och allvarlig sprickbildning. Sprickbildningen kunde dock minimeras med hjälp av två strategier (Rosenqvist 2018):

- Byggnadstekniken genomgick betydande förändringar, särskilt i sättet som konstruktioner uppfördes på. För att reducera värmeutvecklingen började man dela in konstruktionsarbetet i distinkta gjutetapper. Dessa gjutetapper var noga planerade och tydligt definierade i ritningsunderlagen. Avsvalningsfogar skapades för att hantera de termiska expansionerna under betongens avsvalningsfas, medan krympfogar tillät betongen att krympa utan att skapa spänningar som kunde leda till sprickor.
- Nya cementsorter utvecklades vilket resulterade i lägre och långsammare värmeutveckling (se vidare under avsnitt 2.4)

1924 fastställdes de första statliga betongbestämmelserna. Dessa skilde sig inte i någon större mening från den Svenska Teknologföreningens bestämmelser från år 1910, men i jämförelse med bestämmelserna från 1910 tillkom begreppet vattencementttal som ett mått på förhållandet mellan bindemedel och lösningsmedel i betongen. Bestämmelserna omfattade även ballastens kvalitet och gradering samt hur armering skulle utföras och dimensioneras. Bestämmelser för slaggportlandcement, vilket också kunde benämnas järnportlandcement tillkom i 1924 års version, men tillsättning av mineraliska tillsatsmaterial eller kemiska tillsatsmedel i betongen reglerades ej i 1924 års upplaga. (Rosenqvist 2018; Ahlberg & Löfgren 2022).

1926 utgavs tilläggsbestämmelser till de statliga betongbestämmelserna, vilka specificerade tre typer av cement (Ahlberg & Löfgren 2022):

- Portlandcement
- Slaggcement (max 30 % slagg)
- Aluminatcement

Inga klinkerersättningsmaterial förutom den slagg som ingick i slaggcementet tilläts.

Krav började ställas – relaterat till inverkan av miljön – att täckskiktet skulle vara större i utsatta miljöer. För vattenbyggnadskonstruktioner gällde följande krav (Rosenqvist 2018):

- 20 mm för plattor och valv.
- 30 mm för balkar.
- 40 mm för pelare.

2.4 1930-TALETS BETONG

2.4.1 Utvecklingen av nya cement under 1930-talet

I tillägg till de vanliga cementsorterna utvecklades under 1930-talet olika specialvarianter, med olika kemiska sammansättningar och malningsgrad, för olika behov och lösningar. Danielsen (1935) beskrev att följande kvaliteter av cement tillverkades fabriksmässigt i Sverige: vanligt portlandcement, specialportlandcement, silikatcement, pansarcement och aluminatcement. Vidare delade Danielsen in **Portlandcement** i A- resp B-cement, där A-cement beskrevs som den vanligaste typen (med "bättre" värden än B). Klass A hade en lägsta tryckhållfasthet efter 28 dygn på 42 MPa och klass B en lägsta tryckhållfasthet efter 28 dygn på 24,5 MPa. >90% av cementen beskrevs vara av klass A.

Specialportlandcement beskrevs som ett snabbhärdande cement. **Silikatcement** som ett cement bl.a. för monolitiska konstruktioner (där låg värmeutveckling är önskvärt). Silikatcementet kom senare att saluföras som LH-cement, se avsnitt 0. **Pansarcement** (med "egenskapen att inom sig kemiskt binda den vid cementets reaktion med vatten avspaltade kalken") beskrivs användas vid damm- och andra byggnader i sk. aggressiva vatten, se avsnitt 2.4.3. **Aluminatcement** beskrivs hårdna hastigt under stark värmeutveckling och användes främst för "brådskanande betonggjutningar" och i stark kyla. (Rosenqvist 2018; Ahlberg & Löfgren 2022).

2.4.2 Silikatcement / LH-cement (1932 – 1984)

Limhamn Silikatcement eller LH-cement utvecklades av Vattenfall just för vattenbyggnadskonstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck, dvs. för grova konstruktioner med höga krav på täthet och sprickfrihet, såsom dammar och inre vattenvägar. Silikatcement var ett rent portlandcement, vilket i jämförelse med de dåtidens standardcement innehöll mer kisel- och järnoxid, samt något mindre kalk- och aluminiumoxid. Följden blev att cementets värmeutveckling var 20–30 % lägre än för vanligt standardcement. Förklaringen låg i en minskad andel av klinkerfasen trikalciumpsilikat (C3S), samt en ökad andel dikalciumsilikat (C2S). C3S har relativt hastig värme- och hållfasthetsutveckling medan C2S utvecklar värme och hållfasthet över längre tid. Den ändrade sammansättningen av klinkerfaserna medförde en reduktion av den maximala temperatur som betongen skulle få under cementets härdnande, men ökade också betongens bindetid, vilket tillät större gjutetapper liksom färre kostsamma konstruktions- och rörelsefogar. Utöver att vara långsamhärdnande, var även Limhamn LH-cementet lågalkaliskt och hade god sulfatresistens för en ökad "kemisk beständighet" (Fagerlund 1989; Rosenqvist 2018).

Vattenfall använde silikatcement / LH-cement för första gången vid Vargöns kraftverksbygge i Göta älv under åren 1932–1934. Det blev dock allmänt vedertaget att silikatcement hade begränsade gjutegenskaper (särskilt gällande dess arbetbarhet), vilket delvis kunde förklaras av dess grova malningsgrad. För att uppnå en betong som var tillräckligt lättarbetad, var det ofta nödvändigt att blanda in kiselgur som fillermaterial för att förbättra arbetbarheten. Under 1950-talet ökades cementets malningsgrad, för att förbättra den färska betongens

arbetbarhet, men denna förändring blev kortvarig eftersom man inte lyckades uppnå hållfasthetskraven med detta cement (Rosenqvist 2018).

Nackdelarna med silikatcementet var dels den ekonomiska aspekten – cementet var både dyrare än A-cement och resulterade i ökade kostnader för formar, dels krävde det noggrann efterarbetning för att undvika sprickbildning i horisontella betongytor; men dessa nackdelar vägdes upp av den reducerade risken för sprickbildning i konstruktionen som helhet, vilket ledde till minskade kostnader för underhåll av den färdigställda konstruktionen. Från 1950-talet till och med slutet av 1970-talet användes LH-cementbetong nästintill uteslutande vid byggnationer av konstruktioner som skulle utsättas för ensidigt vattentryck. LH-cementbetong användes i enstaka fall fram till och med 1983 då betong med anläggningscement började användas (Rosenqvist 2018).

2.4.3 Pansarcement (1930-talet)

Pansarcement är en typ av blandcement som fanns i två varianter: Pansar A och Pansar silikat. Pansar A framställdes genom sammalning av Limhamn standardcement med en tillsats om 20–25 % kalcinerad kaolinlera. Pansar silikat bestod av Limhamn silikatcement (LH-cement) och 10–15 % kaolinlera. Pansarcement hade en låg värmeutveckling och har bl.a. använts för dammar och kraftverksanläggningar såsom Krångede kraftverk i Indalsälven, Dejefors kraftverk i Klarälven och Malfors kraftverk i Motala ström (Ahlberg & Löfgren 2022).

Pansar silikatcement användes för första gången i stor skala vid konstruktionen av Krångede kraftverks betongdamm mellan åren 1933 och 1936. Cementet valdes för de delar av dammen som var utsatta för ensidigt vattentryck. På grund av den minskade värmeutvecklingen trodde man att Pansar silikat skulle minska risken för sprickbildning under betongens hårdnande, men istället tenderade krympsprickorna i betongens överytor att bli fler och större vid jämförelse med standardcement. Eftersom monoliterna till dammen dessutom hade delats in i flera gjutetapper tog betongarbetena längre tid än vad som ansågs försvarbart. Man drog liknande slutsatser vid kraftverksbygget i Malfors (1933–1936) där det i efterhand visade sig att en leverans av silikatcement (LH-cement) istället hade varit av sorten Pansar silikat. Inom några timmar efter avslutad gjutning uppträdde rikligt med stora ytsprickor på de horisontella överytorna, vilket krävde omfattande efterbearbetning. Vid Dejefors kraftverksutbyggnad användes både Pansar A och vanligt standardcement, och jämförande studier genomfördes. Pansar A visade sig ha en mycket kort bindetid på cirka en timme, vilket orsakade problem vid gjutning och bearbetning. Det behövde även tillsättas mer vatten till Pansar A för att uppnå önskad konsistens, vilket krävde mer bearbetning än betong med standardcement. Erfarenheter från bl.a. dessa projekt gjorde gällande att Pansar A krävde mer bearbetning än betong med standardcement för att uppnå önskvärt vattencementtal (så lågt som möjligt). Vid avformning konstaterades en större andel luftporer i betongens ytor än vad som var vanligt för betong med standardcement. Även betongens hållfasthetstillväxt var långsammare med Pansar A jämfört med standardcement. Först vid 28 dygns ålder var egenskaperna likvärdiga för betong med de olika cementsorterna (Rosenqvist 2018).

Med den ökade förståelsen för hur betong med standardcement skulle proportioneras för att bli vattentät (under 1920- och 1930-talet), minskade efterfrågan på specialcement som Pansar silikat med ökad motståndskraft mot kalkurlakning. Som ett resultat av denna utveckling upphörde tillverkningen av pansarcement efter bara några år (Rosenqvist 2018).

1934 gavs en ny utgåva av Statliga cementbestämmelser ut. Tre klasser av portlandcement introducerades: A-, B- och "special" med olika hållfasthetsnivåer. Även slaggportlandcement och aluminatcement specificeras. Andra icke specificerade "cement-liknande bindemedel" fick användas efter särskilt godkännande och med restriktioner. Med avseende på inverkan av miljön ställdes krav på minsta cementmängd i tre olika nivåer och på täckskikt i fyra olika nivåer.

Cementmängd i betongkonstruktioner a) utsatta för ensidigt vattentryck eller b) i beröring med vatten och utsatt för ofta växlande frysning och upptining krävdes till 350 kg/m³, vilket gällde för både armerade och tunna konstruktioner, liksom för grova, oarmerade konstruktioner.

För vattenbyggnader och konstruktioner med krav på täthet fick "cementliknande bindemedel" användas endast under förutsättning, att genom särskilda undersökningar påvisats, att den med ifrågavarande bindemedel tillverkade betongen besitter åtminstone samma motståndsförmåga mot utlösning som betong med normenligt cement". Gemensamt för samtliga cementsorter var att det uppställdes krav på bindetid, malningens finhet, volymbeständighet, samt tryck- och draghållfasthet. Dessa egenskaper skulle bestämmas genom provningar enligt arbetsförfaranden fastställda av Statens Provvningsanstalt.

2.5 1940- TILL 70-TALET

Från 1940-talet byggdes traditionellt kraftverksdammar nästan uteslutande med Limhamns LH-cement (med cementhalter <350 kg/m³), dock med några undantag, av vilka några beskrivs nedan. I en del fall användes även puzzolana material som trass (ett vulkaniskt finmaterial, aska som importerades från Tyskland) eller latent hydrauliska material som slagg för att sänka värmeutvecklingen i betongen.

1942 gav Vattenfall ut egna anvisningar för betongberedning, i vilka man föreskrev inblandning av tillsatsmedel för förbättrad arbetbarhet. Även luftporbildare tillfördes betongen för att erhålla god frostbeständighet.

1942 utkom även statliga tilläggsbestämmelser för en ny klassindelning av betong (klass I, II eller III), där strängast krav gällde för klass I. Kraven varierade beroende av betongsort (A eller E), bl.a. gällande sammansättning/proportionering för viss önskad hållfasthet och minimicementmängd beroende av konstruktionstyp.

1943 ges en ny utgåva ut av de statliga cement- (och betong-) bestämmelserna, i vilka följande cement var godkända:

- Standard Portlandcement
- Snabbt hårdnande Portlandcement
- Långsamt hårdnande Portlandcement

- E-cement (ersättningscement som innehåller icke specificerade tillsatsmaterial och har lägre hållfasthet)
- Aluminatcement
- Slaggportlandcement

Reglerna i föregående utgåva för användning av klinkerersättningsmaterial och inverkan av miljön kvarstod oförändrade.

1949 fastställdes nya betongbestämmelser, även om cementbestämmelserna från år 1943 fortfarande var giltiga. Betong av klass I skulle proportioneras enligt "valfri, av vederbörande myndighet godtagen metod". Därefter skulle betongen genomgå förprovning med avseende på hållfasthet och vattentätthet. Innan förprovning av vattentätthet genomfördes fick "ingen gjutning av vattentät betongkonstruktion påbörjas". Betong av klass II och III proportionerades med stöd av proportioneringstabeller.

I **1960** års bestämmelser definieras följande cementtyper:

- Snabbt hårdnande Portlandcement (SH)
- Standardportlandcement (Std)
- Långsamt hårdnande Portlandcement (LH)
- Slaggcement

Gemensamt för samtliga cementsorter var att det uppställdes krav på bindetid, volymbeständighet, samt hållfasthet. Dessutom ställdes det krav på maximal värmeutveckling för långsamt hårdnande cement.

2.5.1 E-cement (1941–1954)

Runt Andra världskriget drabbades cementbranschen av många nedläggningar pga. av både stegrade energipriser samt att A-cement (standardcement) och silikatcement (LH-cement) ransonerades mellan 1941 och 1952, något som innebar att endast "kvalificerade förbrukare" fick tillgång till rent portlandcement. Till denna kategori räknades dock de större kraftverksbyggena, eftersom dessa skulle säkerställa landets kraftförsörjning. Som ett led i cementkrisen utvecklades under den här tiden E-cement eller ersättningscement, ett cement som brändes vid lägre temperaturer än vanligt standardcement och därför var energisnålare och billigare att tillverka. E-cementet kunde även ha inblandning av olika tillsatser såsom kalksten, sand, masugnsslagg eller tegel, dock saknades inledningsvis mängdreglering för dessa tillsatsmaterial. De statliga betongbestämmelserna tillät användning av betong med E-cement i konstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck (eftersom E-cement bedömdes vara ett fullgott alternativ till A- och silikatcement). Dock användes E-cement endast i mindre viktiga konstruktioner som inte skulle utsättas för ensidigt vattentryck – i de större kraftverksbyggena. Vid mindre kraftverksbyggen var det däremot inte ovanligt att E-cementbetong användes i samtliga konstruktioner. (Fagerlund 2010a; Rosenqvist 2018; Ahlberg & Löfgren 2022).

1949 infördes vissa restriktioner för användning av E-cement och **1960** togs det bort helt ur cementbestämmelserna.

2.5.2 Vulkancement (1954–1972)

r 1954 började Cementa tillverka ett slaggcement som benämndes Vulkancement. Cementet användes i bl.a. vattenanläggningar och dammar, såsom vattenkraftverken i Lindbyn 1953 och Trängslet 1955–1960 (båda i Dalälven). Slagginnehållet i vulkancementet varierade mellan 25 och 60 % beroende på årstiden. Slagg beskrivs av Ahlberg & Löfgren (2022) ha egenskaper som minskar cementets värmeutveckling, vilket ger mindre risk för sprickbildning i betongen och dessutom förlänger hårdnandetiden. Det vi med säkerhet vet är att om slagg ersätter en del av portlandcementet erhålls en minskad mängd portlandcement, vilket leder till att värmeutvecklingen per viktenhet bindemedel minskar. Tillverkningen av vulkancement pågick till 1972 med en topp omkring 1962 (Ahlberg & Löfgren 2022).

I 1960 års version av Statliga Cementbestämmelser – B1 definierades slaggcement till att ha mellan 25 och 60 % slagg.

2.5.3 Standard Portlandcementbetong (1950 – 70-talet)

Nya metoder för standardiserat bygga utvecklades under 1950-talet. Bland de tidigaste var Skånska Cementgjuteriets Allbetong-metod vid decenniets början med prefabricerade element som effektiviserade byggprocessen. Den inhemska efterfrågan på cement ökade kraftigt under 1950- och 1960-talen och under förverkligandet av miljonprogrammet 1965–1974 utgjorde betong och cement de viktigaste byggnadsmaterialen i Sverige (Centrum för Näringslivshistoria 2021).

Det är oklart varför LH-cement inte användes, men under den här perioden byggdes åtminstone två regleringsdammar i Dalarna (1953 respektive 1956) med standardcement CEM I och Hotagen byggdes 1960 med standardcement (Na_{ekv} 1,1). Anledningen till att detta uppdagades var troligen att det i dessa dammar utvecklades alkalisilikareaktioner (ASR), vilket resulterade i så kraftiga skador att de fick rivas i förtid (Betongföreningen 2020).

1965 ges Bestämmelser för betongkonstruktioner – Material och utförande – B5 ut. För cement gällde 1960 års B1 fram till 1982. Kraven i B5 relaterade till miljöns inverkan på betongen. Krav på betongens hållfasthetsklass, vattentäthet och lufthalt för sex olika miljöer införs. Bl.a. ställdes första gången statliga krav på att betong i frostmiljö skulle ha viss lufthalt. Täcksiktsskraven behålls, men revideras 1968 samtidigt som B5 revideras.

1979 ges Bestämmelser för Betongkonstruktioner, BBK 79 ut av Statens Betongkommitté. För cement hänvisas till B1 från 1960. Endast cementersättningsmaterial som ingick i cement accepterades. Krav på betongens hållfasthet, lufthalt, vattentäthet och vattencementtal, vct, anges för 6 olika miljöklasser. Dessutom anges krav på täcksikt och sprickvidd (Statens Betongkommitté 1979a och b).

2.6 1980-TALET

Under utbyggnaden av de svenska kärnkraftsanläggningarna på 1970-talet ställdes ytterligare krav på beständigt cement som varken urlakades eller riskerade sprickbildning. Detta var en förutsättning för de betonghöljen som skulle omsluta kärnreaktorerna. Nya långsamt hårdnande cementtyper utvecklades i samarbete mellan Vattenfall, forskningsinstituterna och cementbranschen. Den viktigaste cementtypen var *Anläggningscement* som lanserades av Cementa 1983. Den fick bred användning även i brokonstruktioner och annan infrastruktur. Det beskrivs av Fagerlund (1989) som "det i särklass mest lämpliga att använda i såväl måttligt grova som mycket grova vattenkraftkonstruktioner, t ex dammar", se vidare under avsnitt 2.6.2.

Under 1980-talet gav de svenska cementbestämmelserna möjlighet att även använda cement med andra hydrauliska eller puzzolaniska klinkerersättningsmaterial än masugnsslagg.

Godkända cementtyper definieras i B1 – Statliga cementbestämmelser, utgåva 2 (1982) utifrån halten portlandklinker som:

- Portlandcement (endast begränsad mängd övrigt)
- Modifierat Portlandcement (max 35 % hydrauliska eller puzzolaniska tillsatsmaterial)
- Blandcement (20–65 % portlandcementklinker).

Inga klinkerersättningsmaterial förutom de som ingick i cementet accepterades.

Däremot infördes en större förändring avseende krav på cementets hållfasthetstillväxt, vilket innebar att varje cement skulle definieras som

- Snabbt hårdnande (SH);
- Standardcement (Std); eller
- Långsamt hårdnande (LH)

LH-cementet, som fram till dess var det vanligaste dammbyggnadscementet, slutade tillverkas i slutet på 70-talet pga. att efterfrågan minskade. Istället introducerades, som komplement till anläggningscementet, under 1980-talet *Massivcement* (med 65 % slagg) och *Standardcement M* (med 23 % flygaska) på den svenska marknaden.

I slutet av 1980-talet öppnar standarderna även upp för användning av flygaska som tillsatsmaterial, dvs. för tillsättning av flygaska vid betongens beredning.

1988 ges utgåva 2 av BBK 1979 ut, i vilken Användning av tillsatsmaterial tillsatt vid betongblandningen introduceras (Statens betongkommitté 1988 a och b). Följande material behandlas:

- Flygaska A och B (k-värde'' = 0,3 respektive 0)
- Slagg
- Silikastoft (max 10 %, k-värde = 1)

Tillsatsmaterial ska vara typgodkända och användningen måste godkännas av "behörig myndighet". Genom en hänvisning till Planverkets föreskrift PFS 1985:2 anges kvalitetskrav på flygaska och silikastoft och deras användning (max 35 % respektive max 10 % beräknat på mängden portlandcement). Krav relaterade till inverkan av miljön modifieras genom att kravet på hållfasthetsklass ersattes med ett krav på vbt. Lufthaltskravet skärptes också. Täcksiktsskraven förblev dock desamma som tidigare.

2.6.1 Massivcement (1978–1982)

Cementas Massivcement innehöll ca 65% slagg och tillverkades från 1978 till 1982. Det användes i vattenanläggningar och kraftverksbyggnader, såsom Matfors (ombyggnad 1982) och Skallbölle (ombyggnad 1982) – båda i Ljungan. Betong med detta cement visade dock i vissa fall tecken på sprickbildning som sattes i samband med en alltför långsam hållfasthetsutveckling i tidig ålder. (Rosenqvist 2018; Ahlberg & Löfgren 2022).

2.6.2 Standardcement M (ca 1982–1989)

Standardcement M var ett modifierat portlandcement med inblandning av ca 24 % flygaska som tillverkades av Cementa i Skövdefabriken (Cementas *Teknisk Beskrivning, Bascement*). Askan kom från elektrofilter vid Västerås koleldade värmekraftverk. Cementet som marknadsfördes under namnet *Std M* hade ungefär samma hållfasthetsprofil som vanligt portlandcement och var tänkt att användas på samma sätt som detta. Till följd av problem med betongens luftporsystem och frostbeständighet upphörde tillverkningen av flygaskecementet efter ca sju år (Fagerlund 2010b). Det är inte känt om några vattenkraftkonstruktioner byggdes med detta cement.

2.6.3 Anläggningscement (1983 och framåt)

År 1983 introducerades Anläggningscement som ersättning för de äldre betongtyperna baserade på standardcement, LH-cement och blandcement och **fram till och med slutet av 2010-talet har betong med anläggningscement mer eller mindre uteslutande använts vid betongarbeten inom svensk vattenkraft.**

Anläggningscement är ett Typ CEM I Portlandcement som är anpassat för att användas i medelgrova till grova konstruktioner med krav på cement med moderat värmeutveckling och låg alkalihalt (<0,6 %). Anläggningscement har dessutom låg C3A-halt och ger därför ett ökat skydd mot sulfatangrepp.

Produktionen av Anläggningscement startade i Degerhamn i början av 1980-talet, men tillverkas idag endast i Slite. Under 2019 genomfördes en omläggning av cementtillverkningen för Anläggningscementet från Degerhamn till Slite, då tillverkningen av cement upphörde helt i Degerhamn.

2.7 1990-TALETS BETONG

1995 blev Sverige medlem i EU, men redan året innan började de svenska reglerna för cement och betong att påverkas av de europeiska standarderna. Även om

reglerna öppnade upp för nya cementtyper, användes, för vattenkraftsanläggningar, dock främst Anläggningscement.

Fagerlund (1993) gav i samband med utgivningen av BBK 94 ut textförslag och en teoretisk bakgrund till ändringarna. Bl.a. specificerades att som mineraliskt tillsatsmedel för betong avsågs endast "flygaska från storskalig förbränning av stenkol" samt att "Askan ska vara avskild i rökgasfilter och får inte innehålla svavel- eller ammoniumhaltiga produkter från rökgasavsvavling." Dessutom föreslogs att tillsatsmaterial endast fick ske i betong med cement av typ P (Portlandcementbetong). I BBK definierades även åtta miljöklasser, samt i det nationella anpassningsdokumentet (NAD) till ENV 197-1 i vilka miljöklasser de olika cementen fick användas.

ENV 197-1 ges ut **1994** och ett nationellt anpassningsdokument NAD utarbetas, i vilket nio cementsorter anses beprövade för användning i Sverige:

- CEM I Portlandcement
- CEM II / A-S Portland slaggcement (6–20 % slagg)
- CEM II / B-S Portland slaggcement (21–35 % slagg)
- CEM II / A-V Portland flygaskcement (6–20 % FA)
- CEM II / B-V Portland flygaskcement (21–35 % FA)
- CEM II / A-LL Portland kalkstenscement (6–20 % kalksten)
- CEM II / A-LS Portland kalksten slaggcement (6–20 % kalksten + slagg)
- CEM III / A slaggcement (35–65 % slagg)
- CEM III / B slaggcement (66–80 % slagg)

Utöver ENV 197-1, ges BBK 94 ut som reglerar tillsatsmaterial och maxhalter till:

- Silikastoft max 10 % (max 5 % i de mest aggressiva miljöklasserna, k-värde = 1)
- Flygaska max 35 % (k-värde = 0,3)
- Slagg max 100 % (k-värde = 0,6)

2.8 2000-TALETS BETONG

EN 197-1: 2000 definierade och specificerade 27 stycken ordinära cement och deras beståndsdelar; men fortfarande endast tre huvudtyper av cement. Cement typ I beskrevs som ett Portlandcement (>95% PC-klinker); typ II som ett sammansatt cement, dvs. portlandcement i kombination med masugnsslagg, silikastoft, flygaska, kalksten eller en kombination av ovanstående; och typ III som ett slaggcement. **För betong till anläggning förespråkades generellt cement typ I.** Tillåtet innehåll för flygaska i typ II cement var 6–20 % respektive 21–35 % beroende av exponeringsklass. Endast flygaska från kolpulvereldade förbränningsugnar var tillåtna. Dessutom beskrev EN 450 krav på kemiska och fysikaliska egenskaper gällande flygaska för betong, bl.a. max 10 % reaktiv CaO och LOI < 5 %.

2003 närmar vi oss en harmonisering med Europa då Boverkets Konstruktionsregler BKR istället hänvisar till betongstandarden SS-EN 206-1 (2001) och en svensk tillämpningsstandard antas (SS 137003, Användning av EN 206-1 i Sverige).

I och med detta försvinner CEM A-LS, men två nya cement tillkommer:

- CEM II/A-M Portland kompositcement (6–20 % klinkerersättningsmaterial)
- CEM II/B-M Portland kompositcement (21–35 % klinkerersättningsmaterial)

EN-standarder för silikastoft och flygaska för användning som reaktivt tillsatsmaterial (typ II) till betong antas och k-värden för tillsatsmaterialen anges i EN 206-1:

- Silikastoft, materialkrav enligt EN 13263, k-värde 1 och 2.
- Flygaska, materialkrav enligt EN 450, k-värde 0,2 och 0,4

Materialkrav och k-värde på slagg som tillsatsmaterial typ II behandlas i SS 137003. Miljöklasserna enligt BBK ersätts med exponeringsklasser enligt EN 206-1, för att reglera krav relaterade till miljöns påverkan.

I och med uppdateringen av den svenska tillämpningsstandarden SS 137003:2008, görs en genomgripande revidering. Användning av cement med klinkerersättningsmaterial utvidgas; tillåtna cementtyper och mängden tillåtna tillsatsmaterial i betong revideras, liksom k-värden för att bättre dra nytta av klinkerersättningsmaterialen när de används som tillsatsmaterial typ II. 50% flygaska tillåts i de flesta exponeringsklasser, dock med ett krav på $v_{tekv} \leq 0,45$ för vattenkraftkonstruktioner; 25 % flygaska tillåts i XS3, XD3 och XF4, men inga tillsatsmaterial alls i XA3.

2.9 2010-TALETS BETONG

När hållbarhetsfrågan aktualiserades i början av 2000-talet startade utvecklingen av nya cementsorter med lägre klimatpåverkan, ökat upptag av koldioxid hos betongstrukturer och koldioxidavskiljning följt av lagring eller återanvändning. Som ett led i detta introducerades under mitten av 2010-talet **Anläggningscement FA** och **Bascement**, två flygaskecement, på den svenska marknaden.

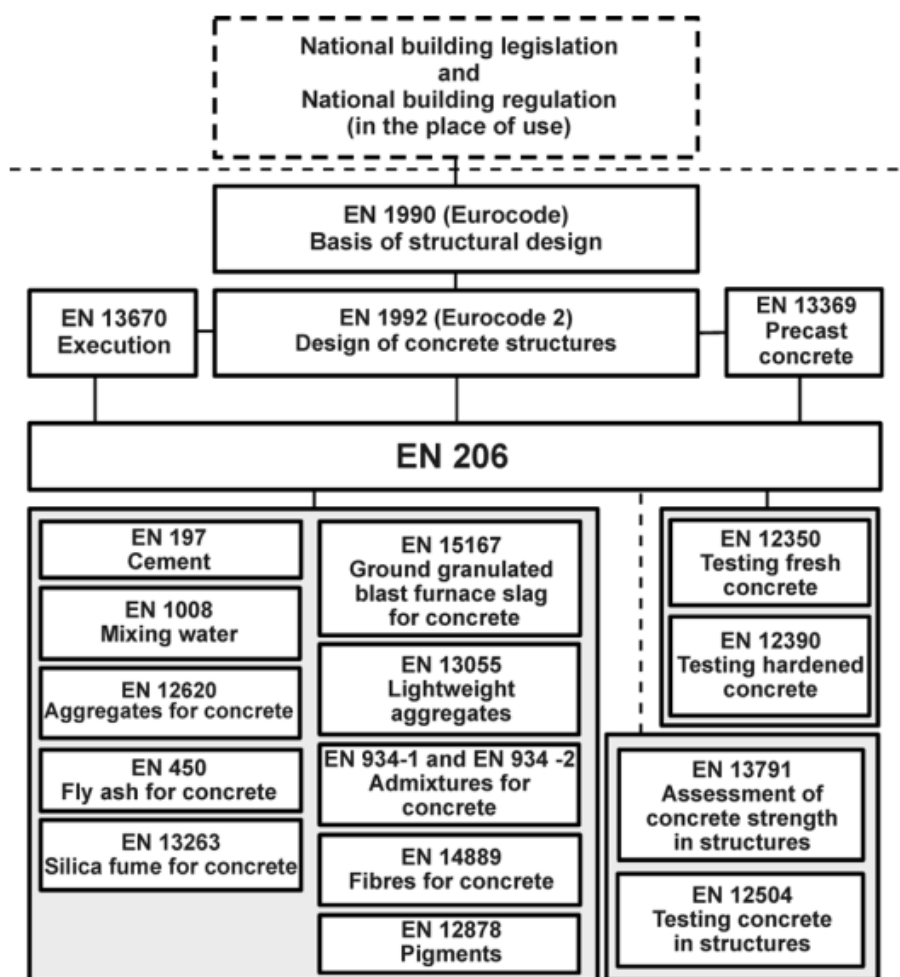
- 2011 uppdaterades cementstandarden SS-EN 197-1 och i denna beskrevs 27 produkter och fem huvudtyper av ordinära cement:
- CEM I är ett rent Portlandcement som innehåller minst 95 % PC-klinker.
- CEM II är sammansatta portlandcement. Beteckningen A betyder att 6–20 % av klinkern ersatts och B att 21–35 % ersatts med en annan huvudbeståndsdel (masugnsslagg, max 10 % silikastoft, puzzolaner (naturliga eller naturliga kalcinerade), flygaska (kisel- eller kalkrik), bränd skiffer eller kalksten). Kan innehålla fler än en huvudbeståndsdel utöver PC-klinker.
- CEM III är ett rent slaggcement med 36–95 % slagg.
- CEM IV ett puzzolancement där mellan 11 och 55 % av PC-klinkern ersatts av ett puzzolant material (kan vara silikastoft (max 10%), naturliga eller naturliga kalcinerade puzzolaner eller flygaska (kisel- eller kalkrik)).
- CEM V är ett kompositcement där mellan 36 och 80 % av PC-klinkern har ersatts av 18–49 % masugnsslagg och minst ett av materialen naturliga eller naturliga kalcinerade puzzolaner eller kiselrik flygaska.

Alla ordinära cement kan dessutom innehålla upp till 5 % odefinierade mineraliska mindre beståndsdelar.

2013 gavs en ny utgåva av SS-EN 206 ut, i vilken bl.a. en revidering av konceptet effektivitetsfaktor k för flygaska och silikastoft gjordes; tillägg av nya regler för mald granulerad masugnsslagg infördes; principer för funktionskoncept för användning av tillsatsmaterial introducerades, t.ex. koncepten likvärdig prestanda hos betong och likvärdig prestanda hos bindemedelskombinationer infördes. Tillsatsmaterial typ II som ansågs lämpliga att använda i betong var flygaska överensstämmande med EN 450-1; silikastoft överensstämmande med EN 13263-1; och mald granulerad masugnsslagg överensstämmande med EN 15167-1. För flygaska användes effektivitetsfaktor $k=0,4$.

Gällande kompletterande krav för betong till grova konstruktioner (dammar) och cement med mycket låg värmeutveckling hänvisas till EN 14216.

Se även Figur 1 för sammanhang mellan standarder för betong och dess delmaterial.



Figur 1. Sammanhang mellan EN 206 och standarder för konstruktion och utförande samt standarder för delmaterial och provning (från SS-EN 206:2013).

2015 uppdaterades den svenska tillämpningsstandarden SS 137003 och tydliggöranden gjordes avseende accepterade bindemedelssammansättningar och hur stor del av bindemedlet respektive huvudbeståndsdel får utgöra i respektive exponeringsklass. Denna version tillät upp till 35 % flygaska i de flesta exponeringsklasser, men maximalt 20 % flygaska i XF4 och i XF3 var endast 35% flygaska tillåtet om flygaskan utgjorde del av cementet. Dessa krav skärptes ytterligare då tillsatsmaterial användes tillsammans med ett CEM II eller CEM III-cement. Kravet på max v_{tekv} 0,45 i vattenkraftkonstruktioner skrevs om till att endast gälla för CEM II/B-S, CEM II/ B-M och CEM II/B-V (dvs. cement med 65–79% klinker, 21-35% kiselrik flygaska, masugnsslagg och/eller annan huvudbeståndsdel) i XF3 och vid ständigt hög fuktbelastning (t.ex. i delar av vattenkraftanläggningar). För övriga cement krävdes max v_{tekv} 0,55.

2.9.1 Anläggningscement FA

I Sverige har Anläggningscement FA använts sedan 2019 i större anläggningsprojekt – och sedan 2015 i mindre skala (Heidelberg Materials Cement, 2023). Anläggningscement FA är ett portlandflygaskecement av typ CEM II/A-V 42,5 N MH/LA/NSR som tillverkas i Slite och baseras på samma typ av lågalkalisk klinker med lågt innehåll av kalciumaluminater (C3A) som Anläggningscement, men som utöver PC-klinker innehåller 14% flygaska och 5% kalkfyller. Syftet med att ersätta PC-klinker med flygaska var att minska de koldioxidutsläpp som uppstår vid cementets tillverkning. Målet var även att cementet i så stor utsträckning som möjligt skulle efterlikna Anläggningscement, och att det skulle ha en liknande värmeutveckling. Därav har man valt att inte dra nytta av den minskade andelen Portlandcementklinker – och den för grövre konstruktioners önskvärda värme-reducerande egenskaper. Istället finmals Portlandcementklinkern (för snabbare värmeutveckling) så att den kombinerade effekten av finmald klinker och inblandad flygaska ger en värmeutveckling som efterliknar Anläggningscement.

2.9.2 Bascement

Bascement introducerades 2013 som ett byggcement med 16 % flygaska (CEM II/A-V 52,5 N), och tanken var att det helt skulle fasa ut Byggcement Slite. Bascement lanserades som en produkt anpassad till dagens högt ställda krav på ett hållbart samhällsbyggande; med lägre CO₂-belastning, ökad prestanda och högre 28-dygnshållfasthet jämfört med Byggcement; och beskrivs ge en smidig och stabil betong med minskat behov av vatten och tillsatsmedel. För att bredda basen av alternativa bindemedel bytte Cementa 2021 dock ut flygaskan mot oljeskifferaska, OSA i bascementet och cementet lanseras idag som Byggcement Slite CEM II/A-LL 42,5 R (Heidelberg Materials, 2021).

2.10 2020-TALETS BETONG

Idag vet vi att det går att minska den totala värmeutvecklingen och värmeutvecklingens hastighet genom att ersätta en del av bindemedlet (Portlandcementklinkerandelen) med tillsatsmaterial såsom flygaska och slag; samt att värmereduktionen kan korreleras till mängden tillsatsmaterial (Klemczak

& Batog 2016). 2021 års version av tillämpningsstandarden för betong öppnade upp för att använda mer klinkerersättningsmaterial och att ordinära cement skulle kunna användas för sig eller tillsammans med tillsatsmaterial såsom flygaska, slagg eller silikastoft (SS 137003: 2021). Med denna revidering blev det tillåtet med upp till 35 % kiselrik flygaska (i form av tillsatsmaterial) i samtliga exponeringsklasser (undantaget XA2 och XA3, i kemiskt aggressiva miljöer), i betong med CEM I eller CEM II/A. Mängdrestriktioner då flygaska utgör en del av cementet styrdes dock i SS-EN 197-1. Värdet för effektivitetsfaktor k för beräkning av v_{tekv} för slagg och flygaska breddades också med revideringen av SS 137003:2021.

År 2021 kompletterades cementstandarden med SS EN 197-5 där två ytterligare cementtyper definierades. Med dessa finns nu sex huvudgrupper av ordinära cement. De två nya cementen beskrivs som

- CEM II/C-M, ett Portlandkompositcement där ersättning av upp till 50% av klinkern kan göras. Som mest får två huvudbeståndsdelar användas, men dessa kan utgöras av 36–50% masugnsslagg, silkastoft, puzzolaner (naturliga eller naturliga kalcinerade), flygaska (kisel- eller kalkrik), bränd skiffer eller kalksten.
- CEM VI, ett kompositcement med 35–49 % PC-klinker, 31–59 % masugnsslagg och 0–20% naturliga puzzolaner, kiselrik flygaska eller kalkstensmjöl. I detta cement tillåts således upp till tre olika huvudbeståndsdelar.

År 2024 implementerades tillägg 1 (T1) till SS 137003:2021, vilket innebär att cementen ovan (CEM II/C-M och CEM VI enligt SS-EN 197-5:2021) också införts i tillämpningsstandarden, dock endast i XF1. Blandningsmöjligheterna utökas så att flygaska som tillsatsmaterial utöver CEM I, CEM II/A även kan användas med CEM II/B. Effektivitetsfaktor $k = 0,5$, men alternativ ges för att använda k -värde = 0,6 för högre hållfasthetsklasser. Största tillsatt mängd flygaska tillsammans med CEM II/B, som får medräknas vid beräkning av v_{tekv} med effektivitetsfaktor k , är krävställd till mängd flygaska/bindemedel $\leq 0,20$; och vid tillämpning av k -värdesskoncept för flygaska ska den totala andelen tillsatsmaterial begränsas till högsta tillåtna andel i respektive exponeringsklass.

Högsta v_{tekv} i XF3 är begränsad till 0,55 men max 0,45 rekommenderas vid användning av CEM II/B och CEM IV/A i konstruktioner ständigt utsatta för hög fuktbelastning (dämmande konstruktioner).

De vanligaste cementen för vattenkraftkonstruktioner på den svenska marknaden idag är Anläggningscement Brevik (från Norge, förekommer främst på den svenska västkusten) och Anläggningscement Slite, vilka är Portlandcement av typ CEM I 42,5 N SR3 MH/LA. Även Anläggningscement FA introducerades under 2023 i vattenkraftsprojekt allteftersom Anläggningscement Slite började fasas ut på marknaden. Dessa tre cement har i stort sett likvärdiga egenskaper då de används som det enda bindemedlet i betong (se bilaga 1).

Vid blandning av flygaska som tillsatsmaterial och Anläggningscement FA, måste dock den del flygaska som ingår i cementet (14 %) medräknas i den totala halten flygaska i betongen, varför en mindre mängd flygaska kan tillsättas vid betongens

beredning (med hänsyn till de restriktioner om max 35 % flygaska i betong i XF2-XF4 som den svenska tillämpningsstandarden SS 137003:2021+T1:2024 anger).

Notera att i XC, XS och XF1 får högre andel flygaska tillämpas om tillsatsmaterialet enbart ingår som en huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement enligt SS-EN 197-1:2011 eller SS-EN 197-5:2021 eller i en bindemedelskombination som motsvarar sådant.

RIDAS huvuddokument reviderades 2022 och TV9 för betongdammar 2020. Under avsnittet *Materialegenskaper* hänvisas till SS 137003:2015, SS-EN 206:2013 och SS-EN 197-1:2011. För minimiarmering hänvisas till SS-EN 1992:2008.

Gällande vct hänvisar RIDAS TV9 (2022) till SS137003:2015 med följande text:

Vid användning av rena portlandcement bör vattencementtalet (vct) ej överstiga 0,55 enligt tabell 8a i SS 137003:2015 [6]. Om blandcement eller ersättning av andelar av cementet med tillsatsmaterial används bör vct_{ekv} inte överstiga 0,45 för konstruktioner i exponeringsklass XF3 vilka utsätts för ständigt hög fuktbelastning (till exempel alla dämmande konstruktioner), detta av beständighetsskäl.

För konstruktioner med höga krav på nötningsbeständighet som till exempel skibord och pelarsidor i utskov bör vct ej vara högre än 0,50, vid användning av rena portlandcement.

RIDAS TV 9 (2020) rekommendationer är således skarpare än SIS gällande anvisningar (SS137003:2021+T1:2024), vilket innebär att då exempelvis Anläggningscement FA (CEM II/A-V) används i dämmande konstruktioner bör vct_{ekv} inte överstiga 0,45. Dock ges ingen anvisning avseende vct_{ekv} för konstruktioner med höga krav på nötningsbeständighet (som beskrivs ovan), vid användning av blandcement eller då delar av cementet ersätts med alternativa bindemedel.

RIDAS TV 9 (2020) hänvisar också till SS 137003:2015 för beskrivning av k-värdeskoncept och beräkning av vct_{ekv} med effektivitetsfaktor k då delar av cementet ersätts med tillsatsmaterial, enligt:

$$vct_{ekv} = \text{vattenhalt} / (\text{cementhalt} + \sum (k_i \cdot \text{halten tillsatsmaterial } i));$$

och effektivitetsfaktor, k för flygaska = 0,5 för flygaska upp till 20% av bindemedlet.

Flygaska används (liksom övriga alternativa bindemedel) som ersättning för PC-klinker för att, utöver att minska värmeutvecklingen i betongen, även minska klimatavtrycket från betongen. Eftersom flygaska är en restprodukt från kolförbränning kommer utsläppskvoten från flygaska räknas som nettonollutsläpp och klimatavtrycket från betongtillverkningen kan således minskas med motsvarande mängd flygaska som används. Däremot är det inte avgörande för CO₂-avtrycket om flygaskan utgör en del av cementet eller används som tillsatsmaterial i betongen, klimatavtrycket kommer minska med den totala mängden PC-klinker som ersätts oavsett. Flygaska har även en stävande effekt på ASR och det ger en "fillereffekt" som bidrar till en god arbetbarhet i betongen. Det råder dock viss oklarhet/oenighet om hur kloridtröskelvärde påverkas; hur krympning och krypning påverkas då del av bindemedlet ersätts av flygaska; vid vilka mängder dessa påverkas; samt hur långtidsegenskaper och betongens

frostbeständighet påverkas vid inblandning av flygaska. Flygaskans påverkan på betongens egenskaper beskrivs mer utförligt i avsnitt 3.

3 Flygaskebetongens egenskaper

3.1 ÖNSKVÄRDA EGENSKAPER FÖR VATTENKRAFTKONSTRUKTIONER

Många vattenkraftkonstruktioner är dels så grova, och dels gjutna mot berg, vilket innebär att de löper en förhöjd risk för temperaturrelaterade problem som grundläggs under hårdnandet. Dessa risker kan vara relaterade till försenad ettringitbildning (med försämrade hållfasthet och sprickbildning) om den maximala temperaturen i betongen överstiger 65–70°C eller sprickbildning p.g.a. inre tvång eller tvång mot underlag/angränsande konstruktioner. Riskerna kan minskas genom att hålla nere gjuttemperaturen på den färska betongen, bl.a. genom att begränsa mängden bindemedel – antingen genom att ersätta del av bindemedlet eller genom att använda så grov ballast som möjligt. Mindre cementpasta per volymenhet ger en lägre värmeutveckling och därmed en minskad risk för temperaturrelaterad sprickbildning vid tidig ålder. Användningen av grövre ballast ställer dock höga krav på cementpastans reologiska egenskaper, för att få en arbetbar betong och minska risken för sten- och bruksseparation som kan ge upphov till gjutskador och försämrade livslängd på konstruktionen. Även goda förutsättningar för att vibrera betongen så att den fyller ut formar, omsluter armering och ger minimalt med eftersättningar som annars kan ge sprickor är viktiga aspekter för en beständig vattenbyggnadsbetong (Nordström & Hassanzadeh 2018).

Den hårdnade betongen i vattenkraftkonstruktioner ställer höga krav på vattentäthet, vilket framförallt erhålles genom låga vattenbindemedelstal ($v_{ct}/v_{bt}/v_{ctekv}$), god komprimering, sprickfrihet och ett kvalitativt utförande. Urlakning i angränsning till sprickor, defekter i betongen, eller genom otäta partier, kan orsaka ökad porositet i betongen och en sänkning av pH vilket på sikt kan ge ytterligare ökat läckage, lokal hållfasthetsnedsättning och ökad risk för armeringskorrosion genom sänkt pH. Motstånd mot urlakning skapas genom att undvika sprickbildning (genom rätt materialval och bra utförande), men även genom att välja ett lämpligt vattenbindemedelstal, v_{ctekv} som skapar täthet hos betongen och därigenom motstånd mot urlakning. Utförandet vid anslutningar mellan gjutetapper är därför extra viktigt – både mot befintliga konstruktioner/gjutetapper samt kring ingjutningsgods och dilatationsfogar. Lyckas man med dessa ökar förutsättningarna för att betongen ska vara vattentät och beständig på lång sikt (Nordström & Hassanzadeh 2018; RIDAS 2020).

I dammar är det generellt inte en hög hållfasthet som är den viktigaste aspekten, utan snarare att betongen kan användas till sin fulla potential, med god beständighet och utan att sprickor eller andra gjutfel uppstår. För betong i vattenvägar krävs det även en hög nötningsbeständighet, vilket uppnås genom kvalitativa gjutningar, ett lågt vattenbindemedelstal och en hög stenhalt. Dessutom måste betongen vara frostbeständig. I vattenkraftkonstruktioner bör även risken för alkalisilikareaktioner (ASR) mellan den alkaliska cementpastan och ballast som innehåller potentiellt alkalireaktiv ballast beaktas. Dessa reaktioner, som endast sker i närvaro av vatten, kan leda till expansion och allvarliga sprickor - vilket i sin tur påverkar betongens beständighet. För att undvika sådana problem är det

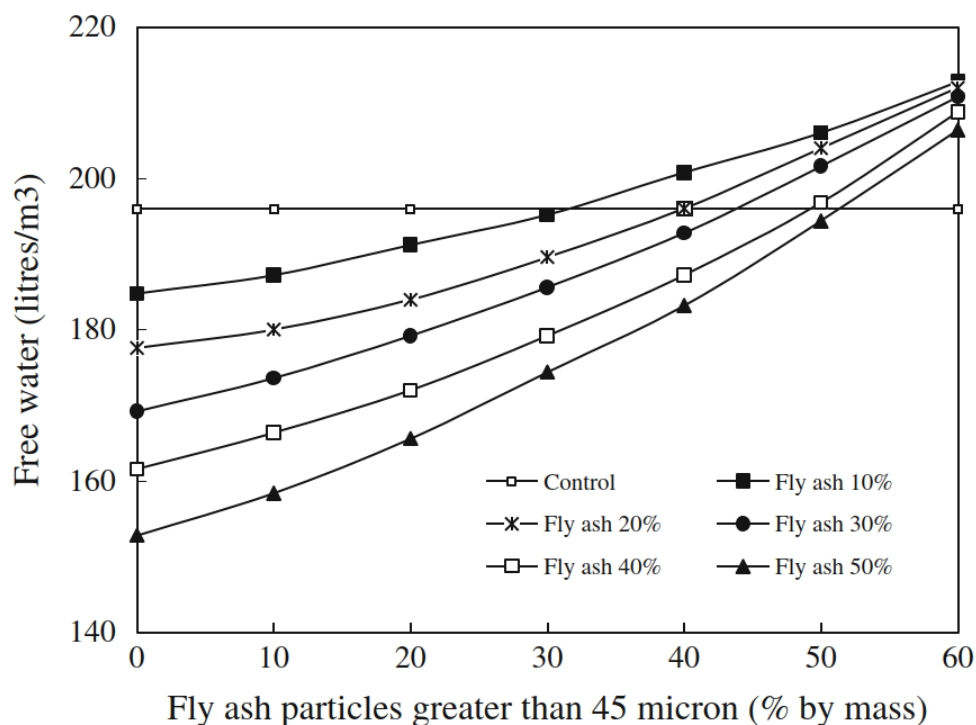
viktigt att använda icke-reaktiv ballast och en cementpasta med så lågt alkaliinnehåll som möjligt (Nordström & Hassanzadeh 2018).

Under de senaste 10 åren har den svenska vattenkraftbranschen drivit på utvecklingen av en betong där man försökt reducera värmeutvecklingen genom att minska cementshalten i betongen, b.l.a. genom att ersätta en del av bindemedlet (Portlandcementdelen) med flygaska och att använda grövre ballast. Även om det snarast varit det minskade kylbehovet som varit den pådrivande faktorn för användningen av flygaska, har även den positiva miljöeffekten i form av minskade CO₂-utsläpp bidragit till att dessa projekt uppmärksammas. Betongen benämns ofta flygaskebetong eller ”konceptbetong”.

Nedan beskrivs hur egenskaper i betong kan förändras genom inblandning av flygaska. Det bör dock noteras att flygaskebetongen som beskrivs i avsnitt 4 och dess egenskaper även påverkas genom andra receptförändringar såsom ballastgradering, kornform, övriga tillsatsmaterial eller tillsatsmedel, samt blandningssekvenser.

3.2 FÄRSKA TILL UNGA EGENSKAPER

Gjutbarhet: Flygaskepartiklar är mindre i storleken än cement och har en sfärisk kornform med en glasig yta som bidrar till betongens arbetbarhet på grund av den så kallade kullagereffekten (flygaska agerar som plasticerare, Newman et al. 2003). Volymen och därmed vikten av cementpasta ökar eftersom flygaska har en lägre skrymdensitet än cement, vilket innebär att vattenbehovet minskar med 5–15 % jämfört med motsvarande betong och konsistens utan flygaska. Vattenbehovet beror dock på flygaskepartiklarnas storlek; ju finare partiklar desto större vattenreducerande effekt se Figur 1 (Newman 2003). Den på så sätt förbättrade arbetbarheten samt stabiliteten förbättrar betongens pumpbarhet, minskar risken för vattenseparation och förekomst av gjutskarvar och kan därmed ge en ytfinish av bättre kvalitet (Newman 2003; Löfgren 2017). För betongens gjutbarhet och ett projekts receptutformning är det av särskild vikt att flygaskan är av jämn kvalitet eftersom mängden restkol i flygaskan däremot har en motsatt effekt på arbetbarheten och kan reducera effekten av tillsatsmedel såsom vattenreducerare, luftporbildare och flyttillsatsmaterial (Neville 2011; SIS-CEN/TR 16443:2013). Glödförlust (eng: Loss On ignition, LOI) ger ett mått på mängden restkol och ska enligt SS-EN 450-1: 2012 kategoriseras och deklarerars i någon av följande kategorier (A: ≤ 5 mass%; B: ≤ 7 mass%; C ≤ 9 mass%).



Figur 2. Graf från Siddique (2011) som visar vattenbehovets beroende av flygasepartiklarnas storlek och mängd för att uppnå samma arbetbarhet, vid en given materialsammansättning.

Tillstyvnadstid: Flygaskebetong (med kiselrik flygaska) har en retarderande effekt - speciellt vid låga temperaturer - så att tillstyvnadstiden ökar.

Hårdnandeprocessen: Betong med flygaska har en längre sättningstid/bindetid än motsvarande betong utan flygaska och är därmed bearbetbar under en längre tid men samtidigt känsligare mot efterbehandling. För att erhålla samma sprickfrihet och täthet är det extra viktigt att hårdnandet som sker under längre tid, efter betongens tillstyvnande, blir tillräckligt bra. Betong med flygaska orsakar mindre vattenseparation vilket underlättar ytbehandlingen men det ökar också risken för plastiska krympsprickor vilket ger ett behov av ytterligare förbättrad hårdnandeprocess. (Nordström et al. 2018).

Värmeutveckling: På grund av en långsammare reaktionshastighet samt en minskad mängd cementklinker är den totala värmeutvecklingen generellt lägre och långsammare i betong med flygaska, vilket kan vara till fördel vid gjutning av grova konstruktioner. En långsammare reaktion bidrar också till en högre sluthållfasthet samt minskad sprickrisk (Heinz et al. 2018). Värmeutvecklingen beror på många faktorer så som betongens vatteninnehåll, temperatur, kemiska sammansättning samt fysikaliska egenskaper; däremot hittades det inga samstämmiga svar i studerad litteratur om hur flygaska påverkar värmeutvecklingen i detalj.

Hållfasthetsutveckling: Betong med flygaska har generellt en långsammare hållfasthetsutveckling så att betongens tryckhållfasthet i tidig ålder är lägre jämfört med betong utan flygaska. Det bör särskilt noteras att 28 dygns-hållfastheten är lägre än i motsvarande portlandcementbetong, vilket bör beaktas vid design och kravställning eftersom 28 dygns-hållfastheten än så länge styr andra parametrar som används för dimensionering av bärande betongkonstruktioner. Däremot kan betong med flygaska (20–30 % flygaska) nå en högre sluthållfasthet och därmed överstiga tryckhållfastheten i betong utan flygaska (med i övrigt samma egenskaper, Heinz 2018). Hållfasthetsutvecklingen beror bland annat på flygaskans kemiska sammansättning och dess reaktivitet (aktivitetsindex), men även mängden flygaska som ersätter cement, cementtyp och temperaturen (Siddique et al. 2011; SIS-CEN/TR 16443:2013).

Formrivning: På grund av den långsammare reaktionen vid gjutning av betong med flygaska är temperaturen – speciellt i kallt klimat – en viktig faktor. Temperaturen har en inverkan på den tid som krävs för betongen att uppnå den avsedda mognadsgraden som ligger till grund för att bestämma den uppnådda tryckhållfastheten tillsammans med tendenskurvorna. Betong med flygaska som generellt reagerar långsammare tenderar därför att ha en lägre hållfasthet än betong utan flygaska (Nordström 2018). Avformningstiden ökar därmed vid låga omgivningstemperaturer och speciellt i tunna konstruktioner jämfört med betong utan flygaska (Newman et al. 2003).

3.3 HÅRDNADE EGENSKAPER

Mekaniska egenskaper: Vid ersättning av cement med flygaska utvecklas draghållfastheten långsammare, vilket ökar risken för tidig sprickbildning. Däremot utvecklas E-modulen långsammare, vilket är till fördel eftersom betongen är eftergivlig mot uppbyggnad av spänningar (Nordström 2018).

Krympning: Studerad litteratur visar att krympning är mindre i betong med flygaska på grund av lägre vattenhalter och långsammare reaktioner. Värdena uppmättes efter 28d, 3 månader och upp till ett år (Wesche 1991).

Krypning: Flygaskans påverkan på krypning är begränsad och beror framför allt på betongens hållfasthetsutveckling. Lothia et al. (1976) visar resultat att krypningen ökar något, men kan försummas för betong innehållande $\leq 15\%$ flygaska. Däremot ökar krypningen för betong innehållande $>15\%$ flygaska.

3.4 BESTÄNDIGHETSASPEKTER I HÅRDNAD BETONG

De största beständighetsproblemen i Sverige beskrivs i Betonghandbok – Material (1994) som *frostangrepp* (spänningar uppstår då vatten i betongen fryser) och *armeringskorrosion* (orsakas av karbonatisering eller kloridinträngning). Övriga angrepp av betydelse för vattenkraftkonstruktioner är kemiska angrepp, såsom *sulfatangrepp* (genom kontakt med sulfatrikt grundvatten i jord- och berggrundvattenmiljöer rika på sulfatjoner eller sulfater/sulfider i ballast),

saltangrepp (vid exempelvis saltning på brobanor eller kontakt med havsvatten), *urlakning* (vilket i sin tur kan leda till nötning), och *cement-ballastreaktioner* (såsom alkalisilikareaktioner, ASR, vid inblandning av alkalireaktiv ballast); och *sprickbildning till följd av spänningsgradienter* i betongen.

Vid inblandning av flygaska förändras cementpastans kemiska sammansättning, bl.a. genom att den får en högre andel kisel och en mindre andel kalciumhydroxid, vilket kan påverka betongens beständighet. Flygaska bidrar också till ökad täthet (minskad permeabilitet) i cementpastan, vilket påverkar såväl betongens kemiska beständighet och dess förmåga att skydda armeringen mot korrosion.

Notera att det är viktigt att skilja mellan *materialet betongs* täthet eller permeabilitet och *betongkonstruktioners* täthet eller permeabilitet. Permeabilitet beskrivs som betongens egenskap att släppa igenom vätska eller gas som står under tryck (motsatsen till täthet) och bestäms av:

- Cementpastans permeabilitet
- Ballastens permeabilitet
- Fasgränsen cementpasta-ballast
- Mikrosprickor

pH-värde: Vanlig betong (som inte är urlakad) har efter lång tid ett pH-värde som varierar mellan 12,5 och 13,8. pH-värdet i flygaskebetong är generellt något lägre på grund av lägre halter kalciumhydroxid. Diamond et al. (1981) visade att pH-värdet reducerades från 13,75 (i betong utan flygaska) till 13,55 i samma betong med tillsatt flygaska. Det hittades inga tydliga svar i litteraturen för hur pH-värdet förväntades förändras med tid.

Urlakning: Risken för urlakning (och efterföljande erosion/nötning i skvalpzonen samt frostangrepp) minskar generellt då betongens permeabilitet minskar (vilket sker vid inblandning av flygaska). Dessutom minskar risken för urlakning på grund av att mängden vattenlöslig kalciumhydroxid i cementpastan minskar vid inblandning av flygaska. Däremot bör noteras att svenska vattendrag är relativt fattiga på joner, varför svenska vatten har större förmåga att laka ur kalcium ur betongen än andra vattendrag runt om i världen (Drugge 2001; Rosenqvist et al. 2017).

Flera studier visar att betong med flygaska bättre kan motstå *kolsyraangrepp* (H_2CO_3) som förekommer när betongen är utsatt för mjukt, syrligt vatten (berg- eller hedlandskap) eller smältvatten (Wesche 1991). Det förbättrade motståndet förutsätter dock en nedsatt permeabilitet och en sprickfri yta.

Nötning (av exempelvis is, strömmande vatten och drivgods) är primärt en funktion av ballastens och betongens hållfasthet, oavsett om betongen innehåller flygaska eller inte (Gebler & Klieger 1986).

Alkalisilikareaktioner (ASR): Risken för ASR anses vara lägre i flygaskebetong på grund av att koncentrationen lösta alkalier i cementpastans porlösning reduceras med ökad mängd flygaska (Thomas 2011). Cementpastan blir dessutom tätare på grund av att en större mängd kalciumsilikathydrat bildas, vilket leder till en

långsammare jontransport samt att motståndet mot ASR ökar (Heinz 2018). Appelquist et al. (2017) visade i expansionsprovningar av betong med alkalireaktiv ballast, att betong med flygaska (antingen som del av cementet eller inblandat vid betongens beredning) delvis begränsar betongens expansion.

En kontrovers kring flygaskans dämpande effekt på ASR härrör ur det faktum att flygaskan innehåller en högre mängd alkalier än Portlandcement. Hobbs (2002) påstår exempelvis att risken för ASR kan öka i cementtyper där mindre än 20 % av cementet har ersatts med flygaska, på grund av att ytterligare alkalier tillförs med flygaska i kombination med en ofullständig förbrukning av kalciumhydroxid. Huruvida alkalierna faktiskt är tillgängliga för ASR måste dock beaktas och då en stor del av den totala alkalihalten är bunden i flygaskan kommer endast en mindre del lösa sig i porvattnet och bidra till den alkalinitet som påverkar den reaktiva ballasten. Den totala alkalihalten kan därför vara något högre när flygaska (eller andra alternativa bindemedel) ingår i bindemedlet än om det är fråga om ett rent portlandcement – utan större risk för ASR. Detta hanteras på olika sätt i olika internationella standarder/vägläsningsrapporter (samtliga alkalier; en del av alkalierna; endast vattenlösliga alkalier; eller inget tillskott av alkalier beaktas). I Betongrapport nr 18 (2020) föreskrivs att "Vid bestämning av $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ i betongen får halten $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ i flygaska, mald granulerad masugnsslagg och silikastoft **som uppfyller kraven för användning i betong enligt respektive EN-standard** sättas till 0". Här har man således bedömt att tillskottet alkalier från dessa tillsatsmaterial inte ökar risken för ASR, under förutsättning att exempelvis flygaskan uppfyller krav i SS-EN 450-1:2012 (Flygaska för betong), vilket i praktiken innebär att den totala alkalihalten ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$) inte får överstiga 5%. Man bör även känna till att risken för skadlig ASR avtar med minskat kalciuminnehåll (CaO) i flygaskan (Shehata & Thomas 2002; Thomas 2011), varför endast flygaska med $\text{CaO} < 10\%$ får användas (SS-EN 450-1:2012).

Armeringskorrosion: Den amerikanska motsvarigheten till Trafikverket (Federal Highway Admin, FHA) beskrev 2003 att man med den minskade permeabiliteten kunde förvänta sig en ökad korrosionsbeständighet, men senare studier har visat att risken för armeringskorrosion ökar på grund av ett lägre utgångs-pH-värde i betongen, samt på grund av den låga kalciumhydroxidmängden som betyder att det finns mindre karbonatiserbart material. Sänkningen av pH värdet i betongen genom karbonatisering uppstår därmed snabbare. Härdningsinsatsen efter gjutning för en tätare struktur samt låg v_{tekv} är därmed viktigt för att öka motstånd mot karbonatisering (Nordström 2018). Detta stöds bl.a. av Helsing (2020) som visade att karbonatiseringsdjupet ökar med ökad mängd flygaska, men också att betong med luftporbildare genomgående har ett större karbonatiseringsdjup än icke-lufttillsatt betong.

Sulfatangrepp: Risken för kalciumsulfatangrepp som är den vanliga typen av sulfatangrepp minskar på grund av den låga C3A och kalciumhydroxid-halten som behövs för att bilda gips och ettringit, vilka är de mineral som anses orsaka expansionen. Betong med flygaska uppvisar också en mindre porstorlek så att permeabiliteten eller risken för (sulfat-) jontransport sänks. Låga halter C3A och kalciumhydroxid motverkar dock inte risken för magnesiumsulfatangrepp som är

mycket aggressivare. Magnesiumsulfat reagerar inte med kalciumhydroxid eller C3A, men förbrukar kalciumsilikathydrat direkt istället (Snellings et al. 2012). Även risken för thaumasitangrepp anses opåverkad med låga halter C3A och kalciumhydroxid, eftersom thaumasit förbrukar kalciumsilikahydrat direkt och provoceras fram av karbonathaltiga material så som ballastpartiklar av kalksten och/eller kalkfiller. Mulenga et al. (2003) visade att thaumasit bildades i alla sulfatresistenta cement med flygaska där innehållet av flygaska varierade mellan 0–50 % (Mulenga et al. 2003). Härdningsinsatsen efter gjutning för en tätare struktur samt lågt v_{ctekv} är därmed extra viktigt för att öka motståndet mot jontransport (sulfatangrepp).

Frostbeständighet: Historiskt har betong med flygaska uppvisat dålig frostbeständighet, något som styrs av mängden flygaska i betongen, liksom flygaskans egenskaper (typ av flygaska, mängd restkol etc.). Några av orsakerna till att frostbeständigheten kan påverkas negativt vid inblandning av flygaska beskrivs nedan och en viktig aspekt i detta är att flygaskans egenskaper kan variera stort mellan olika leveranser, något som i sin tur påverkar behovet av mängden luftporbildare för att lyckas blanda en frostbeständig betong med ett högkvalitativt luftporsystem.

Gebler & Klieger (1983) visade att frostbeständigheten minskar med ökad mängd flygaska i betongen; men även att högre doser luftporbildare krävdes med högre halter restkol i flygaskan. Siddique (2008) visade att det behövs en större mängd luftporbildare för att erhålla ett likvärdigt resultat jämfört med betong utan flygaska; samt att man ökat dosen luftporbildare med mellan 177 och 553 % i betong med flygaska med $CaO < 10\%$, för att uppnå en lufthalt på 6% (Siddique 2008). Enligt Thomas (2007) kunde ett fullgott luftporsystem uppnås med $v_{ct} < 0,45$ om halten flygaska $< 25\%$ (förutsatt ett fackmannamässigt utförande och fullgott luftporsystem). Neville (2011) beskrev liknande resultat och att det ökade behovet av luftporbildare kan kopplas till flygaskepartiklarnas stora specifika yta samt volymen flygaska som ersätter cementet eftersom flygaskepartiklar är mindre i storlek än cementet. Men framförallt att luftporsystemet påverkas av mängden restkol (som absorberar tillsatsmedlet). I American Coal Ash Association (2003) går också att läsa att mängden restkol kan korreleras mot flygaskans glödförlust (eng: Loss On Ignition, LOI); och att de amerikanska regelverken (AASHTO och ASTM) vanligen ställer krav på max 5% LOI pga. att höga halter kol kan orsaka luftporsproblem och påverka betongens frostbeständighet.

Newman (2018) beskrev också att betongens frostbeständighet utöver lufthalten styrs av luftporsystemets kvalitet. Helsing (2020) påvisade i laboratorieförsök att avflagningen ökade med mängden flygaska; samt att det var tydliga skillnader mellan flygaskebetong med och utan luftporbildare. En av slutsatserna från denna rapport är att luftporbildare i betong med flygaska är av stor vikt för frostbeständigheten. Betong utan luftporbildare (20% FA) uppvisade redan efter 4 års exponering i utomhusmiljö med tösalter betydande tecken på inre nedbrytning, med relativt hög sprickfrekvens och spricklängd, hög volymförändring och avvikande förändring i dynamisk E-modul ($RDMFF = ca 53\%$, vilket i princip innebär att materialets styvhet försämras så att materialet lättare deformeras under

en given belastning). Det bör noteras att även övriga prov med flygaska som undersöktes i mikroskop (med luftporbildare, dock varierande lufthalt) uppvisade viss sprickbildning efter 4 års fältexponering. I övrigt visade det sig svårt att dra några säkra slutsatser om betongens frostbeständighet efter fyra års fältexponering. Dock konstaterades att enstaka provkroppar efter fyra års exponering uppvisade starkt avvikande resultat, men då dessa uteslöts kunde slutsatsen dras att samtliga blandningar hade högre dynamisk E-modul efter 1 år, vilket författaren kopplade till fortsatt hydratisering i betongen. De enda blandningar som efter fyra år inte uppvisade någon tendens till inre nedbrytning var de utan tillsatsmaterial (med enbart Anläggningscement eller Snabbhårdande cement) samt blandningar med Anläggningscement + 35 % FA, Anläggningscement FA samt Anläggningscement + 35 % slagg. Genomgående verkar också blandningar med Anläggningscement ge något bättre motstånd mot inre nedbrytning än de med snabbhårdande cement. I de prover med flygaska, som analyserades i mikroskop, noterades även reaktionsprodukter (författaren anger att dessa troligtvis är ettringit) i luftporerna vilket kan ha bidragit till en sämre frostresistens genom att luftporernas funktion försämras, vilket kan påverka både betongens inre frostbeständighet och dess salt-frostavflagning.

En annan intressant aspekt som påvisats (Helsing 2020; Liu et al. 2021) är flygaskebetongens känslighet för frostskador i tidigt skede, vilket relateras till dess långsammare hårdnande och struktur- och hållfasthetsutveckling fram till ca 90 dygn.

Helsing (2020) kunde även visa att karbonatiseringsdjupet ökade med ökad mängd flygaska, men även då betongen innehöll luftporbildare. I en tidigare studie visade Helsing (2013) också att salt-frostbeständigheten påverkas av karbonatisering (ökad avflagning pga. karbonatisering) i blandningar med över 20% flygaska (eller slagg).

4 Praktiska erfarenheter från gjutning med flygaskebetong

4.1 METOD

4.1.1 Intervjuer

Intervjuer har genomförts med flera av de aktörer som varit inblandade i de tre vattenkraftsprojekten Lilla Edet, Forshuvudforsen och Rengård. Intervjuerna har inriktats mot respondenter i kategorierna Beställare, Entreprenör, Betongleverantör och Konsult. Frågorna till dessa grupper har haft olika karaktär. Intervjufrågorna återfinns i bilaga 2.

4.1.2 Avgränsningar/förtydliganden

Analysen syftar till att samla in erfarenheter av flygaskebetong, varför praktiska erfarenheter från gjutning med andra tillsatsmaterial ej efterfrågats. Cementen kan utgöras av Anläggningscement eller Anläggningscement FA.

Analysen syftar endast till att samla in erfarenheter av betonggjutningar med flygaskebetong, ej till att ge rekommendationer eller annat.

4.2 RESULTAT

I avsnitten nedan sammanfattas arbetsgången för respektive projekt i en beskrivande text. Fullständiga svar från intervjuer redovisas i bilaga 3. Tabell 1 redovisar likheter/skillnader mellan flygaskebetong och "traditionell betong", dvs betong med Anläggningscement utan tillsatsmaterial. Vissa kompletteringar/förtydliganden har gjorts i huvudtexten, efter återkoppling från respektive anläggning (som ej framgår av svaren i bilaga 3).

4.2.1 Lilla Edet

Allmänt

Lilla Edet vattenkraftverk ägs av Vattenfall AB och är beläget i Göta Älv vid Lilla Edet i Västra Götalands län. Bygget av kraftverket startades 1918 och togs i drift 1926. Den ursprungliga dammanläggningen består av två delar grundlagda på berg. På vänster sidan av turbinhallen ligger en lamelldamm av betong och en gravitationsdamm. Lamelldammen har senare omvandlats till en gravitationsdamm genom att man fyllt betong (slaggcement) mellan lamellerna. På höger sida av turbinhallen finns en regleringsdamm med valsuckor och en gravitationsdamm med fyra utskov, också dessa grundlagda på berg. Gravitationsdammen samt valsuckornas stöd är gjorda med stenbeklädd betong. Turbinhallen innehåller tre turbinaggregat. Ett fjärde turbinaggregat tillkom på 70/80-talet och ligger under Lilla Edets sluss – nedsprängt i berget. För att säkra driften av förnybar vattenkraftproduktion i minst 100 år till startade Vattenfall ett omfattande projekt under 2021, som syftar till att ersätta delar av den befintliga

regleringsdammen (inkl. rivning av den 95 meter långa gamla föråldrade betongdammen närmast Inlandsjön och dess över hundra år gamla luckor). Den nya 125 meter långa betongdammen beskrivs byggas med klimatsmart betong (flygaskebetong). Fyra nya större utskovsluckor (tre segmentluckor (16x6 m²) och en klafflucka (11x4 m²) för ishantering ska installeras. Arbetet beräknas vara klart 2027.



Figur 3. Foto över Lilla Edet, från uppströmssidan. Foto av Vattenfall.

Sammanställning av svar

Arbetet med att ta fram en lämplig betongsammansättning initierades av beställaren eftersom man önskade reducera miljöpåverkan från betongen i Lilla Edet. Man valde därför att låta utreda om betong med alternativa bindemedel kunde ge samma eller bättre egenskaper än konventionell betong och hur man skulle kunna minska risken för temperatursprickor genom att utarbeta en betong med minskat kylbehov. Projektet har fortgått under ca 10 års tid och startade som en skrivbordsstudie, där man jämförde olika åtgärder för att minska värmeutvecklingen i betongen. I skrivbordsstudien studerades bl.a. olika tillsatsmaterial, inblandning av is, men också hur grövre ballast inverkar på betongens värmeutveckling. Skrivbordsstudien övergick till en förstudie med förprovningar som utfördes i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby. Ett konceptrecept togs fram med målsättningen att minimera värmeutvecklingen i betongen. Inverkan av ersättning av cement med olika tillsatsmaterial och ökad största stenstorlek provades för att reducera cementmängden, bl.a. avseende temperaturutveckling, sättningsförmåga, konsistens, frostbeständighet och känslighet för karbonatisering.

Utöver flygaska provades även slagg, trass och silika, för att undersöka om dessa kunde ersätta delar av cementet med bibehållen, eller högre, hållfasthet och reducerad värmeutveckling. Samtidigt var det väsentligt att bibehållen eller förlängd livslängd kunde säkerställas på konstruktionerna samt att det ur produktionssynpunkt utvecklades ett robust betongkoncept som inte ger störningar och kostnadsökningar i byggfasen. Effektivast och lämpligast för en vattenbyggnadsmiljö visade sig vara kiselrik flygaska från stenkolpulvereldade kraftverk och man valde därför att ta fram ett grundrecept med flygaska och grövre ballast. Notera att regelverket ändrats under projektets gång och även om projektet idag uppfyller huvuddelen av kraven i SS 137003:2021, har de under projektets gång varit avsteg från tillämpningsstandarden.

Under grovprojekteringen (för samverkansupphandlingen) aktualiseras hållbarhetsfrågan i hela branschen, cement- och betongtillverkare utvecklade nya cement och betongblandningar och när det skulle beslutas om projektet skulle gå vidare med traditionell betong eller flygaskebetong användes även de minskade CO₂-utsläppen som ett argument, för att få igenom förslaget. I detta skede beskrevs en betong med vbt 0,5, flygaska upp till 50% av bindemedelshalten samt ett $D_{\max}$ på 45 mm.

För nästa skede handlades en entreprenör upp för samverkanentreprenad (Partnering-projekt), vilket även innebar att beställaren hade möjlighet att vara med och bedöma betongleverantörens kompetens samt hjälpa entreprenören att välja en leverantör med hög teknisk kompetens. Detaljprojekteringen utfördes av samma konsult som anlätades för grovprojekteringen. Detta skedde i samverkan med entreprenören och utfördes som konventionell projektering. När betongleverantören handlats upp anpassades receptet till deras lokala material. Man skruvade på receptet för att optimera betongen och för att få ner cementmängden (främst för minskat kylbehov, men även minskade CO₂-utsläpp). Nya tester gjordes av betongleverantören och man upprepade en del av de provningar man tidigare hade utfört i Älvkarleby, gällande materialsammansättningen (betongens färska tillstånd). En av utmaningarna med flygaskebetongen är att få in rätt mängd och fördelning luft i den färska betongen, vilket man dock lyckades få till genom omfattande förprovningar. Eftersom beställaren även oroade sig för en ojämn kvalitet på flygaskan och risker med att byta flygaska under projektets gång försäkrade betongleverantören tillgång till samma typ av flygaska genom hela projektet. Efter receptoptimeringar beslutas (enligt beställaren) om ett recept med upp till $D_{\max}$ 45 mm, v_{tekv} 0,48 och en flygaskehalt på ca 30%.

Provgjutningar inleddes med inledande pumptester där man gjöt storskaliga testbalkar (6x1x1 m) mot berg, med representativ armering med konceptbetong och traditionell betong för att erhålla data om värmeutvecklingen. Samtidigt kunde yrkesarbetarna känna på betongen och testa dess arbetbarhet. Chalmers monterade optofiber för att mäta töjningar (givare inmätta i balkarna för att mäta töjningar under hårdnandet, se även Nordström et al., 2022). Resultat från uppmätt värmeutveckling användes för att kalibrera sprickriskberäkningar i Contest Pro. NCC och Thomas Betong använde mätvärdena för att justera indata till beräkningsprogrammet. Beställaren beskriver att man har skruvat på de

parametrar man kan skruva på, men att det innebär utmaningar när man inte har kompletta dataset i beräkningsprogrammet.

Kranfundament gjöts för att testa betongen och värmeutvecklingen med goda resultat – fullskaletest som uppfyllde samtliga krav och till viss utsträckning verifiera antaganden för sprickriskberäkningar. Dessutom borrades betongkärnor ut ur två provkroppar, för lufthaltsprov, men dessa resultat visade sig inte vara tillförlitliga på grund av att ballastkorn upptog en stor del av planslipsprovet.

Man har hittills använt flygaskebetong till de grövre konstruktionerna (bottenplatta, pelare), medan man i brobanan, samt någon ledmur har använt konventionell betong.

Avsteg från standarder/krav

- För dämmande konstruktionsdelar utsatta för ensidigt vattentryck är kravet på sprickrisknivån (kvoten mellan beräknad dragspänning och aktuell draghållfasthet) satt till 0,6, men eftersom bara en liten del av konstruktionen i Lilla Edet är utsatt för ensidigt vattentryck, beslutade man att frånga dessa krav, och satte istället 0,7 som krav för hela projektet.
- Lufthalten en utmaning. Behöver mycket mer luftporbildare än i traditionell betong för att uppfylla luftkraven (4–6,5 %). Enstaka bilar har haft en lufthalt på upp till 9%.
- V_{ctekv} 0,48 är ett avsteg från RIDAS som av beständighetsskäl rekommenderar att v_{ctekv} inte överstiger 0,45 i konstruktioner för exponeringsklass XF3 (vilka utsätts för ständigt hög fuktbelastning, t.ex. alla dämmande konstruktioner).
- Hållfasthet kontrolleras vid 90 dygn istället för 28 dygn pga. att man har en långsammare hållfasthetsutveckling.
- När projektet startade gällde SS 137003:2015 som innehöll begränsningar avseende hur stor del av bindemedlet som fick ersättas med flygaska. Då beslutades om avsteg och beställaren tog ansvar för dessa, men krav gällande mängden flygaska uppfylls i 2021 års version.
-

4.2.2 Forshuvudforsen

Allmänt

Forshuvudforsen vattenkraftverk ägs av Fortum AB och Borlänge Energi och ligger i Borlänge längs med Dalälven, i Dalarnas län. Bygget av kraftverket startades 1917. Kraftverket har utvidgats 1928 och en ny station på andra sidan av dammen har byggts på 90-talet.

Den ursprungliga dammanläggningen består av en regleringsdamm i stenkärlad betong med fyra valsuckor. Under renoveringen som påbörjades 2021 byts en stor del av den gamla betongdammen från 1918 ut, inkl. fyra dammsuckor (cirka 8 x 17 m²). Betongen (flygaskebetong) som har använts har lägre klimatavtryck än traditionell betong och utvecklades i samarbete av Fortum, KTH, NCC och Betongindustri (Fortum.se).



Figur 4. Foto över Forshuvudforsens anläggning. Foto av Magnus Svensson.

Sammanställning av svar

Projektet initieras som ett exjobb 2017 på uppdrag av beställaren - ett projekt där man tog fram en teoretisk modell för att titta på tillsats av flygaska och grövre ballast för att få ner temperaturutvecklingen i betongen. Beställarens projektledare hade tidigare utfört arbeten med liknande betong i Laos där man använde betong med krossad is och flygaska i en RCC-damm, för att minska värmeutvecklingen. Eftersom detta fungerat bra ville man använda ett liknande koncept i Sverige. Inom examensarbetet utfördes bl.a. tester med grövre ballast och dess inverkan på betongen – något som upplevdes positivt. I detta skede utfördes även tester för att studera inverkan av flygaska och inblandning av is istället för vatten. Detta efterföljdes av ytterligare ett exjobb med fullskaletester vid laboratoriet i Älvkarleby och Betongindustri's laboratorium i Gävle. En av slutsatserna från dessa provningar var att luftporbildare krävdes för att skapa en frostbeständig betong för att minska risken för erosion vid vattenlinjen. Därför utfördes "vanliga" förprovningar av receptet med olika blandningar gällande både frostprovning och tryckhållfasthet (eftersom luftinblandning minskar betongens tryckhållfasthet).

När betongleverantören skulle ta fram det skarpa receptet, utgick man från ett riktvärde avseende önskad cementhalt och ett $D_{\max}$ på 45 mm (utifrån erfarenheter från Lilla Edet). Tester utfördes gällande värmeutveckling och hållfasthetsutveckling, liksom lufthaltsprovning och frysprovning. Frysprovningen gav goda resultat med noll avskalning. I nästa skede testades arbetsbarheten på fabriken där man gjöt legoklossar och jämförde resultaten. Kraven ställdes upp av beställaren, och entreprenören har inte haft några egna krav, annat än att man säkerställt att man inledningsvis utfört provgjutningar (på "mindre viktiga konstruktionsdelar") och då även korregerat receptet för att få betongen mer arbetbar. Vid dessa första provgjutningar beskriver entreprenören att betongen var väldigt seg och inte fyllde ut i formen som tänkt, eller omslöt armering som önskat. För att få en arbetbar och gjutbar betong sattes sättningsmått till ca 180–200 mm. Vid ett sättningsmått på 200 mm beskrivs betongen vara "riktigt bra att jobba med".

Önskad lufthalt uppnåddes med doser av luftporbildare som var 2–3 ggr högre än dito för traditionell betong och även genom en längre blandningstid. Dock begränsades projektet på så sätt att man endast kunde få till önskad lufthalt i mindre satser. Trots att betongstationen hade 6 kubiks kapacitet så kunde man inte gjuta större satser än 2,5 kubik/sats för att erhålla tillräckligt god arbetsbarhet med kravställd lufthalt.

Forshuvudforsen har utförts i två faser: en fas med Anläggningscement Slite + flygaska och den andra fasen med Anläggningscement FA + flygaska.

Utförande har skett enligt gängse normer (SS137003, AMA, övriga relevanta normer). Dock uppnås inte förväntad hållfasthet efter 28 dygn, utan hållfasthetsklassen uppnås först efter ca 34–35 dygn i detta projekt. Kravet vid 90 dygn kvarstår därför, men man har gjort avsteg på 28 dygns hållfasthetskrav.

Det recept som användes för fas 1 utgjordes av $D_{\max}$ 45 mm, bindemedel bestående av 120 kg/m³ flygaska + 240 kg/m³ Anläggningscement (totalt ca 33% flygaska). Lufthalten är kravställd till 4–6 %, vilken uppfylls. Täckande betongskikt är 70 mm i alla vattenvägar, 50 mm i övriga konstruktionsdelar. I grundreceptet användes Anläggningscement Slite och flygaska från Turkiet (certifierad Slite-produkt).

Den totala halten flygaska var samma i båda faserna. Entreprenören beskriver att den sista stora gjutningen kunde utföras med flygaskebetong baserad på Anläggningscement. Men pga. utfasningen av Anläggningscement Slite kommer och har de sista gjutningarna utförts med Anläggningscement FA, vilket gjort att man har fått minska flygaskehalten (tillsatsmaterial-delen) i fas 2. Halten bindemedel i fas 2 uppgår till cirka 70 kg/m³ flygaska och 280 kg/m³ Anläggningscement FA (totalt ca 34 % flygaska).

Beställaren beskriver att flygaskebetong använts för alla konstruktionsdelar tjockare >1m. Tunna gjutningar och gjutningar i trånga sektioner gjöts ej med samma stenstorlek, men i övrigt har samma betong använts. Minimiarmering har räckt för huvuddelen av konstruktionerna för att uppfylla kraven för bärförmåga, men vid särskilda konstruktionsdelar såsom nålstöd och lucklager, bågättströsklar (höga tryck) samt vid någon pelare - som behöver kunna ta extra last - har extra armering utöver minimiarmering varit nödvändigt. Entreprenören beskriver att alla större konstruktioner (med tjocklek över ca 200 mm) gjutits med

flygaskebetong (skibord, pelare), men att man använt traditionell betong i tunnare konstruktioner som ej har lika stor temperaturutveckling. Konsulten beskriver att flygaskebetongen använts i skibord (gjutit mot berg), pelare (med dimensioner bredd: 4–5 m, höjd: 5–6 m, längd: ca 13 m), framförallt i grova konstruktioner med risk för sprickbildning pga. hög värmeutveckling under hårdnandet.

Samtliga respondenter beskriver att betongen är lättarbetad och att den underlättar arbetet framförallt eftersom man slipper kylningen. Betongens gjutbarhet/arbetbarhet har varit bra, den har varit lätt och smidigt att arbeta med. Även om värmekablar också har gjutits in för att vid behov minimera risker med att gjuta mot kalla ytor, så har förväntat kylningsbehov vid gjutning av spiral ej varit nödvändigt och likaså beskrivs gjutning mot berg ha fungerat bra. Gjutning med flygaskebetong har utförts vid alla rådande omgivningstemperaturer, men först efter säkerställande att motgjutningsytorna inte varit för kalla.

Planen är att driftsätta konstruktionen år 2024, innan vårfloden. Beställaren avser att följa utvecklingen på samma sätt som det görs i alla projekt, men där finns inga planer på någon uppföljning utöver det vanliga.

Temperaturutveckling följs upp i alla projekt och är inte specifikt för projekt med flygaskebetong. Egenskaper har kontrollerats genom provtryckning av kuber tillverkade med levererad betong, men däremot har provkroppar inte borrarat ut från gjuten konstruktion. Vidare har den levererade färska betongens lufthalt kontrollerats (uppmätt lufthalt ca 4 %) och tester för att mäta lufthalten hos den färdiga konstruktionens betong, genom att ta borrhärdar, är inplanerade. Dessutom har en sprickkartering utförts. I denna har ett fåtal sprickor noterats, men beställaren beskriver att frekvensen är mindre än i traditionell betong. Betongen beskrivs ge "förvånansvärt täta och fina konstruktioner". Även om enstaka skador noterats, beskrivs dessa som färre i jämförelse med traditionell betong. Entreprenören beskriver dock att man sommartid fått "dränka formarna" för att säkerställa bra formsläpp (genom att spruta vatten på träformarna de uppnått en hög vattenmättnadsgrad, vilket gjort att betongen inte kunnat tränga in i dess porer). I intervjuer uppges beställaren ha haft hårda kontroller och höga krav vilket beskrivs "ge garanti för utförande på bra sätt".

De främsta fördelarna med flygaskebetongen tilldelas utförandet, att man kunnat köra stora gjutetapper och att man inte har behövt ta hänsyn till den långsammare hållfasthetsutvecklingen. Att slippa kylsklingar beskrivs som en stor arbetsmiljövinst, det gör det lättare att ta sig ner i formarna när man slipper kylrör som är i vägen. Resultatet beskrivs vara detsamma som med traditionell betong, men utförandet beskrivs vara enklare. Svårigheten beskrivs vara att få till en god arbetbarhet hos betongen, vilket krävt en bra dialog med betongleverantören.

Även om bindemedlet är cirka 100 kr dyrare per m³ jämfört med bindemedelskostnaden i traditionell betong och ballasthanteringen är dyrare (grövre ballast) beskrivs besparingar på cirka 100 kr/m³ på grund av minskade arbetskostnader (och minskat materialbehov, för t.ex. kylrör).

Temperaturminskningen var viktigast! Miljöeffekten är också positiv, både gällande minskat behov av formar, plaströr, effektiv byggprocess, transporter (virke, stål), stål i form av armering, gjutfogar, fogband, cement m.m.

En av nackdelarna som beskrivs med flygaskebetongen är att betongarbetarna har blivit mer "svarta i ansiktet". Dessutom beskrivs utmaningar med att kunna räkna på värmeutveckling under betongens hårdnande och risk för sprickbildning under betongens avsvalnande som följer efter uppvärmningen. För betong med Anläggningscement FA finns data som det tillgängliga datorprogrammet kan hantera för beräkning av temperaturutveckling och bedömning av sprickrisk. Det finns däremot inga data tillgängliga för beräkning av temperaturutveckling och bedömning av sprickrisk för de fall där extra flygaska blandas in vid betongens beredning. Man kan exempelvis inte utföra beräkningar med $x \text{ kg/m}^3$ Anläggningscement FA + $y \text{ kg/m}^3$ extra flygaska. Istället har i föreliggande projekt indata anpassats för att simulera de temperaturmätningar som utförts vid projektstart. Man har även utfört vissa kurvanpassningar och utgått från befintliga data för Anläggningscement. Baserat på egna erfarenheter så har vissa egenskaper ändrats, bland annat värmeutveckling/tidsenhet (denna är sänkt på grund av att flygaska reducerar temperaturutvecklingen); mognadsgradutveckling (denna har baserats på data från Anläggningscement och beräknad temperatur); betongens tryckhållfasthet (uppskattad med mognadsgraden genom tendenskurvor). Draghållfasthet och E-modul har uppskattats via betongens tryckhållfasthet utifrån antaganden om samma konventionella sammanhang som för vanligt anläggningscement.

Avsteg från standarder/krav

- V_{tekv} 0,5 är ett avsteg från RIDAS som av beständighetsskäl rekommenderar att v_{tekv} inte överstiger 0,45 i konstruktioner för exponeringsklass XF3 (vilka utsätts för ständigt hög fuktbelastning, t.ex. alla dämmande konstruktioner).
- Hållfasthet kontrolleras vid 90 dygn istället för 28 dygn pga. att man har en långsammare hållfasthetsutveckling.

4.2.3 Rengård

Allmänt

Rengård vattenkraftverk ägs av Skellefteå Kraft och ligger i Skellefteälven i Norsjö kommun, i Västerbottens län. Bygget av kraftverket startades 1968 med Vattenfall som entreprenör och togs 1970 i drift. Anläggningen består av två fyllningsdammar och en regleringsdamm av betong med två utskov och en valvdamm. Skellefteå Kraft har planerat att öka kapaciteten i kraftverket för att både öka reglerförmågan och energiproduktionen. Kraftstationen renoveras och det investeras i en ny turbin samt generator. Samtidigt utvidgas anläggningen med en andra turbin som kommer ligga nedströms av valvdammen. Ombyggnationen startade under 2021 och entreprenaden planeras att vara färdig under 2024.

Glidformsgjutning har använts för intagsbacken (20 m lång, 14 m bred, med 45 graders lutning). Betongen som användes är en flygaskebetong som har utvecklats av betongleverantören Dahlgren Byggbetong och NCC. Detta betongrecept har minskat koldioxidutsläppen med omkring 40 % jämfört med traditionell betong. Ytterligare koldioxidbesparingar har gjorts genom material- och energibesparingar då betonggjutningarna ej krävt kylning.



Figur 5. Foto från formsättning generatorkammare i Rengård. Foto av NCC.

Sammanställning av svar

Eftersom projektet är den första kraftstationen som beställaren bygger i egen regi beslutades det tidigt att det skulle göras i samverkan. Entreprenören, som då jobbade med Lilla Edet, lade fram förslaget att blanda in flygaska i betongen för att minimera dess värmeutveckling. Från entreprenörens håll framhölls det många fördelar med flygaskebetongen, såsom minskat kylbehov, förbättrad arbetsmiljö, minskad sprickbildning/värmeutveckling, minskad tidsinsats, och möjligheten att kunna gjuta i större etapper. Dessutom skulle betongens klimatpåverkan minska, även om detta inte var huvudmotivet. Man beskrev det som att man med flygaskebetongen får en marginellt dyrare betong, men att det i förhållande till kostnader för kylslangar etc. är mycket billigare. Med en minskad klimatpåverkan (minskning med 1320 ton CO₂ jämfört med traditionell betong för detta projekt), så har man även haft en stor miljövinst, även om det inte var målet.

Entreprenören och betongleverantören har varit de som drivit på utvecklingen och eftersom entreprenören hade tidigare erfarenheter från Lilla Edet och Forshuvudforsen startade man projektet med ett 1 års utvecklingsprojekt av recept tillsammans med betongleverantören. I detta ingick flertalet provningar (bl.a. avseende lufthalt, tryckhållfasthetsutveckling och temperaturutveckling) med olika blandningar. Man utgick från Lilla Edet där man använde $D_{\max}$ 45 och 50% flygaska (som tillsatsmaterial), men när man försökte efter skapa detta recept fick man "bara en grå smet". Dessutom uppger betongleverantören att man inte klarade hållfasthetskraven med tillsats av luftporbildare. Slutsatsen drogs att detta var relaterat till användningen av Anläggningscement FA istället för Anläggningscement (vilket också innebar en större totalmängd flygaska). Pga. att kravställd lufthalt inte kunde erhållas, beslutades att frostbeständigheten skulle provas genom frostprovning. Beställaren beskriver att denna lösning troligen inte hade valts om konstruktionen varit en damm med dämmande funktion, men att en riskbedömning gjorts vilken inbegriper efteråtgärder (inkapsling med lining) om betongen i framtiden skulle drabbas av frostsprängning.

I tidigt skede diskuterades också huruvida det skulle gå att pumpa betongen med 45mm-sten, men det är inget som märkts av i projektet, utan betongen har enligt entreprenören gått utmärkt att pumpa.

Kravställning utgår från AMA Anläggning och RIDAS.

Innan slutgiltigt beslut togs om användning av flygaskebetong, reviderades betongens egentyngd i stabilitetsberäkningarna (Design basics). RIDAS föreskriver att tungheten för armerad betong bör antas vara $23 \text{ kN/m}^3 = 2345 \text{ kg/m}^3$, om ej annat värde visar sig vara riktigare genom utförda materialprover. Med flygaska och grov ballast beräknades betongens egentyngd till 2246 kg/m^3 med 7 % luft och 2316 kg/m^3 med 4% luft. För beräkningar användes de värden som erhöles med 4% luft (projektet landade på 3–3,5% luft i verklig konstruktion).

Den första konstruktionen som gjöts fullskaligt var ett tornkranfundament, från vilket borrhärlor togs ut och skickades till laboratorium för tryckhållfasthetsprovning. Även konstruktionens temperaturutveckling och den omgivande luftens temperatur mättes. Resultatet användes för kalibrering av indata till datorprogram för beräkning av temperaturutveckling och bedömning av sprickrisk. Värden från de första tryckhållfasthetsmätningarna uppfyllde inte hållfasthetskraven vid 28 dygn, men hållfasthetskraven vid 56 och 90 dygn uppfylldes.

Nästa steg, gjutning mot berg av pelarfundament för bjälklag, för åtkomst till arbetsplatsen uppnådde samma positiva resultat trots att konstruktionen var tjock och var gjuten mot berg. Efter att man skruvat på receptet avseende bland annat luftporbildare var även pumpbarheten bättre. I detta skede togs även ett snabbt beslut om att frångå normen gällande tryckhållfasthet vid 28 dygn. Entreprenören garanterade dock funktionskrav och en livslängd på 100 år. Krav på tryckhållfasthet vid 90 dygn kvarstår.

Genom hela entreprenaden har Anläggningscement FA använts (innehållande ca 15 % flygaska). Mängden inblandad flygaska (tillsatsmaterial som blandas in vid betongens beredning) har varierat under projektets gång: från början användes

totalt 50 % exkl. Anläggningscement FA, men detta justerades till totalt ca 30% (inkl. Anläggningscement FA). En effektivitetsfaktor (k-värde) för flygaska på 0,4 har använts. $D_{\max}$ har primärt varit 45 mm (32 mm i vissa delar där armeringen sitter tätare), för att minska bindemedelsbehovet och temperaturutvecklingen i betongen. Istället för att använda olika recept för olika konstruktionsdelar (minskat $D_{\max}$ i trånga sektioner) har betongleverantören haft en dialog med konsulten som i sin tur anpassat designen så att samma recept ska kunna användas i hela anläggningen.

Det som utmärker projektet är att man frångått lufthaltskraven, vilket dock motiveras med att anläggningen som avses är en kraftstation/ett kraftverk utan dämmande konstruktioner, skibord eller motsvarande. Konsulten beskriver också motiv till detta avsteg med att det inte är frostutsatta konstruktioner. I efterhand konstateras dock att det troligen inte hade varit fel med utökade frostprovningar (accelererade och under förvärrande faktorer).

Vid jämförelse med traditionell betong konstateras att man lyckats få till större gjutetapper och färre gjutfogar. Det konstateras också att färre sårytor dokumenterats mellan gjutetapperna än vad som brukar göras med traditionell betong.

Inga särskilda kontroller utförs i projektet, men kontroller utförs enligt gängse normer, såsom okulär kontroll och betongkärnor för provning av tryckhållfasthet och lufthalt över tid (del av kontrollprogram). Den okulära kontrollen indikerar förekomst av ett fåtal ytsprickor (vilka dock inte når till armeringen).

Gällande värmeutveckling-, mognadsgrad- och sprickriskberäkningar har entreprenören gjort dessa och kontinuerligt anpassat dem utifrån temperaturmätningar i fält. Även konsulten uppger att de utfört värmeutveckling- och hållfasthetsberäkningar, även om dessa inte gått till produktion. Konsulten uppger att man tagit hjälp från Norge som man menar har mer erfarenhet av de här typen av beräkningar. I huvudsak har parametrar för Anläggningscement använts. Eftersom flygaska använts i betong i Norge under längre tid har man också erhållit mer erfarenhet av hur detta ska hanteras i projekten. Konsulten beskriver att värmeutveckling, hållfasthet (tryck och drag) måste mätas i testbetong för relevanta värden och för att beräkningar ska kunna utföras. Ett alternativ är att använda data från Norge som är tillgänglig för allmänheten (Sintef, Statens vegvesen)

De främsta fördelarna som konstaterats är förbättrad arbetsmiljö, större gjutetapper, färre gjutfogar, mer effektivt arbetssätt, i huvudsak endast små och knappt synbara skador. Endast en skada i form av ett större hålrum mellan form och armering noterats i spiralväggen. Detta förklaras dock ha uppkommit på grund av dålig vibrering i en gjutetapp på 1000 m³.

En negativ erfarenhet som beskrivs är att entreprenören emellanåt har fått slipa betongen för att kunna måla på invändiga ytor, på grund av rester av träludd som kvarstod efter brädformen, något som dock försvunnit efter en övergång till form av plywood.

Även om ingjutningsrör har gjutits in i vissa konstruktionsdelar, för att vid behov kunna kyla betongen, har värmeutvecklingen och sprickbildningen inte blivit så kraftig som beräkningsprogrammen indikerat, och rören behövdes inte.

Avsteg från standarder/krav

- Inledningsvis krävställdes tryckhållfasthetskrav vid 28 dygn, men då tryckhållfastheten vid 28 dygn ej uppnåddes, omprövades kraven och nya riktvärden vid 56 och 90 dygn ställdes upp. Inga konstruktionsdelar har heller belastats vid 28 dygn, varför man ansåg det vara berättigat att frångå detta krav.
- Frostprovning har ersatt kravställd lufthalt. Ingen extra luft/luftporbildare tillsattes i betongen under dess förprovningar och krav på frostbeständighet enligt AMA har frångåtts. Dock har viss andel luftporbildare används i betongsammansättningen för att skapa en förbättrad luftporstruktur (lufthalt i färska betongen ca 3–3,5 % på arbetsplatsen).
- Inledningsvis överskred den totala mängden flygaska tillåten mängd, men i huvuddelen av gjutningarna innehar betongen tillåten mängd enligt SS137003: 2021 (<35%).

4.2.4 Skillnader/likheter

Huvudmotiv

Huvudmotivet med de tre projekten har varit att minska värmeutvecklingen i betongen. I Lilla Edet beskrivs orsaken till detta vara att man vill minska sprickrisken i betongen, medan man i både Forshuvudforsen och Rengård framhåller arbetsmiljöfrågan som ett starkt motiv. Detta kan säkerligen kopplas till att beställaren varit drivande i Lilla Edet (större fokus på dammsäkerhetsfrågan) och att Entreprenören tagit med sig ett smidigt arbetssätt till övriga projekt.

Anläggningen

Lilla Edet och Forshuvudforsen innehar konstruktionsdelar i vattenvägar, vilka delvis utsätts för ensidigt vattentryck. I Rengård avser byggnation ny kraftstation, även om det även delvis ingår vattenvägar genom kraftstationen.

Betongrecept

Liknande recept har tagits fram med:

- Totalt ca 33 % kiselrik flygaska
- Grövre ballast, $D_{\max}$ 45–50 mm, för att minska cementmängden
- V_{tekv} 0,5

De största skillnaderna avser:

- Avsteg lufthalt i Rengård
- Anläggningscement FA (CEM II/A-V 42,5 N – Slite) har använts i Rengård, samt i fas 2 i Forshuvudforsen. Anläggningscement har använts i Lilla Edet (CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik) samt fas 1 i Forshuvudforsen (CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite)
- Sättningsdjup 90–120 mm i Lilla Edet, 180–200 mm i Forshuvudforsen och 160–210 mm i Rengård

Utförandet

Samtliga projekt har rapporterat ett minskat kylbehov tack vare en minskad portlandcementandel i förhållande till traditionell betong.

Kylrör har gjutits in i vissa riskkonstruktioner i både Rengård och Forshuvudforsen, men de har inte behövts i något av fallen.

Vid samtliga anläggningar har entreprenaden föregåtts av storskaliga provgjutningar av mindre viktiga konstruktionsdelar för att testa betongen - och man har efter dessa gjort vissa korrigeringar av receptet för att förbättra dess arbetbarhet.

I Rengård har glidformsgjutning utförts (vilket ev. kan förklara varför man där önskar högre sättmått).

Tabell 1. Jämförelse mellan de tre anläggningarna.

	Lilla Edet	Forshuvudforsen	Rengård
Syfte med flygaskebetong	Reducerat klimatavtryck Minskat kylbehov / minska temperaturutvecklingen	Minska temperaturutvecklingen / minskat kylbehov	Minska temperaturutvecklingen / minskat kylbehov
	Minskad sprickrisk	Minskad sprickrisk	Minskad sprickrisk
Förstudie	Ja. Startad 2018	Ja. Startad 2017	Ja
Risker	Tillgång till tillräckligt + samma flygaskatyp	Sprickor	Åldersbeständighet (frostsprängning)
	Materialkostnader	Erosion/nötning i vattenlinjen	Avsteg från krav på lufthalt
	Kvalitetsvariationer + pumpstopp		Ekonomi (bl. a. ny silo för betong-leverantören)
	Temperatursprickor / behov av kylning		
	Oerfarna yrkesarbetare		
	Tillräckligt med tid		
	Frostskador		
Fördelar	Förbättrad arbetsmiljö	Förbättrad arbetsmiljö	Förbättrad arbetsmiljö
	Minskat CO ₂ -avtryck	Större gjutetapper var möjliga	Större gjutetapper, färre gjutfogar
	Minskade arbetskostnader		Minskade material-kostnader
	Minskade material-kostnader		Mer effektiv gjutning
			Betongen omsluter armeringen bättre
			Mindre sår-ytor
Konstruktionsdelar med flygaskebetong	Grova (utskovsdamm, bottenplatta, pelare)	Grova (skibord mot berg, pelare, spiral)	Kraftstation (intag gjordes med glidforms-gjutning)
Konstruktionsdelar utan flygaskebetong	Traditionell betong med mindre D _{max} (25 mm) i trånga utrymmen	Ja, med mindre D _{max} (32 mm) vid smalare passager	Traditionell betong med mindre D _{max} i tunna konstruktions-delar

	Lilla Edet	Forshuvudforsen	Rengård
28 dygns Hållfasthet	Avsteg. Kontrolleras vid 90d.	Avsteg. Kontrolleras vid 90d.	Avsteg. Kontrolleras vid 56d och 90d.
Betong			
D _{max}	45 mm	45 mm (32 mm vid smalare passager)	45 mm (32 mm där tätt med armering)
Cement	Anläggningscement Brevik (CEM I 42,5 N SR3 MH/LA): 252 kg/m ³	Fas 1: Anläggningscement Slite (CEM I 42,5 N SR3 MH/LA): 240 kg/m ³ Fas 2: Anläggningscement FA (CEM II/A-V 42,5 N MH/LA NSR): 280 kg/m ³	Anläggnings-cement FA (CEM II/A-V 42,5 N MH/LA NSR): 280 kg/m ³
Flygaska	126 kg/m ³ = 33,3 %	Fas 1: 120 kg/m ³ = 33,3 % Fas 2: cirka 70 kg/m ³ = cirka 32 % K-värde = 0,5	Cirka 70 kg/m ³ = cirka 32 % (total) K-värde = 0,4
V _{ct,ekv}	0,48	0,5	0,5
Lufthalt	4,5–6,5 % (stabil på 5–5,5 %)	4–6 %	ca 3–3,5 %
Tillsatsmedel	Luftporbildare	Luftporbildare (2–3 ggr så mycket som med trad. betong)	Inga
		Flyttillsats, retarderar under sommaren/höst	
Sättnått	90–120 mm	180–200 mm	160–210 mm
Täckande betongskikt	70 mm (50 mm på icke-exponerade ytor)	70 mm i alla vattenvägar (annars 50 mm)	-
Hållfasthetsklass	C30/37	C30/37	C30/37
Temperatur vid leverans	-	12–14 °C (max 24 °C på sommaren)	-
Annat	-	Längre blandningstid, mindre satser	-

	Lilla Edet	Forshuvudforsen	Rengård
Erfarenheter ungt/färskt tillstånd			
Arbetbarhet	God	God	God
Reologi	Trevlig	Som vanligt	Bra
Separation/ stabilitet	Nej	Nej	Nej
Annat	-	I början (ej skarpa gjutningar) var betongen för seg för att omsluta armeringen och fylla ut formen	-
Erfarenheter hårdnande tillstånd			
Värme- utveckling	60–65 °C (21–22 °C utgångstemperatur)	-	Höjning med 30 °C
Kylbehov	Nej	Nej	Nej
Annat	-	Mycket mindre krympning (totalt)	-
Erfarenheter hårdnat tillstånd			
Formsläpp/form släppmedel/for myta	Formsläpp var lättare		Ingen skillnad
Behov av vattenhärdning/ täckning	Plastad in och vattenångad i 10d (vid behov)	Plast och/eller vattenspridare	Ingen skillnad
Risk för hängning	Nej	-	Förbättrad
Annat	Brädrivning något svårare – mindre ytsläpp förekom	Betongen suger sig fast (brädrivning)	"Träludd" som kvarstår (brädrivning) --> blev bättre med plywood
Säsong skillnader	Nej	Nej	Nej
Utmaningar	Jämn och stabil lufthalt	Jämn och stabil lufthalt	Jämn och stabil lufthalt
	Beräkningar/brist på data/programvara	Beräkningar/brist på data/programvara	Beräkningar/brist på data/programvara
Problem/svårig heter/skador	Nej	Enstaka ytsprickor utan stor betydelse	Enstaka sprickor utan stor betydelse

4.3 SLUTSATSER

För samtliga projekt som studerats har fler åtgärder än tillsats av flygaska som tillsatsmaterial anammats för att minska värmeutvecklingen i betongen. Åtgärder inkluderar

- Grövre ballast (D_{max} 45–50 mm), i huvudsak för att minska Portlandcementandelen i betongen
- Tillsats av flygaska vid betongens beredning (ca 30%), för att minska Portlandcementandelen i betongen
- Mindre PC-klinkermängd i jämförelse med traditionell betong, varför värmeutvecklingen per viktenhet bindemedel minskar.

Praktiska erfarenheter av flygaskebetong gör gällande att det vid betongtillverkning krävs en något mer omfattande förprovning för att säkerställa kravställd lufthalt i betongen (och att kravställd hållfasthet kan uppnås med nödvändig mängd luftporbildare); samt att betongens arbetbarhet är god.

Skillnader mellan flygaskebetong och traditionell betong beskrivs nedan och har delats in i positiva respektive negativa aspekter.

Positiva aspekter

- Förbättrad arbetsmiljö pga. minskat behov av kylslangar, vilket i sin tur förenklar tillträdet i formar, möjliggörandet av större gjutetapper och färre gjutfogar
- Minskade material- och personalkostnader (totalt)
- Reducerad klimatpåverkan

Negativa aspekter

- Ökade kostnader för betongen
- Tillgång till flygaska varierar; liksom flygaskans kvalitet
- Tillgång till Anläggningscement varierar
- Data saknas för sprickrisk-, hållfasthets- och mognadsgradsberäkningar, varför egna anpassningar får göras. För att få tillförlitliga data krävs att denna styrks med hjälp av uppmätta värden från provgjutningar; eller publicerade data från tidigare projekt.
- RIDAS riktvärde avseende betongens tunghet (23,0 kN/m³, om ej annat värde visar sig vara riktigare genom utförda materialprover) bör beaktas och ev. revideras vid lastantaganden.

5 Referenslista

- Ahlberg, S.O & Knutsson Udd, L. (2010). Degerhamn cementfabrik, Industri- och kulturhistorisk dokumentation. Cementa AB / Heidelberg Cement
- Ahlberg, S.O & Löfgren, E., red. (2022). Betong – Material konstruktion åtgärder skador arkitektur historia. Göteborgs Universitet, 258 pp. ISBN 978-91-986946-7-3.
- American Coal Association. (2003). Rafalowski M (ed.). Fly Asch Facts for Highway Engineers. FHWA-IF-03-019. 76 pp.
- Appelquist K., Trägårdh J. & Mueller U. (2017). An ASR-preventive strategy for durable concrete in Sweden. XIV DBMC – 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 29-31 May 2017, Ghent University, Belgium. DOI: https://www.researchgate.net/publication/329151961_An_ASR-preventive_strategy_for_durable_concrete_in_Sweden.
- Appelquist K., Hassanzadeh M. & Fredrich B. (2023). Erfarenheter av Anläggningscement FA. Energiforsk rapport 2023:963. 70pp.
- Betongföreningen. (2020). ASR i svensk betong – vägledning för nya och befintliga konstruktioner. Betongrapport nr 18. 228 pp.
- Cementa/ Heidelberg Materials Cement. Bascement – Teknisk beskrivning. DOI:https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/assets/document/4b/fc/bascement_teknisk_beskrivning.pdf
- Cementa/Heidelberg Materials Cement. (2023). Cementa produktdatablad anläggningscement FA.
- Cementa/Heidelberg Materials Cement. (2023). Anläggningscement FA För klimatförbättrad anläggningsbetong. Anläggningscement FA smart val vid omfattande broprojekt.
- Cementa/Heidelberg Materials Cement. (2023). Cementa produktdatablad anläggningscement Slite.
- Cementa/Heidelberg Materials Cement. (2023). Cementa produktdatablad anläggningscement Brevik.
- Centrum för Näringslivshistoria. (2021). Cement i 150 år. DOI:www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/cement-i-150-ar#top
- Danielsen N. (1935). Om cementtillverkningen. Teknisk tidskrift (1935-1943). Norrköping: Svenska teknologföreningen. 57–64.
- Drugge E. (2001). Geokemin längs Luleälven samt påverkan av vattenkraftutbyggnaden. Rapport 2001:208. Luleå Tekniska Universitet.
- Edström O. (1925). Cementindustrins uppkomst och utveckling. Industritidningen Norden,

- Fagerlund, G. (1989). Vattenbyggnadsbetong. Cementa. Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. 51 pp. ISBN 91-87334-04-6.
- Fagerlund, G. (1993). Boverkets BBK-materialgrupp Konstruktionsregler -94 : Revidering av BBK79 till BBK94: Teoretisk bakgrund till ändringsförslag. Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7044). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. 43 pp.
- Fagerlund, G. (2010a). Betongkonstruktioners beständighet: En genomgång av officiella regler 1926-2010. Rapport TVBM; Vol. 3153, Avd Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. 68 pp.
- Fagerlund, G. (2010b). Mineraliska tillsatsmedel i cement. Bygg & Teknik 7/10, 23-29.
- Gebler S, Klieger P. (1983). Effect of Fly Ash on the Air-void Stability of Concrete. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, ACI SP-79:1. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. p. 103-142.
- Gebler S, Klieger P. (1986). Effect of Fly Ash on the Air-void Stability of Concrete. Proceedings of the 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-91:1. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. p. 483-519.
- Helsing E. (2020). Nedbrytning hos betong med slagg och flygaska efter fyra vintersäsonger vid RV40. RISE Rapport 2020:40.
- Hobbs D.W. (2002). Alkali-silica reaction in concrete. In: Structure and Performance of Cements. Bensted J, Barnes P (eds) Spon Press, London, p 265-281. Lohtia R.P., Nautiyal B.D., Jain O.P. (1976). Creep of fly ash concrete. ACI Journal 73. 469-472.
- Klemczak B, Batog M. (2016). Heat of hydration of low-clinker cement – Part I. Semiadiabatic and isothermal tests at different temperatures. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 123. 1351-1360.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011). Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research 41. 1244-1256.
- Löfgren, I. (2017). Tillsatsmaterial. Betonghandbok Material, Del 1. Kap. 6. AB Svensk Byggtjänst.
- Mulenga DM, Stark J, Nobst P (2003) Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash. Cement & Concrete Composites 25. 907-912.
- Neville, AM (2011). Properties of Concrete. 5e utgåvan. Pearson Education Limited.
- Newman J, Choo BS. (2003). Advanced Concrete Technology, Constituent Materials. Elsevier (Butterworth Heinemann).
- Nordström E, Hassanzadeh M. (2018). Inblandning av flygaska i vattenbyggnadsbetong. Energiforsk rapport 2018:478. 54 pp.

- Nordström E, Löfgren I, Berrocal GC. (2022). Klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong utan kylbehov. Bygg och teknik 6/2022.
- Rosenqvist M. (2018). Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftutbyggnad. Energiforsk rapport 2018:481. 262 pp.
- Rosenqvist M, Bertron A, Fridh K, Hassanzadeh M. (2017). Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterisation, Cement and Concrete Research 92. 110-120.
- Shehata M.H. & Thomas M.D.A. (2002). Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete. Cement & Concrete Research 32 (3). 341-349.
- Siddique R. (2008). Waste Materials and By-Products in Concrete. Springer Engineering Materials.
- Siddique R, Khan MI. (2011). Supplementary Cementing Materials. Springer Engineering Materials.
- SIS-CEN/TR. (2013). Bakgrundsrapport till EN 450-1: 2005+A1:2007 – flygaska för betong – De 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse. Teknisk rapport 16443:2013. 48pp.
- Snellings R, Mertens G, Elsen J. (2012). Supplementary Cementitious Materials. Reviews in Mineralogy & Geochemistry 74. 211-278.
- Svensk betong, 2022: Vägledning klimatförbättrad betong, utgåva 2. 24pp.
- Thomas M.D.A. (2011). *The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review*. Cement & Concrete Research 41. 1224-1231.
- Wesche K. (1991). Fly Ash in Concrete – Properties and Performance. RILEM Report 7.

Standarder & kravspecifikationer

- Boverket (1994) Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 94. Band 2. Material, Utförande, Kontroll
- Boverket (2004) Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 04
- Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS: 2022
- SOU 1924:25. Normalbestämmelser för Leverans och Provning av Cement samt för Byggnadsverk av Betong och Armerad Betong, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet
- SOU 1926:13. Normalbestämmelser för Leverans och Provning av Cement samt för Byggnadsverk av Betong och Armerad Betong, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SOU 1926:14. Tilläggsbestämmelser till Normalbestämmelser för Leverans och Provning av Cement, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SOU 1934:17. Statliga Cement- och Betongbestämmelser av År 1934, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SOU 1942:44. Tillägg Nr 1 till Statliga Cement- och Betongbestämmelser av År 1934, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SOU 1943:40. Statliga Cementbestämmelser av År 1943, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SOU 1949:64. Statliga Betongbestämmelser – Del 1. Materialdelen, Statens Offentliga Utredningar, Kommunikationsdepartementet

SS 137003:2004. Betong - Användning av EN 206-1 i Sverige

SS 137003:2008. Betong - Användning av EN 206-1 i Sverige

SS 137003:2015. Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige

SS 137003:2021. Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige

SS 137003:2021+T1:2024. Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige

SS-EN 197-1:2000. Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement

SS-EN 197-1:2011. Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement

SS-EN 197-2:2020. Cement – Del 2: Bedömning och fortlöpande kontroll av prestanda

SS-EN 206:2001. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse

SS-EN 206:2013. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse

SS-EN 206:2013+A1:2016. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse

SS-EN 206:2013+A2:2021. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse

SS-EN 450-1: 2005+A1:2007. Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse

SS-EN 450-1: 2012. Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse

SS-EN 15167-1:2006. Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong, bruk och injekteringsbruk – Del 1: Definitioner, specifikationer och kriterier för överensstämmelse

SS 134202:2021. Cement – Ordinär cement med moderat värmeutveckling (MH-cement) – Krav

SS 134203:2022. Cement – Ordinär cement med låg alkalihalt (LA-cement) – Krav

SS 134204:2022. Cement – Nationella sulfatresistenta ordinära cement (NSR-cement) – Krav

Statens Betongkommitté B1-1960 – Statliga cementbestämmelser, Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté B5-1965 – Bestämmelser för betongkonstruktioner. Material och utförande. Betong, Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté (1979a) BBK 79 – Bestämmelser för betongkonstruktioner. Band 1. Konstruktion, Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté (1979b) BBK 79 – Bestämmelser för betongkonstruktioner. Band 2. Material, Utförande, Kontroll, Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté (1982) B1 – Statliga cementbestämmelser. Utgåva 2, Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté (1988a) BBK 79 – Bestämmelser för betongkonstruktioner. Band 1. Konstruktion. Utgåva 2. Svensk Byggtjänst

Statens Betongkommitté (1988b) BBK 79 – Bestämmelser för betongkonstruktioner. Band 2. Material, Utförande, Kontroll. Utgåva 2. Svensk Byggtjänst

Svenska Teknologföreningen. (1910). Bestämmelser för leverans och provning av Portlandcement, Handbok XII.

BILAGA 1: CEMENTEGENSKAPER ENLIGT CEMENTAS PRODUKTDATABLAD 2023

Tabellen visar egenskaper för Anläggningscement FA och Anläggningscement Brevik/Slite, enligt Cementas produktdatablad (Cementa 2023).

	Värde	Intervall	Krav enligt SS-EN 197-1
Kompaktdensitet (kg/m³)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	3000	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	3200	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	3200	±20	
Skrymdensitet (kg/m³)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	1250	±250	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	1250	±250	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	1250	±250	
Specifik yta (blaine, m²/kg)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	400	±30	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	360	±30	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	390	±30	
Passerande 32 µm (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	73	±3	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	72	±3	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	73	±3	
Värmeutveckling (kJ/kg)			
1 dygn			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	170	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	170	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	170	±20	
3 dygn			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	240	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	240	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	240	±20	
7 dygn			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	270	±20	≤290 ¹
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	270	±20	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	270	±20	
Alkali, Na₂O-ekv (%)²			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	0,54	±0,05	≤0,6 ²
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	0,55	±0,05	≤0,6 ²
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	0,55	±0,05	≤0,6 ²
Sulfathalt, SO₃ (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	2,8	±0,2	≤3,5 ³
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	2,6	±0,2	≤3,0
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	2,8	±0,2	≤3,0
C₃A, klinker (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	2	±0,7	≤3 ³

Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	2	±0,8	≤3
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	2	±0,7	≤3
Klorid, Cl⁻ (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	0,01	±0,01	≤0,10
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	0,03	±0,01	≤0,10
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	0,02	±0,01	≤0,10
Vattenlöslig Cr⁶⁺ (PPM)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	0-2		≤2 ⁴
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	0-2		≤2 ⁴
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	0-2		≤2 ⁴
Ljushet (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	22	±1	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	17	±1	
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	23	±1	
Glödförlust, flygaska (%)			
Anläggningscement FA - CEM II/A-V 42,5 N - MH/LA/NSR	<5,0 %	-	≤5,0
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Brevik	-	-	-
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA Slite	-	-	-

¹Enligt krav i SS 134202.

²I klinkern enligt krav i SS 134203.

³Enligt krav i SS 134204. Kravet på C₃A gäller klinkern.

⁴Punkt 47 i bilaga XVII till REACH.

BILAGA 2: FRÅGEFORMULÄR

BESTÄLLARE

- Behöver uppgifter anonymiseras eller kan vi beskriva anläggningarna med namn?
- Har ni några foton som vi kan använda i rapporten eller på framsidan? (Vi avser beskriva resp. anläggning och då vill vi gärna ha med bild på resp. anläggning)

VARFÖR

- Hur har projektet initierats? Av vem?
- I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?
- Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong?
- Hur delaktiga har ni varit i utvecklingen av flygaskebetongen (recept mm)?
- Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier?
 - Vad har ingått i förstudien?
 - Vem har initierat förstudien? Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?
- Vilka risker kalkylerar ni med i den här typen av projekt?
- Typ av entreprenadform? Samverkansprojekt?
- Vad var din första inställning till betongen?
- Följer man konstruktionernas utveckling?
 - Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten?
 - Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar? Ge exempel! Vad mäter man (temperatur på levererad betong, lufthalt på färsk betongen, lufthalt på den hårdnade betongen, tryckhållfasthet på färdig konstruktion (utborrade kärnor), sprickor (kartläggning i fält), frostbeständighetsprover på färdig konstruktion?

ANLÄGGNINGEN

- Konstruktionsdelar?
- Dimensioner?
- Har ni upplevt skillnader mellan olika anläggningsdelar (t.ex. skillnader tunna/grova konstruktioner)?

RECEPT

- Hur har arbetssätt/recept justerats? Kan vi få tillgång till ev TB/kravställning?
- Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur? Annat?

- Se frågor under Entreprenör/Betongtillverkare om personen har koll på receptjusteringar/utförande.

UTFÖRANDE

- Vilken påverkan har receptoptimeringarna haft på utförandet? Kostnader, tid, arbetsmoment etc.?
- Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?
 - Tex separation, konsistensproblem, sprickbildning (sätt-, krymp, temperatursprickor eller krackelering)? Sprickor efter att betongen hårdnat?
 - Tex problem med luftporsystemet/lufthalten (har luftporsystemet blivit som förväntat avseende lufthalt/antal luftporer/utformning av luftporer)?

ENTREPRENÖR

VARFÖR

- Vem (dvs. vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?
- I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?
- Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong? Beskriv Möjligheter/svårigheter att med flygaska optimera både värmeutveckling och betongens klimatpåverkan.
- Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien? Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?
- Har man följt resultaten från förstudien eller har man varit tvungen att justera tex recept pga uppskalningen? Blev verkligheten som man förväntade sig? Hur har uppföljningen sett ut?
- Följer man konstruktionernas utveckling?
 - Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten?
 - Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar? Ge exempel! Vad mäter man (temperatur på levererad betong, lufthalt på färsk betongen, lufthalt på den hårdnade betongen, tryckhållfasthet på färdig konstruktion (utborrade kärnor), sprickor (kartläggning i fält), frostbeständighetsprover på färdig konstruktion?
- Hur har receptjusteringarna påverkat projektet i stort?

ANLÄGGNINGEN

- Konstruktionsdelar?
- Dimensioner?
- Skillnader mellan anläggningsdelar?
- Har ni använt någon form av injekteringsbetong? Eller är allt färdigblandad betong?

RECEPT

- Hur skiljer sig er flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar?
- Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, Dmax, tillsatsmaterial, - medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur? Annat?
- Vilka krav ställs (utöver de "normala")?
- Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?
- Är FA inmalad (fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?
- Används Anl FA eller trad. Anl.cement? CEM I, II eller III? Om trad. Anl.cem - var kommer den från (Brevik/Sverige)?
- Var kommer FA från? Vad har man för krav på FA?
- Hur många % av bindemedlet har man ersatt med FA? Och hur mycket FA har man totalt i betongen?

- Frostbeständighet? Hur har man kommit fram till mängd luft som ska blandas in? Har man fått kravställd lufthalt? Har andra provningar ersatt lufthaltsprovning?

UTFÖRANDE

Hur har det färska tillståndet påverkats avseende:

- Arbetbarhet?
- Reologi, pumpbarhet, vibreringsbehov (och ev. återvibrering)?
- Benägenhet till separation?
- Betongmassans stabilitet?
- Sättningar i betongmassan?
- Plastisk krympning?
- Bearbetning av färsk betong, brädrivning och glättning?
- Efterbehandling såsom skydd mot regn, vind, tidig frysning och tidig uttorkning?

Hur har det hårdnande tillståndet påverkats avseende:

- Värmeutveckling (inkluderat inverkan av initial och lufttemperatur)?
- Autogen krympning?
- Kylning med eller utan ingjutna kylrör? Kylbehov i jämförelse med traditionell vattenbyggnadsbetong?
- Hårdningsförhållanden och behov av vattenhärdning/ täckning?

Hur har det hårdnade tillståndet påverkats avseende:

- Mognadsgrads-/hållfasthetsutveckling (tendenskurvor)?
- Reaktionsprodukter och pH-värde?
- Formsläpp?
- Inverkan av formsläppmedel?
- Inverkan av formytans egenskaper?
- Metoder och Tillvägagångssätt vid ytbehandling?
- Behov av vattenhärdning och täckning efter avformning?
- Risk för hängning i formar och armering?

Övrigt

- Hur har projektet inverkat på gjutfogar och gjutetapper?
- Har ni sett några säsongsbetonade skillnader?
 - Behov av vattning under härdning?
 - Vindpåverkan (påverkan på kylning/uttorkning)?
 - Vid vintergjutning - är gränsen fortfarande 5 MPa innan betongen får frysa? Och anser man att gränsen är tillräcklig för att förebygga skador p.g.a. tidig frysning?
 - Tillåter man att betongen fryser? Om ja – hur har det påverkat betongen?
- Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?
 - Tex separation, konsistensproblem, sprickbildning (sätt-, krymp, temperatursprickor eller krackelering)? Sprickor efter att betongen hårdnat?

- Tex problem med luftporsystemet/lufthalten (har luftporsystemet blivit som förväntat avseende lufthalt/antal luftporer/utformning av luftporer)
- Vilken påverkan har receptjusteringarna haft på utförandet avseende tid och kostnader?

BERÄKNINGAR

- Beräkningar för mognadsgradsutveckling /hållfasthetsutveckling (tendenskurvor) - hur löser ni detta? Används "korrekt" (finns det ens) mognadsgradsutvecklingsdata för att avgöra när tillräcklig hållfasthet uppnåtts?
- Temperatursprickberäkningar - har ni korrekt data för dessa beräkningar eller hur har man löst detta för specifika projektet? Hantering indata? Är denna kunskap tillgänglig för alla eller är det något ni arbetat fram inom projektet?
- Hur bra klarar sig befintliga betongdatorer?

BETONGTILLVERKARE

VARFÖR

- Vad har avsikten varit med användningen av flygaskebetong?
- Hur har receptjusteringarna påverkat projektet?
- Vem (vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?
- I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?
- Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien?
- Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?
- Om ni varit med och utarbetat recept - vilka förprovningar har utförts?

RECEPT

- Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur?
- Cement:
 - Har ni upplevt att olika cementsorter inverkar på värmeutvecklingen?
 - och betongens klimatpåverkan?
- Tillsatsmaterial:
 - Vilka möjligheter/svårigheter har ni upplevt att med flygaska optimera både värmeutvecklingen?
 - och betongens klimatpåverkan?
- Tillsatsmedel:
 - Beskriv behovet av luftporbildare i er betong
 - Beskriv behovet av exempelvis superplasticerare, retarderare och acceleratorer för att styra temperaturutvecklingen.
- Ballast:
 - Vilka justeringar av ballastgradering och Dmax görs för att minska värmeutvecklingen respektive betongens klimatpåverkan?
 - Kravställs ballasten på samma sätt eller gör man några avsteg alt kravskärpningar?
 - Har återanvänd betong använts som ballast i någon av projekten? Hur ställer man sig till detta?
- Bindemedel
 - Används Anläggningscement FA eller trad. Anläggningscement? CEM I, II eller III? Om trad. Anläggningscement - var kommer den från (Brevik/Sverige)?
 - Är FA inmald (i fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?
 - Hur många % bindemedel har man ersatt med FA? Och hur mycket FA har man totalt i betongen? Har ni ändrat den totala bindemedelshalten? Och har vbt förändrats (hur mkt vatten har använts)?
 - Var kommer FA från? Vad har man för krav på FA?

- Har man behövt justera blandningstid/-sekvenser (för att bl.a. säkerställa jämn och tillräcklig lufthalt i betong)?
- Har justeringar gjorts avseende betongens gjuttemperatur?
- Vilka krav ställs (utöver de "normala")?
- Frostbeständighet?
 - Hur har man kommit fram till mängd luft som ska blandas in? Har man nått kravställd lufthalt? Har andra provningar ersatt lufthaltsprovning?
 - Har betongen haft jämn lufthalt eller stora variationer? Kan det isf härledas till typ av FA, leverantör eller annat?
 - Om kravställd lufthalt ej uppnås -hur hanteras detta? Om för hög/för låg - olika provningar/åtgärder?
 - För hög...
 - För låg...
 - Om frostbeständighetsprovning ej uppfylls, hur hanteras detta?
 - Har några provningar utförts avseende lufthalten i den hårdnade betongen? Överensstämmer denna med uppmätt lufthalt i den färska betongen? Efterfrågas denna typ av provning?
- Hur hanteras beständighetsfrågor såsom vattentäthet, sprickbildning, erosion i vattenlinjen, urlakning, frostangrepp, ASR och försenad ettringitbildning? Har flygaskebetongen någon inverkan på dessa parametrar?

UTFÖRANDE

- Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?
- Har ni levererat bruk/betong som är avsett för injekteringsbetong? Dvs har ni på något sätt varit inblandade i denna typ av process?
- Har ni sett några skillnader mellan säsonger - gällande utförande, recept, temp på levererad betong? Har ni på något sätt anpassat betongen utifrån säsong?
- Vid vintergjutning - är gränsen fortfarande 5 MPa innan betongen får frysa? Och anser man att gränsen är tillräcklig för att förebygga skador p.g.a. tidig frysning?

KONSULT

VARFÖR

- Vem har initierat användningen av flygaskebetong i projektet?
- Hur har det påverkat projektet i stort?

ANLÄGGNINGEN

- Konstruktionsdelar?
- Dimensioner?
- Hur hanteras/beskrivs krav i nämnda anläggningar? Funktionskrav eller specificerad materialsammansättning? Hur hanteras normer, standarder och AMA?

RECEPTJUSTERINGAR

- Känner du till vilka receptjusteringar/justeringar av arbetssätt som gjorts? Kan du beskriva dem?
- Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur?

UTFÖRANDE

- Har utförandet underlättats i jämförelse med traditionell betong? Om ja – hur?

BERÄKNINGAR

- Vad var din första inställning till betongen?
- Hur har man löst materialparameterfrågan, dvs tillgång till data för dina beräkningar?
- Har införandet av flygaskebetong, vid projektering, påverkat kravställning gällande någon/några av följande parametrar?
 - Hållfasthetsklass
 - Vct
 - Alkalihalt
 - Täckande betongskiktets tjocklek
 - Relevanta temperaturutvecklingsberäkningar
 - Relevanta mognadsgradsutvecklingsberäkningar
- Anser du dig ha tillräckliga data för att kunna bestämma betongens långtidsegenskaper (krypning och krympning)?

BILAGA 3: SAMMANSTÄLLNING AV SVAR FRÅN INTERVJUER

LILLA EDET

Frågor och svar, Beställare

- *Hur har projektet initierats? Av vem?*

Projektet har initierades av projektledaren på Vattenfall Vattenkraft. Frågeställningen avsåg hur man kunde minska kylbehovet i betongen. Hållbarhetsfrågan lyftes senare och miljöaspekten användes som ett extra argument för att få igenom projektet. Cementkrisen kom emellan, vilket försenat projektet.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Hållbarhetsfrågorna aktualiserades under utredningens gång, i projekteringsfasen – det som hände i omvärlden styrde. Tankarna hade väckts innan, men det var i detaljprojekteringsskedet som man använde hållbarhetsfrågan som ett ytterligare argument för att få igenom projektet.

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong?*

Syftet var inledningsvis för att minska kylbehovet och minska risken för temperatursprickor, men under projektets gång såg man även fördelarna med att kunna sänka projektets/betongens CO₂-avtryck. En stor bonus är också att man kunnat förbättra arbetsmiljön.

- *Hur delaktiga har ni varit i utvecklingen av flygaskebetongen (recept mm)?*

Vattenfall Research & Development har varit högst delaktiga och de som från början drivit projektet.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier?*

Ja, under 2018 initierades en skrivbordsstudie i form av ett examensarbete. Sedan kom Corona-pandemin, och pga. de osäkerheter som rådde sköts projektet upp ett år. Enligt den första tidplanen skulle gjutningarna genomförts under 2020 och 2021. (Men pga. att Lilla Edet blev försenat, så hann man komma igång med Forshuvudforsen och Rengård tidigare.) Efter skrivbordsstudien gjordes en förstudie (inklusive förprovningar) i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby, där ett koncept-recept togs fram. När sedan betongleverantören handlats upp anpassade de receptet till deras lokala material. Man skruvade på receptet för att optimera betongen och för att få ner cementmängden (för minskat kylbehov och minskade CO₂-utsläpp). Nya tester gjordes av betongleverantören och man upprepade en del av de provningar man tidigare hade utfört i Älvkarleby, gällande materialsammansättningen (betongens färska tillstånd). Typiskt för den här typen av betong är utmaningen att få in rätt mängd och fördelning luft – och att få en jämn lufthalt. Projektet drivs som ett Partnering-projekt, vilket gjort att Vattenfall kunnat vara med och bedöma leverantörens kompetens samt hjälpa entreprenören

att välja en leverantör med hög teknisk kompetens som bedömts ha förutsättningarna för att kunna leverera kvalitetsmässig betong.

➤ *Vad har ingått i förstudien?*

Inledningsvis studerades olika typer av receptoptimeringar som kunde minska betongens kylbehov. Man jämförde betong med flygaska, is och större ballast och kom fram till att man ville gå vidare med flygaska och större ballast. Eftersom god arbetbarhet är ett kriterium för beständig betong, gjordes inledande provningar avseende sättmått, konsistens (enligt "trial and error"-metoden), frysprovning och förkarbonatisering. Lufthalt provades genom att ändra blandningssekvenser. Borde kanske ha gjort frysprovning på karbonatiserad betong men vi ansåg att det inte var nödvändigt då betongen inte utsätts för salter.

Man gjorde inledande pumptester (storskaligt) där man gjöt testbalkar med konceptbetong och traditionell betong för att erhålla data om värmeutvecklingen. Samtidigt kunde yrkesarbetarna känna på betongen och testa dess arbetbarhet. Chalmers monterade optofiber för att mäta töjningar (givare inmätta i balkarna för att mäta töjningar under hårdnandet, se även Nordström et al., 2022). Resultat från värmeutvecklingen användes för att kalibrera sprickriskberäkningar i Contest Pro. NCC och Thomas Betong använde mätvärdena för att justera indata till beräkningsprogrammet. Exakt vilka parametrar som justerades vet vi inte. Programmet och biblioteket är låst (materialtyper går inte att sätta in, tex relationen mellan cementets temperatur-/värmeutveckling, reaktionshastighet m.m.). Man har skruvat på de parametrar man kan skruva på, men det är svårt utan fulla dataset. NCC beräknade de tuffaste gjutetapperna (stor klump mot berg). För projektet sattes initialt en spricksäkerhetsfaktor på 0,6 (kvoten mellan beräknad dragspänning och aktuell draghållfasthet) för sprickberäkningar, i enlighet med AMA och vattentäta konstruktioner, men då endast en liten del av konstruktionen är utsatt för ensidigt vattentryck, beslutades det i projektet att frånga detta krav. Istället beslutades att 0,7 mm skulle gälla som krav för hela projektet.

Gällande sprickviddskrav anger RIDAS 0,2-0,3 och här tillämpades 0,3 eftersom man ville undvika mycket stora armeringsmängder.

Inledningsvis gjöts kranfundament för att testa betongen, med goda resultat – fullskaletest som uppfyllde samtliga krav.

Betongkärnor borrades ut ur två provkroppar. Det visade sig att lufthalten inte uppfyllde kraven, men detta var på grund av att större ballast tog upp stor del av planslipsprovet.

➤ *Vilka risker kalkylerar ni med i den här typen av projekt?*

- I. Flödet av material, framförallt tillgång till flygaska, eftersom man importerar denna från Tyskland. Man ville försäkra sig om att inte behöva byta flygaska under projektets gång. Betongleverantören försäkrade tillgång till samma typ av flygaska genom hela projektet.
- II. Kostnaderna för materialen på grund av stigande priser.

- III. Kvalitetsvariationer och pumpstopp.
- IV. Temperatursprickor. Betongen är snabb på sommaren, långsam på vintern.
- V. Behov av kylning.
- VI. Yrkesarbetare som inte vara vana att arbeta med den här typen av betong.
- VII. Tiden. För att eliminera risk måste kunskapsnivån utvärderas innan man fattar beslut för att använda material, som konceptbetongen i detta fall (ej traditionell betong). Tid för utredning beror på kunskapsnivån hos alla parter – entreprenören, beställaren, betongleverantören och konsulten. Om samtliga saknar erfarenhet så räcker det kanske med 1–2 år. Minst ett år om du kan din betong. Minst det dubbla om erfarenheter saknas. En 1–2 års förstudie behövs för ett helt obeprövat koncept för att kunna hinna med alla tester, men med någorlunda kända förutsättningar, kanske 1 år.
- VIII. Inför genomförandet skulle man övertyga projektstyrelsen att allt var förberett och skulle funka men det har varit svårt att övertyga styrelsen. Man gjorde en utförlig riskanalys, för att eliminera riskerna och beslutade att man skulle kunna gå över till traditionell betong med kylning om det inte funkar med konceptbetongen. Man var förberedd på att beställa kylrör (och hade optionen att kunna göra det).
- IX. Det är möjligt att man på sikt kommer få frostproblem.

Men det finns också vinster såsom en förbättrad arbetsmiljö (man slipper trånga utrymmen), minskat CO₂ avtryck, minskade arbetskostnader (främst i tid), och delvis minskade materialkostnader (kylning behövs ej).

➤ *Typ av entreprenadform?*

Samverkansprojekt

➤ *Följer man konstruktionernas utveckling?*

Man håller muntlig löpande kontakt och följer temperaturutveckling under hårdnandet, lufthalt (färsk betong samt planslip efter betongen har hårdnat), konsistens och allmän produktionsdata. Man följer tryckhållfastheten på färdig konstruktion (utborrade kärnor), sprickor (kartläggning i fält) och har även gjort frostbeständighetsprover på färdig konstruktion.

➤ *Konstruktionsdelar?*

Grövre konstruktioner och någon ledmur har gjutits med flygaskebetongen. Enstaka gjutningar runt tex luckfalsar där man använder mindre sten.

➤ *Har ni upplevt skillnader mellan olika anläggningsdelar (t.ex. skillnader tunna/grova konstruktioner)?*

Inget vi hört talas om.

- *Uppfyller man hållbarhetskraven?*

Hållfasthet bör kontrolleras vid 90 dygn istället för 28 dygn eftersom man har en långsammare hållfasthetsutveckling.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, lufthalt, leverans-temperatur? Annat?*

Här används traditionellt anläggningscement (CEM I) och stenmax 50 mm. Dock har mindre sten i trånga passager använts. Man har gjutit främst grova konstruktioner med flera meters tjocklek. 30% av cementet har ersatts med flygaska. Fokus har varit en fungerande lufthalt som har varit svårt att få till. Betongleverantören har haft problem med detta tidigare, men hade en del av lösningen; man skruvade blandningsproceduren och optimerade tillverkningsprocessen för att få tillräcklig mängd luft. Användningen av flygaskebetong betydde en liten merkostnad för betongen, men var ändå billigare på grund av färre arbetstimmar och mindre materialförbrukning (kylrör etc.). Totalt, så var det ungefär samma kostnader som med traditionell betong. Flygaskebetongen har en hög flytgräns, men trevlig reologi, bra arbetbarhet, trots att den ser jobbig ut.

När detta projekterades gällde SS 137003:2015 som innehöll begränsningar avseende hur stor del av bindemedlet som fick ersättas med flygaska. Då valde man att göra dessa avsteg. Beställaren tog ansvaret. Krav på mängden flygaska uppfylls dock enligt den nuvarande standarden (2021 års version).

I detta projekt används CEM I – traditionellt anläggningscement eftersom vi befinner oss på Västkusten, som försörjs från Norge (Brevik, reds anm).

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?*

Nej!

- *Övrigt?*

Man hade stora utmaningar med grundläggningen. Det behövdes mycket injektering av undergrunden innan man gjöt skarpt.

Frågor och svar, Entreprenör

- *Vem (dvs. vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?*

Entreprenören har initierat arbetet.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Beställaren har drivit hållbarhetsfrågan. Vi har drivit frågor rörande teknik och arbetsmiljö.

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong? Beskriv Möjligheter/svårigheter att med flygaska optimera både värmeutveckling och betongens klimatpåverkan.*

Från beställaren: hållbarhet.

Från Entreprenören: tekniska + arbetsmiljömässiga frågeställningar.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien? Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?*

Ja, Betongleverantören har tagit fram recept tillsammans med oss och sedan har man gjort en skarp gjutning av en skibordsliknande konstruktion som har lyckats. Receptet var redan utvecklat och man har gjort en testgjutning för att kunna kalibrera beräkningsprogrammet samt följa upp värmeutveckling och sprickrisk.

- *Har man följt resultaten från förstudien eller har man varit tvungen att justera tex recept pga uppskalningen? Blev verkligheten som man förväntade sig? Hur har uppföljningen sett ut?*

Inga justeringar. Vid trånga utrymme har man inte använt konceptbetongen men vanligt konventionell betong med mindre sten (D_{max} 25 mm). Det upplevdes som svårt att gjuta och man hade gärna använt en justerat form av konceptbetongen/flygaskebetongen med mindre D_{max} .

- *Följer man konstruktionernas utveckling? Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten?*

Temperaturgivare har gjutits in i vissa delar.

- *Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar? Ge exempel! Vad mäter man (temperatur på levererad betong, lufthalt på färsk betong, lufthalt på den hårdnade betongen, tryckhållfasthet på färdig konstruktion (utborrade kärnor), sprickor (kartläggning i fält), frostbeständighetsprover på färdig konstruktion?*

Ja, lufthalt och hållfasthet.

- *Hur har receptjusteringarna påverkat projektet i stort?*

Receptet var redan klart – inga justeringar.

- *Konstruktionsdelar?*

Olika konstruktionsdelar bland annat två pelare och ett skibord.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementshalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur? Annat?*

Betongen innehåller traditionellt anläggningscement (Brevik) och flygaska.

Anläggningscement Brevik: 252 kg/m³

Flygaska: 126 kg/m³ → 33,3%

Vbt: 0,50

Lufthalt: kravställd till 4,5–6,5 %, men ligger stabilt på 5–5,5 %.

- *Vilka krav ställs (utöver de "normala")?*

Sättningskrav: 90–120 mm (något lägre än vanligt), men är ändå pumpbart och kompakterbart.

- *Är FA inmalad (fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?*

Flygaska har tillsatts vid betongens beredning.

- *Frostbeständighet? Hur har man kommit fram till mängd luft som ska blandas in? Har man fått kravställd lufthalt? Har andra provningar ersatt lufthaltsprovning?*

Vet inte, men större än vad normen kräver.

- *Hur har det färska tillståndet påverkats avseende: Arbetbarhet? Reologi, pumpbarhet, vibreringsbehov (och ev. återvibrering)? Benägenhet till separation? Betongmassans stabilitet? Sättnings i betongmassan? Plastisk krympning?*

Bara positiva erfarenheter med ovanstående.

- *Bearbetning av färsk betong, brädrivning och glättning?*

Brädrivning har upplevts svårare (segare) – det förekom mindre ytsläpp-problem.

- *Efterbehandling såsom skydd mot regn, vind, tidig frysning och tidig uttorkning?*

Enligt riktlinjer.

- *Hur har det hårdnande tillståndet påverkats avseende:*

Värmeutveckling (inkluderat inverkan av initial och lufttemperatur)? 60–65 grader med utgångstemperatur på 21–22 grader.

Autogen krympning? Högt vattencementtal.

Kylning med eller utan ingjutna kylrör? Kylbehov i jämförelse med traditionell vattenbyggnadsbetong? - Ingen kylning har använts.

Härdningsförhållanden och behov av vattenhärdning/ täckning? - Som vanligt.

- *Hur har det hårdnade tillståndet påverkats avseende:*

Mognadsgrads-/hållfasthetsutveckling (tendenskurvor)? Konventionell betongdator men använt/matat in eget recept.

Reaktionsprodukter och pH-värde? Vet inte.

Formsläpp? Lättare än med vanlig betong, bara en typ av formolja (innan har man haft 6–7 olika).

Inverkan av formytans egenskaper? Var nöjd med ytorna.

Metoder och Tillvägagångssätt vid ytbehandling? Ingen ytbehandling.

Behov av vattenhärdning och täckning efter avformning? Man har plastat in ytan och behandlat med vattenånga i 10 dygn (vid behov).

Risk för hängning i formar och armering? Inget man har noterat.

- *Hur har projektet inverkat på gjutfogar och gjutetapper?*

Har inte påverkats hittills.

- *Har ni sett några säsongsbetonade skillnader?*

Man har hittills bara gjutit under sommaren.

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen? Tex separation, konsistensproblem, sprickbildning (sätt-, krymp, temperatursprickor eller krackelering)? Sprickor efter att betongen hårdnat? Tex problem med luftporsystemet/lufthalten (har luftporsystemet blivit som förväntat avseende lufthalt/antal luftporer/utformning av luftporer)*

Nej, ingenting.

- *Vilken påverkan har receptjusteringarna haft på utförandet avseende tid och kostnader?*

Receptet var redan färdigt.

Frågor och svar, Konsult

- *Vem har initierat användningen av flygaskebetong i projektet?*

Beställaren. I förstudien var respondenten projektledare, men vi var ej särskilt delaktiga i utvecklingen av flygaskebetongen. Huvudmotivet att väljas flygaskebetong var att slippa kylning och hålla nere temperaturutvecklingen.

- *Hur har det påverkat projektet i stort?*

Inte påverkat vårt arbete så mycket. Vi har varit delaktiga i utredning / grovprojekteringen (underlag för upphandling samverkansentreprenad). Entreprenören upphandlades och sedan utfördes detaljprojekteringen. . Ej påverkat detaljprojekteringen, utan dimensionerat enligt konventionella normer, dvs. man har utfört en konventionell detaljprojektering, dock med överläggningar med Entreprenören. Övergick sedan till utförande-avtal. Man använde större stenstorlek och flygaska. Armering och täcksikt har fått anpassas till dessa förutsättningar. Sättnmåt har anpassats under projektets gång. Strikt krav på 90–120 mm har frångåtts (vill vanligen ha styvare betong i kraftverkskonstruktioner). Idag riktvärde på 120 mm, får ej vara över 150 mm.

- *Konstruktionsdelar?*

Grova konstruktioner - regleringsdamm med 4 utskov, kraftig bottenplatta, på denna ställer man pelare som luckor ansluts till - i flygaskebetong. Brobanan uppe på pelarna uppströms luckorna är dock gjuten med traditionell betong.

- *Dimensioner?*

Bottenplatta: >1,5 m tjock, grundlagd på berg. Utskov: spännvidd 16 m. Höjd till pelartopp: 9m. 5,8 m mellan lucktröskel och DG. Man har använt flygaskebetong till de grövre konstruktionerna (bottenplatta, pelare). I brobanan, samt någon ledmur har man använt konventionell betong (traditionell cement, CEM I). Enligt entreprenören används traditionell betong i trånga sektioner/passager på grund av att man inte kunde tillverka flygaskebetong med mindre stenstorlek.

- *Hur hanteras/beskrivs krav i nämnda anläggningar? Funktionskrav eller specificerad materialsammansättning?*

Vanliga funktionskrav med hållfasthetskrav enligt normer, vct-krav, lufthalt, sättnmåt m.m. Max mängd flygaska i specifikationerna (utifrån förprovningar) max 50% av bindelmedelsinnehållet.

- *Hur hanteras normer, standarder och AMA? AMA-baserad teknisk beskrivning*

Avsteg? Vet ej. Luftporhalten mäts på normalt sätt vid leverans. Vid varje arbetsskift tas kuber ut för hållfasthet, lufthalt och temperatur. Alla krav uppfylls. En diskussion fanns om strikt lufthalt på 4,5 %, men man tillåter enstaka lass på upp till 9 % (4–6,5 % är dock kravställt i TB).

- *Känner du till vilka receptjusteringar/justeringar av arbetssätt som gjorts? Kan du beskriva dem?*

Flygaska maximalt upp till 50 %, stenstorlek upp till D_{max} 45 mm, 250 kg CEM I Portlandcement/m³, vbt 0,50. Dock inte insatt i hur receptet togs fram och de eventuella justeringar som gjorts. Inte heller justeringar av arbetssätt. Anlitade bygglädares följer arbetet på plats och bör känna till eventuella justeringar av arbetssätt.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, d_{max} , tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur?*

Armering: Oklart hur den påverkats, cc är 120 mm enligt tyska sprickriskberäkningsmetoder som ger lite mindre armering och som RIDAS nämner för dimensionering av minimiarmering i grova konstruktioner.

Leverans-temperatur: Temperaturen på levererad betong har ej specats. Det har varit gjutningar under sommarperioden tills nu. Inga extra begränsningar gällande temperatur för utomhusgjutningar.

Täckande betongskikt: 70 mm (För ytor mot fritt vatten är kravet 70 mm enligt RIDAS. 50 mm är specificerat mot torra ytor och mindre påverkade ytor även vid gjutdelar med flygaskebetongen med D_{max} 45 mm.)

- *Har utförandet underlättats i jämförelse med traditionell betong? Om ja – hur?*

Underlättat på så sätt att tempberäkningar kommit fram till att man inte behöver någon kylning. Risk för sprickor är liten.

- *Hur har man löst materialparameterfrågan, dvs tillgång till data för dina beräkningar?*

NCC har gjort dessa beräkningar (ContestPro), med hjälp av Thomas Betong. Man har modifierat indata utifrån fältundersökningar, men respondenten visste inte hur och hänvisar till entreprenören (NCC) för mer detalj.

- *Har införandet av flygaskebetong, vid projektering, påverkat kravställning gällande någon/några av följande parametrar?*

Hållfasthetsklass: Nej. Hållfasthetsklassen är C30/37 som man har nog uppfyllt efter 28d. Enstaka kuber har visat lägre värde. Inga rapporter att detta underskridits.

Vct/vbt: 0,50.

Alkalihalt: Vet ej.

Täckande betongskiktets tjocklek: 70 mm överlag, 50 mm på icke-exponerade ytor där man inte har större påverkan av varierad fuktighet

- *Anser du dig ha tillräckliga data för att kunna bestämma betongens långtidsegenskaper (krypning och krympning)?*

Vet ej om vi haft anledning för att göra det. Har tittat på brobanan, men där har man inte använt konceptbetong, så irrelevant för det här projektet.

- *Utmaningar/problem?*

De säger att betongen är lättarbetad och bra med gott resultat överlag.

Dock en överform som gått från vertikal till horisontell cirkulär, lutande som man haft en del småbubblor i. Man har testat med gjutduk, men vet inte om det blev bättre. Får se hur det går framåt. Men man är i överlag nöjda.

Det har spruckit på vissa ställen (där man förväntat sig). Ställen där man inte har armerat på grund av att övergjutningar skulle ske. Det vill säga att det har fungerat enligt beräkningar. Temperaturgivare är ingjutna, men respondenten har inte sett resultatet.

FORSHUVUDFORSEN

Frågor och svar, Beställare

- *Hur har projektet initierats? Av vem?*

Exjobb 2017 på uppdrag av Fortum, projekt med KTH om flygaskebetong som tog fram en teoretisk modell för att titta på tillsats av flygaska och grövre ballast för att få ner temperaturutvecklingen. Sedan genomfördes ytterligare ett exjobb med fullskaletester vid Älvkarleby, Betongindustri i Gävle, där Fortum och Vattenfall var handledare. Fortum utförde arbeten med liknande betong i Laos där man använde betong med krossad is och flygaska i en RCC-damm. Man tyckte att det funkade väldigt bra och ville använda liknande koncept i Sverige.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Hållbarhetsfrågan var mer som en positiv följd effekt och betraktades som "biprodukt".

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong?*

Att få ner temperatur- och värmeutvecklingen.

- *Hur delaktiga har ni varit i utvecklingen av flygaskebetongen (recept mm)?*

Respondenten har delvis varit involverade.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier?*

Vad har ingått i förstudien?

Exjobb 1: Huvudfokus har varit att få ner värmeutvecklingen. Man utförde tester med större ballast och kontrollerade dess inverkan på betongen som upplevdes som positiv. Man gjorde även tester för att studera skillnader med flygaska och skillnad med is istället för vatten.

Exjobb 2: Inom denna förstudie gjordes fullskaleförsök (storskalig) och insåg att man behövde luftporbildare.

Steg 3: "Vanliga" förprovningar av receptet gjordes på betongstationen, så som frystest - som betraktades som viktigt för att minska risken för erosion i vattenlinjen - och tryckhållfasthet.

- *Vilka risker kalkylerar ni med i den här typen av projekt?*

Sprickor, erosion/nötning i vattenlinjen – man har kompletterat med rostfria stålplåtar i vattenlinjen, infästade med dubb (ingjutna i betongen). Värmekabel gjöts in i betongen mot kalla ytor (tex berg och motgjutningar) för att kunna användas vid behov.

- *Typ av entreprenadform? Samverkansprojekt?*

"Partnering!"

- *Följer man konstruktionernas utveckling?*

Driftsättningen är 2024 innan vårfloden. Planen är att följa utvecklingen – det görs i alla projekt. Men det finns inga planer på någon uppföljning utöver de vanliga. Konstruktionen kommer vara under uppsikt.

- *Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten; Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar?*

Temputveckling görs i alla projekt (ej specifikt för detta projekt), man har provtryckt kuber (ej från befintlig konstruktion), mätt lufthalt (ca 4 % på färsk betong), man kommer mäta lufthalt på färdig konstruktion (borrkärnor), och en sprickkartering utförs (hittat fåtal sprickor) – men mycket mindre sprickor än i traditionell betong.

Även gjutningen direkt på berg har funkad bra. 1 spricka fanns på skibordet (16 m lång på 8–10 m bred platta). Respondenten gissar att det handlar främst om tvångssprickor. Frost- och tryckhållfasthetsprovning gjorts på kuber, men man kommer även borra ut kärnor för tunnslip (för fördelning av ballast och luftporsystem) och hållfasthetsprovning.

- *Konstruktionsdelar?*

Används för alla konstruktionsdelar tjockare >1m

- *Dimensioner?*

Tunna gjutningar görs ej med samma stenstorlek, men i övrigt använts samma betong.

- *Armering?*

Använt minimiarmering för huvuddelen av konstruktionen, men vid särskilda delar såsom nålstöd och lucklager, bågättströsklar (höga tryck) samt vid någon pelare - som behöver kunna ta extra last - har man extra armering.

- *Hur har arbetssätt/recept justerats? Kan vi få tillgång till ev TB/kravställning?*

Man använder anläggningscement Slite och flygaska från Turkiet (certifierad Slite-produkt). Två separata silos i Borlänge på Betongindustri (de sköter allt rörande betongen), blandningen skett där. Receptet justerades i tidigt skede för att få god arbetbarhet. Respondenten hänvisar till NCC och Betongindustri för detalj.

- *Vilken påverkan har receptoptimeringarna haft på utförandet? Kostnader, tid, arbetsmoment?*

Även om bindemedlet är cirka 100 kr dyrare per m³ jämfört med traditionell cement och ballasthanteringen är dyrare (grövre ballast) har man gjort en besparing på cirka 100 kr/m³ på grund av minskade arbetskostnader (och minskat materialbehov, t.ex. kylrör). Temperaturminskningen var viktigast! Miljöeffekten är också positiv, både gällande minskat behov av formar, plaströr, effektiv byggprocess, transporter (virke, stål), stål i form av armering, gjutfogar, fogband, cement m.m.

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?*

Tex separation, konsistensproblem, sprickbildning (sätt-, krymp, temperatursprickor eller krackelering)? Sprickor efter att betongen hårdnat?

Förvånansvärt täta och fina konstruktioner! Finns vissa skador, men mindre i antal jämfört med traditionell betong. Beställaren har haft hårda kontroller och höga krav. Beställare med kunskap ger garanti för utförande på bra sätt.

Tex problem med luftporsystemet/lufthalten (har luftporsystemet blivit som förväntat avseende lufthalt/antal luftporer/utformning av luftporer)? Vid för kallt.

Värmekablar gjuts in vid behov för att minimera risk med att gjuta mot kalla ytor. Man gjuter vid alla temperaturer, men säkerställer att ytorna man gjuter mot inte är för kalla.

Frågor och svar, Entreprenör

- Vem (dvs. vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?

NCC/entreprenören.

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong? Beskriv Möjligheter/svårigheter att med flygaska optimera både värmeutveckling och betongens klimatpåverkan.*

Dels hållbarhetsfrågan, men främst för att minska kylningsbehovet.

- *Konstruktionsdelar? Dimensioner?*

Alla större konstruktioner med flygaskebetong (skibord, pelare), mindre som ej har lika stor temperaturutveckling har man kört med traditionell betong. Alla med tjocklek över 200 mm.

- *Har ni använt någon form av injekteringsbetong? - Nej. Eller är allt färdigblandad betong? - Ja*
- *Har ni kört traditionella gjutningar eller några specialgjutningar?*

Endast traditionella, inga glidformsgjutningar.

- *Hur skiljer sig er flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementhalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur? Annat?*

Temperaturen har varit vinningen. 45 mm sten, 120 kg/m³ flygaska+ 240 kg/m³ traditionell anläggningscement. Sista stora gjutningen kunde utföras med traditionell betong. Sista kvarvarande gjutningarna kommer utföras med anläggningscement FA. Oklart om det blir med extra flygaska eller ej.

Lufthalt 4–6 %.

Täckande betongskikt: 70 mm i alla vattenvägar, i övriga 50 mm.

Temperatur vid leverans: upp emot 24 °C (när det var väldigt varmt), men i snitt 12–14 °C. Man har gjutit året runt.

- *Vilka krav ställs (utöver de "normala")?*

Inget utöver normalt, man ville ha en arbetbar och gjutbar (sättnått ca 180–200 mm) betong. Vid 200 mm var betongen riktigt bra att jobba med. Fortum har varit med och arbetat fram kraven och NCC hade inga egna krav, men utförde provgjutningar till att börja med. Man gjorde någon korrigering i början för att få betongen mer arbetbar, eftersom den var väldigt trög i början och fyllde inte ut i formen som tänkt samt var betongen för seg för att omsluta armeringen. I toppen av en cell vid fångdamm använde man konceptbetongen (1,4 m tjock i övre delen), man hade låga krav på betongen. Det blev ok, men man ville få den att fylla ut bättre.

- *Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?*

Fabrik, det är bara någon km till stationen.

- *Är FA inmalad (fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?*

Vet ej

- *Hur har det färskas tillståndet påverkats avseende:*

Allmänt, precis som med traditionell betong.

Arbetbarhet? – Bra.

Reologi, pumpbarhet, vibreringsbehov (och ev. återvibrering)? - Som vanligt.

Benägenhet till separation? – Nej.

Betongmassans stabilitet? – Nej.

Sättningar i betongmassan? Nej.

Plastisk krympning? Nej, det fanns förvånansvärt få sprickor. I inspektionsgång under skibord har BESAB tryckt någon enstaka spricka (ville knappt trycka för att den var knappt 0,2 mm, men det gjordes eftersom den var genomgående med läckage).

- *Bearbetning av färsk betong, brädrivning och glättning?*

Gjort på samma sätt som alltid. Men man har märkt att grejerna vill suga sig fast. Man har slipat och skurat, med fint resultat.

- *Efterbehandling såsom skydd mot regn, vind, tidig frysning och tidig uttorkning?*
Samma procedur som vanligt. Platen är det viktiga, annars har man kört med vattenspridaren.
- *Hur har det hårdnande tillståndet påverkats avseende: Värmeutveckling (inkluderat inverkan av initial och lufttemperatur)?*

Betongen Utvecklar mindre värme och beräkningarna har stämt relativt väl med verkligheten. Man har inte kommit upp så högt som beräkningarna. Vi körde helt utan kylning och ingen kylning av ytor.

Härdningsförhållanden och behov av vattenhärdning/ täckning?

Vissa extrema dagar har man kört med både plast och vattenspridare. Man hade alltid plast. Kommer man inte åt så har man även kört spridare (året runt).

- *Hur har det hårdnade tillståndet påverkats avseende: Formsläpp?*

Samma hela tiden, ej bytt. Klär formar med 1 tums bräddor men fick dränka formarna under sommartiden.

- *Hur har projektet inverkat på gjutfogar och gjutetapper?*

Vi har faktiskt kunnat köra stora gjutetapper och hade gått på tiden. Pelare var delat på 4 etapper och har kunnat maximera för att få framdrift. Man har inte behövt ta hänsyn till den långsammare hållfasthetsutvecklingen.

- *Har ni sett några säsongsbetonade skillnader?*

Vi var rädda för att inte komma upp i temperaturen i början, men vi har inte haft några bekymmer med det.

- *Vid vintergjutning - är gränsen fortfarande 5 MPa innan betongen får frysa? Och anser man att gränsen är tillräcklig för att förebygga skador p.g.a. tidig frysning?*

5 MPa gäller innan frysning. Det är betongdatorn som styr.

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?*

Nej. Den enda diskussionen som fanns var att gubbarna har blivit mer svarta i ansikten. Annars bara fördelar: Det var mindre arbete när man slipper kylslangar. Lättare att ta sig ner i formen (kylrör i vägen för att ta sig ner). Man får samma resultat, men utförandet är enklare. Så länge man får till arbetbarheten funkar det som det ska. Man har haft bra dialog med betongleverantören.

Frågor och svar, Konsult

- *Vem har initierat användningen av flygaskebetong i projektet?*

NCC var intresserat av att jobba med vattenkraftskonstruktioner och att använda flygaskebetong för att få ner kylningsbehov, som de anser som ett problem vid tjocka konstruktioner som är sprickbenägen. Huvudmålet var att minska kylbehov (ekonomiskt bättre och minskar sprickrisk). Annars gjutit vindkraftfundament (gravitationsfundament) gjutit på jord → mindre motstånd vid rörelse → mindre sprickrisk.

Vattenfall var också intresserat och har gjort egna provningar. Flygaskebetong skulle användas från början på grund av tidigare positiva erfarenheter från Rengård.

- *Hur har det påverkat projektet i stort?*

Dyrare betong men samtidigt minskade kostnader för kylning.

- *Vilka konstruktionsdelar har ni gjort?*

Skibord (gjutit mot berg), stora pelare, spiral m.m. Fram för allt grova konstruktioner med risk för sprickbildning på grund av värmeutveckling under hårdnandet.

- *Vilka dimensioner hade konstruktionsdelarna?*

Alla olika dimensioner bland annat pelare med dimension: 4–5 m bred, 5–6 m hög, cirka 13 m lång.

- *Hur hanteras/beskrivs krav i nämnda anläggningar? Funktionskrav eller specificerad materialsammansättning? Hur hanteras normer, standarder och AMA?*

Enligt kraven i standard (SS137003 + AMA, övriga relevanta normer). Gjuthastighet: utfört enligt AMA. Temperaturmätning; som vanligt. Men man har överskridit standardkrav när det gäller mängd flygaska. "Mycket mer än 30%" av total bindemedel.

- *Känner du till vilka receptjusteringar/justeringar av arbetssätt som gjorts? Kan du beskriva dem?*

Nej, betongleverantörerna hade koll på recept/receptjusteringar.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementshalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur?*

Täckande betongskikt enligt standard. Lufthalt enligt normer 4 % på grund av grov ballast. I ett annat projekt har betongen blivit godkänd genom frostprovning. Upplevs som svårare att uppnå önskat lufthalt med mycket flygaska. Halt flygaska: "mycket mer än 30%" total bindemedel. Flygaska importeras från

Tyskland och/eller Turkiet. Flygaska måste vara A-klassad med hänsyn till restkolmängden (påverkar bland annat lufthalten). Forshuvudforsen har gjorts i två delar: en del med anläggningscement Slite + flygaska och den andra delen med anläggningscement FA + flygaska. Mängden Flygaska var dock samma i båda delar (total bindemedelhalt). ASR: följer rekommendationer/riktlinjer när det gäller mängd av potentiell reaktiv ballast.

- *Har utförandet underlättats i jämförelse med traditionell betong? Om ja – hur?*

Betongen har betett sig bra, var lätt och smidigt att arbeta med. Inga utmaningar eller problem har uppstått. Vid spiralen trodde de man skulle behöva kylning, men det behövdes inte alls.

- *Vad var din första inställning till betongen?*

Respondenten tyckte det var väldigt positivt och roligt. "Utan provning kommer vi inte framåt i branschen".

- *Hur har man löst materialparameterfrågan, dvs tillgång till data för dina beräkningar?*

Ingen data finns för värmeberäkning eller risk för sprickbildning orsakat av värmeutveckling under hårdnandet för flygaskebetong. För anläggningscement FA finns det, men inte för självkomponerat blandning. Man har utgått från befintlig data för vanligt anläggningscement. Baserat på erfarenhet så har man ändrat vissa egenskaper, bland annat följande: värmeutveckling/tidsenhet: sänkt på grund av att flygaska reducerar temperaturutvecklingen. Mognadsgradutveckling har man baserat på data från traditionell anläggningscement och beräknat temperatur som input. Betongens tryckhållfasthet har man uppskattat med mognadsgraden genom tendenskurvor. Draghållfasthet och E-modul uppskattades via betongens tryckhållfasthet där man utgick av samma konventionella sammanhang som för vanligt anläggningscement. Svårighet: osäkerheten när det gäller egenkomponerat cement med flygaska

- *Har införandet av flygaskebetong, vid projektering, påverkat kravställning gällande någon/några av följande parametrar?*

Hållfasthetsklass: Hållfasthetsklassen uppnås inte efter 28dygn, men man har märkt att det går att vänta (ca 34–35 dygn för att uppnå hållfasthetsklassen) i detta projekt.

Vct/vbt: - 0,50 max enligt exponeringsklass.

Alkalihalt: Anläggningscement med flygaska har redan låg alkalihalt. Upplevs därför inte som problematiskt.

Täckande betongskiktets tjocklek: Enligt krav/standard.

- *Anser du dig ha tillräckliga data för att kunna bestämma betongens långtidsegenskaper (krypning och krympning)?*

Nej, det finns inte. Men den totala krympningen är "mycket mindre" med flygaskebetong än med traditionell anläggningscement.

Frågor och svar, Betongleverantör

- *Vad har avsikten varit med användningen av flygaskebetong?*

Huvudmotiv till användning av flygaskebetong är - enligt respondenten - att minska kylbehov. Hållbarhetsfrågan har också varit aktuell men tillkom senare i projektet.

- *Vem (vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?*

Arbetet med flygaskebetong har initierats av entreprenören och beställaren. Respondenten berättar att entreprenören hade redan erfarenheter från Lilla Edet.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Hållbarhetsfrågan har inte varit en stor fråga då fokuset har varit kylbehovet som skulle minskas. Respondenten berättar att man hade kunnat byta ut traditionell anläggningscement mot anläggningscement FA om hållbarhetsfrågan hade varit större.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien?*

Respondenten berättade att en förstudie har gjorts i dialog med NCC. Ett riktvärde på hur låg cementshalten man velat få fanns redan från början och Dmax på 45 mm har man tagit över från tidigare projekt. Värmeutvecklingen och hållfasthetsutvecklingen har testats på labbet och även lufthaltsprovning samt frysprovning har gjorts. Frysprovningen gav goda resultat med noll avskalning. I nästa skede har arbetsbarheten testats på fabriken där man gjöt legoklossar och jämförde resultaten. I början av byggskedet gjöt man en enklare konstruktion (en platta) först för att testa det framtagna betongreceptet på plats vilket gav goda resultat. Respondenten beskrev betongen som trög med lite vatten (vbt 0,5) men god pumpbarhet. Lufthalten doserades högre med 2-3 ggr så mycket som med traditionell betong (på grund av restkolen). Det behövdes en längre blandningstid och det var inte möjligt att blanda stora satsar. Även om man hade 6 kubik kapacitet så låg gränsen på 2,5 kubik/sats. Respondenten berättar att inga problem med lufthalten under transporten och sedan på plats har observerats.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar?*

Cementhalt: Väsentligt lägre: 250 kg/m³

Vattenhalt: 150 kg/m³

Cement: Anläggningscement från Slite: 250 kg/m³. Det var det man ville ha. Tanken var att ha in så mycket flygaska som möjligt för att minska värmeutvecklingen så mycket som möjligt. Men sista gjutningarna har gjorts med anläggningscement FA och då har man minskat flygaskhalten till cirka 17 %. Anläggningscement FA: 280 kg/m³ med cirka 70 kg/m³ Flygaska.

Tillsatsmaterial: Flygaska: 125 kg/m³ (cirka 33 %) med lågt k-värde på 0,5 (i kombination med anläggningscement Slite). Cirka 70 kg/m³ (cirka 17 %) i kombination med anläggningscement FA. Flygaska blandas med anläggningscement i fabriken, men är inte finmalt. Flygaskans ursprung: Turkiet för anläggningscement FA. Respondenten visste inte var den andra flygaskan kommer ifrån, men är importerat. Respondenten berättar att man "tar det man får" och det har funkat bra. Inga skillnader upplevdes mellan olika leveranser.

Vct/vbt: 0,50.

Ballastgradering: Dmax 45 mm, ibland 32 mm beroende på armeringen och/eller vid smalare passager.

Ballast allmänt: Kubisering har varit en fråga gällande större korn. DSI-kross testades, men fick inte igenom så mycket och har inte utförts i projektet. Återanvänd betong som ballast har inte använts.

Övriga tillsatsmaterial: Inga andra har använts.

Tillsatsmedel: Luftporbildare: 2–3 ggr så mycket än med traditionell betong. Flyttillsats och retarderare under sommaren och ibland hösten.

Lufthalt: 4,5–5 %.

Leveranstemperatur: Temperaturen varierar över året men inte så att det skapar problem. Gjutningen pågick året runt.

Gjutbarhet: Upplevs bättre på grund av flygaskans kullagereffekt och fillereffekt.

Finns det nackdelar: Flygaskan som användes har lågt k-värde så att hälften bara är fillermaterial.

Hållfasthetsutveckling (28d): Respondenten berättade att de fick relativt bra värden. Efter 56d var hållfastheten högre än med traditionell betong. Inga problem med hållfastheten upplevdes.

Har man upplevt svårigheter/utmaningar: Man skulle kunna minska vattenhalten även utan flygaska. Det är kanske inte enbart flygaskans förtjänst att man fått ner värmeutvecklingen. Även en minskad cementhalt hade kunnat ge effekt.

- *Har man behövt justera blandningstid/-sekvenser (för att bl.a. säkerställa jämn och tillräcklig lufthalt i betong)?*

"Man blandar framförallt längre tid."

- *Har justeringar gjorts avseende betongens gjuttemperatur?*

Inga justeringar avseende betongens gjuttemperatur har gjorts. Man vill helst ha så kall betong som möjligt.

- *Vilka krav ställs (utöver de "normala")? Sättnmätt?*

Betongen upplevdes som seg och krypande.

- *Hur har man kommit fram till mängd luft som ska blandas in? Har man nått kravställd lufthalt? Har andra provningar ersatt lufthaltsprovning?*

Exponeringsklassen (XF3), alltså min 4 %. Lufthalten enligt standardkrav. Frysprovningsen har utförts (i sötvatten) där man hade 0 avskalning.

- *Har betongen haft jämn lufthalt eller stora variationer? Kan det isf härledas till typ av FA, leverantör eller annat?*

Nej.

- *Har några provningar utförts avseende lufthalten i den hårdnade betongen?*

Nej, får kolla upp.

- *Hur hanteras beständighetsfrågor såsom vattentäthet, sprickbildning, erosion i vattenlinjen, urlakning, frostangrepp, ASR och försenad ettringitbildning? Har flygaskebetongen någon inverkan på dessa parametrar?*

En hållfasthet av C37 bedömdes som tillräckligt och kravet uppfylldes. Inga tester – utöver hållfasthetsutveckling, värmeutveckling och frysprovning – gjordes. Beställaren har erfarenheter av betong med hög andel puzzolaner som har ”funkat bra”. Erfarenheter som delades från Lilla Edet har gjort att man inte har haft så höga krav här. Beställaren och entreprenören från Lilla Edet har varit öppna och delat mig sig av sina erfarenheter vilket har skapat en trygghet.

- *Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?*

Betongen har tillverkats i fabriken.

- *Har ni levererat bruk/betong som är avsett för injekteringsbetong? Dvs har ni på något sätt varit inblandade i denna typ av process?*

Nej.

- *Har ni sett några skillnader mellan säsonger - gällande utförande, recept, temp på levererad betong? Har ni på något sätt anpassat betongen utifrån säsong?*

Nej, inget som skiljer sig från traditionell betong. Även i vanliga fall transport-retarderare.

- *Vid vintergjutning - är gränsen fortfarande 5 MPa innan betongen får frysa? Och anser man att gränsen är tillräcklig för att förebygga skador p.g.a. tidig frysning?*

Ja, samma. Värmer ibland motgjutningsytor. Inga UV-gjutningar.

- *Långtidsbeständighet?*

Inga tester är planerade.

RENGÅRD

Frågor och svar, Beställare

- *Hur har projektet initierats? Av vem?*

Hela projektet bestämdes i tidigt skede skulle vara i samverkan. Skanska/Vattenfall byggt Skellefteå Kraft:s anläggningar som man har köpt upp. G2 är första konstruktionen man bygger i egen regi. Eftersom det fanns lite erfarenhet i branschen, var det önskvärt med ett samverkansprojekt. Under samverkanstiden (tidigt) kom det förslag från entreprenören (NCC), som då jobbade med Lilla Edet, om att blanda in flygaska för att få ner brinntiden.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Det var främst en fråga om arbetsmiljö: "väldigt gissel med kylslangar etc kylar kan klämmas, sen ska de blåsas rent och sjutas igen". Så minskad värmeutveckling snarare varit orsaken. Marginellt dyrare betong (i förhållande till kostnader för kylslangar etc mycket billigare). Minskad klimatpåverkan med 1320 ton CO₂ mindre än jämfört med traditionell betong (för detta projekt), så man har haft en stor miljövinst, även om det inte var målet. Man hade inga silos för flygaska.

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong?*

Det var främst en arbetsmiljöfråga. Sedan att minska kylbehov för att minska risk för sprickbildning.

- *Hur delaktiga har ni varit i utvecklingen av flygaskebetongen (recept mm)?*

Det har man överlåtit till entreprenören och betongleverantören, men vi har varit med på redovisningen av provningarna och jämfört dessa mot ställda krav, vilka har modifierats under projektets gång (avsteg främst gällande tryckhållfasthet vid 28d)

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier?*

Ja, vi hade ett 1 års utvecklingsprojekt tillsammans med betongleverantören. Provningar med olika blandningar utfördes. Vi såg att i Lilla Edet användes 50% flygaska, men i Rengård blev betongen bara grå smet och vi insåg att det var på grund av att man även hade anläggningscement FA (dvs för mycket flygaska).

- *Vad har ingått i förstudien?*

Lufthalt och hållfasthetsutveckling, men även temperaturutveckling. Man gjöt konstruktionsdelar av mindre betydelse först (gällande bärförmåga och beständighet).

- *Vem har initierat förstudien?*

Samverkan, men drevs av NCC och Byggbetong (på NCC:s initiativ).

- *Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?*

Lufthalt, tryckhållfasthet och temperaturutveckling. När man inte lyckades få kravställd lufthalt beslutades att beständighet skulle provas genom frostprovning.

Konsulten var konservativ. Till att börja med provades 3 provkroppar per gjutning, men sedan togs ny provning- och kontrollplan fram och det beslutades att antalet provkroppar skulle relateras till mängden betong (mindre gjutningar = färre prover, större gjutningar = fler prover).

Utvecklingen pågick under hela projektet.

Inledningsvis hade vi tryckhållfasthetskrav vid 28d, men mätte även 56d och 90d. När man upptäckte att tryckhållfastheten vid 28d ej uppnåddes, fick man ompröva kraven. Riktvärden vid 56 och 90d överskreds dock.

Tornkranfundament var den första konstruktionen som gjöts fullskaligt (provgjutningar hade gjorts tidigare), borrkärnor skickades på tryckprov och värmeregisttermätningar utfördes (som gav bra resultat). Värdena av första provtryck var precis på eller något under kravkurvan, men efter 56d var värdena en bra del över och efter 90d "våldigt bra!". Nästa steg var en motgjutning berg på pelarfundament bjälklag för åtkomst till arbetsplatsen (tjock gjutning mot berg) därman fick samma resultat (efter skruvat på receptet avseende bland annat luftporbildare var pumpbarhet bättre). Vi tog ett snabbt beslut där vi frångick SIS-norm gällande tryckhållfasthet vid 28d, men entreprenören garanterade funktionskrav och livslängden på 100 år. Krav på tryckhållfasthet vid 90d kvarstår.

➤ *Hade man önskat fler förprovningar eller var detta ett bra arbetssätt?*

Problematiken med studier i förväg är att man får olika svar, men de motsvarar inte verkligheten. Förprovningen var bra och vi fick känsla för vad som skulle ske i fält. Men först med rätt sorts pumpbil fick man verkligt resultat (prover på betongstation ger inte samma utväxling). En gjutning på 400–450 kubik och med "rätt" tjocklek gav definitiva resultat.

➤ *Vilka risker kalkylerar ni med i den här typen av projekt?*

- I. Åldersbeständigheten var en stor fråga och en riskbedömning gjordes. Vad kan vi göra för efteråtgärder om betongen inte skulle hålla måttet; ev inkapsling om man skulle få frostsprängning med lining. (Det handlar om ett kraftverk och inte en damm med dämmande funktion. Det hade vi kanske inte vågat göra med till exempel utskovsdammen och det är oklart om man skulle våga utan mer försök, framförallt utökade frostprovningar.
- II. Konsulten var väldigt konservativ, men avrådde inte från avsteg, utan accepterade luftavsteg, men föreskrev kontroll och provningsplan.
- III. NCC såg arbetsmiljöfördelar, större gjutetapper, mindre gjutfogar, mer effektivt arbetssätt.
- IV. Betongleverantören såg möjligheterna, även om man inte hade erfarenheten. De fick dock köpa in en ny silo för flygaska.
- V. Man har gjutit in ingjutningsrör i vissa konstruktionsdelar, men värmeutvecklingen och sprickbildningen blev inte så "illa" som beräkningsprogrammen har indikerat, och rören behövdes inte.

➤ *Typ av entreprenadform?*

Samverkansprojekt.

- *Följer man konstruktionernas utveckling? Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten?*

Man har gjort en okulär kontroll och tagit betongkärnor för att kunna prova tryckhållfasthet och lufthalten över tid (som var del av provningsprogrammet).

- *Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar?*

Nej. Endast en okulär kontroll. Det fanns lite ytsprickor, men dessa försvann vid slipning och aldrig till armering (50–70 mm täckande betongskikt).

- *Konstruktionsdelar?*

Ett kraftverk där man använde totalt 9000 kubikmeter (i alla konstruktionsdelar). Inga dämmande konstruktioner, skibord eller motsvarande.

- *Dimensioner?*

Både tunna och grova konstruktioner, 9000 kubikmeter.

- *Har ni upplevt skillnader mellan olika anläggningsdelar (t.ex. skillnader tunna/grova konstruktioner)?*

Nej, det var samma över hela anläggningen. Inga skillnader mot traditionell betong. Men mellan gjutetapperna fick vi färre sårytor än med traditionell betong. Stödmuren körde man med traditionell betong och där har toppen skummat, så man har fått bila ner toppen.

- *Hur har arbetssätt/recept justerats? Kan vi få tillgång till ev. TB/kravställning?*

Tillsatsmaterial: flygaska men det var oklart hur mycket: från början var det totalt 50 % exkl. Anläggningscement FA, sedan drog man ner det till totalt 33–40%. Man använde Anläggningscement FA (med 12–15 % flygaska i cementet). Dmax var generellt 45 mm och 32 mm i vissa delar där armeringen sitter tät. Man har inte använt luftporbildare. Vår kontrollplan omfattade frostprovar och tryckprovar ur alla gjutningar (3st/gjutning från början, men övergick sedan till färre antal på mindre gjutningar och fler på större gjutningar).

- *Vilken påverkan har receptoptimeringarna haft på utförandet? Kostnader, tid, arbetsmoment?*

Framförallt förbättrad arbetsmiljö, mer effektivt, större gjutetapper, färre (längre mellan) gjutfogar, på grund av minskad kylbehov. Betongen är inte så mycket dyrare än traditionell betong, men framförallt har man vunnit tid varför projektet blivit billigare – mindre armering, mindre formbyggnad, färre kylrör...

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen? Tex separation, konsistensproblem, sprickbildning (sätt-, krymp, temperatursprickor eller krackelering)? Sprickor efter att betongen hårdnat? Tex problem med luftporsystemet/lufthalten (har luftporsystemet blivit som förväntat avseende lufthalt/antal luftporer/utformning av luftporer)?*

Nej. En erfarenhet som förbryllar: emellanåt har man fått slipa betongen för att kunna måla på invändiga ytor, på grund av att man hade ett träludd som kvarstår med brädform och formolja (troligen på grund av en bättre vidhäftning samt att anläggningcement FA är så finkornig att den tränger in mer i träet). Det är ej heller bra att lämna organiska material, men det blev ok med plywood.

Frågor och svar, Entreprenör

- *Vem (dvs. vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?*

Erfarenheter från utomlands visade att betongen med flygaska ger bättre värmeutveckling med mindre sprickrisk (ca. 30 år sedan). Vi var involverade i 3 vattenkraftsprojekt (Lilla Edet, Rengård, Forshuvudforsen) där vi kunde utnyttja erfarenheterna. Vi hade hjälp av kunniga konsulter (Norconsult) med erfarenheter. Betongtillverkaren av Rengård hade ingen erfarenhet med flygaskebetong, men fick en erfarenhetsåterföring från Lilla Edet och Forshuvudforsen.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Hållbarheten var en följd effekt men inte huvudmålet.

- *Vad har varit syftet med användningen av flygaskebetong? Beskriv möjligheter/svårigheter att med flygaska optimera både värmeutveckling och betongens klimatpåverkan.*

Huvudmålet var att minska kylbehov, minska sprickbildning/värmeutveckling, minska tidsinsats, förbättra arbetsmiljö och önskan att kunna gjuta i större etapper. Betongens klimatpåverkan var inte huvudmålet.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien? Vilka frågor har man ställt och velat få svar på?*

Ja, förstudier genomfördes hos betongtillverkaren (man har gjutit balkar). Inom projektet så började man med konstruktioner med mindre krav (med hänsyn till laster och beständighet), till exempel ett kranfundament på berg. Samt konstruktioner under vatten (inga krav på frostbeständighet).

- *Har man följt resultaten från förstudien eller har man varit tvungen att justera tex recept pga uppskalningen? Blev verkligheten som man förväntade sig? Hur har uppföljningen sett ut?*

Utveckling av betongreceptet pågick under inledande andelen av projektet. Genom att först gjuta de mindre kravställda delarna så förändrade man betongreceptet med olika avseendet bland annat övergav man luftinblandningen. Luftinblandning för frostbeständighet var svårt att uppfylla, men betongen godkändes via frostprovning. Kraven på 28d hållfasthet uppfyllades inte vid 28d. Provningar visade att betongen har uppnått kraven på 28d hållfasthet efter 56d (ingen provning gjordes mellan 28-56d).

- *Följer man konstruktionernas utveckling? Med syfte att bedöma om de antaganden man gjort faktiskt stämmer med verkligheten?*

Proverna har tagits i samband med konstruktion och betongtillverkaren har avsikt att följa utvecklingen.

- *Gör man t.ex. några kontrollmätningar i fält för att säkerställa att resultaten överensstämmer med utförda beräkningar? Ge exempel! Vad mäter man (temperatur på levererad betong, lufthalt på färsk betong, lufthalt på den hårdnade betongen, tryckhållfasthet på färdig konstruktion (utborrade kärnor), sprickor (kartläggning i fält), frostbeständighetsprover på färdig konstruktion?*

- I. Mätningar av lufthalt där kraven inte uppfylldes. Resultaten var alltid osäker.
- II. Uppföljning av tryckhållfastheten som inte har uppnåtts efter 28d.
- III. Uppföljning av värmeutvecklingen under gjutningen av kranfundamentet.

➤ *Hur har receptjusteringarna påverkat projektet i stort?*

Bra ytor, bättre arbetbarhet, betongen omsluter armeringen bättre. Enligt respondenten har receptet och receptjusteringar under konstruktionen fungerat bra.

➤ *Konstruktionsdelar?*

Alla delar av konstruktionen, i alla dimensioner (inga detalj om storlek) och allt med flygaskebetong. Som exempel; kranfundament 16 m² yta och 1,40 m tjock.

➤ *Hur skiljer sig er flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementshalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur? Annat?*

- I. Grövre ballast, anläggningscement FA + flygaska (40 % total flygaska).
- II. Dmax > 40mm
- III. Vbt: 0,50
- IV. Ingen luftporbildare

➤ *Vilka krav ställs (utöver de "normala")?*

Inga specifika krav – minska temperaturen vid hårdnandet är huvudkraven.

➤ *Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?*

På plats.

➤ *Är FA inmalld (fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?*

Allt är insatt (Anläggningscement FA + flygaska)

➤ *Var kommer FA från? Vad har man för krav på FA?*

Man köpte flygaska från Heidelberg Materials.

➤ *Hur många % av bindemedlet har man ersatt med FA? Och hur mycket FA har man totalt i betongen?*

Anläggningscement FA + flygaska; totala halten flygaska var 40 %.

➤ *Frostbeständighet? Hur har man kommit fram till mängd luft som ska blandas in? Har man fått kravställd lufthalt? Har andra provningar ersatt lufthaltsprovning?*

Man har misslyckat med att uppfylla standardens krav för lufthalt.

- *Hur har det färska tillståndet påverkats avseende: Arbetbarhet? Reologi, pumpbarhet, vibreringsbehov (och ev. återvibrering)? Benägenhet till separation? Betongmassans stabilitet? Sättningar i betongmassan? Plastisk krympning?*

Jämfört med vanligt traditionell anläggningscement har man inte märkt några negativa egenskaper, men en förbättring av ovan stående.

- *Hur har det hårdnande tillståndet påverkats avseende:*

Värmeutveckling (inkluderat inverkan av initial och lufttemperatur)? - I kranfundamentet har man mätt 30 grader höjning.

Autogen krympning? - Har mindre betydelse eftersom vbt är högre i detta projekt.

Kylning med eller utan ingjutna kylrör? Kylbehov i jämförelse med traditionell vattenbyggnadsbetong? – Fanns inget behov av kylning, men på vissa tjocka delar så skulle de ha haft en kylning enligt beräkning, men man valde att utföra gjutningen utan kylning. Inspektionerna efter hårdnande har inte uppvisat någon sprickbildning än så länge.

Härdningsförhållanden och behov av vattenhärdning/ täckning? – Utförd enligt TB.

- *Hur har det hårdnade tillståndet påverkats avseende:*

Mognadsgrads-/hållfasthetsutveckling (tendenskurvor)? - Långsammare än med traditionell anläggningscement.

Reaktionsprodukter och pH-värde? – Vet inte.

Formsläpp? - Ingen skillnad.

Inverkan av formytans egenskaper? - Ingen skillnad

Metoder och tillvägagångssätt vid ytbehandling? – Samma som med traditionell betong.

Behov av vattenhärdning och täckning efter avformning? - Ingen skillnad

Risk för hängning i formar och armering? – Upplevdes som bättre än med traditionell betong.

- *Hur har projektet inverkat på gjutfogar och gjutetapper?*

Det var möjligt att ha större etapper och mindre gjutfogar.

- *Har ni upplevt problem/svårigheter eller skador under/efter gjutningen?*

Nej, inga problem eller skador.

Frågor och svar, Konsult

- *Vem har initierat användningen av flygaskebetong i projektet?*

Samverkansprojekt i vilket man tog upp detta – att testa flygaskebetong - på ett av de första mötena. NCC varit mest drivande.

➤ *Hur har det påverkat projektet i stort?*

I stort: god kvalitet efter gjutningar, har varit väldigt lyckat med fina betongytor, endast små skador och knappt synbara sprickor. Det fanns endast ett ormbo (större hålrum mellan form och armering) i spiralväggen (troligen på grund av dålig vibrering i en gjutetapp på 1000 m³). Man slapp all kylning i Rengård (Bättre arbetsmiljö, minskade kostnader)! (Erfarenhet från Norge: har aldrig sett någon större sprickbildning med flygaskebetong, trots att man inte har kylning.)

➤ *Konstruktionsdelar?*

Hela kraftstationen, inklusive bergschakt (ej installationer av turbiner, generatorer).

➤ *Dimensioner?*

Tjockleken har varierat från 0,3-3m. I tunna väggar har man använt traditionell anläggningscement på grund av Dmax. 32mm ballast funkar ej i dessa konstruktioner.

➤ *Hur hanteras/beskrivs krav i nämnda anläggningar? Funktionskrav eller specificerad materialsammansättning? Hur hanteras normer, standarder och AMA?*

Man har följt AMA Anläggning, men lagt till RIDAS-krav. Krav:

Känner du till vilka receptjusteringar/justeringar av arbetssätt som gjorts? Kan du beskriva dem? Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementshalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leveranstemperatur?

Nej. Krav på lufthalt var 3,5–7 %. Minns ej att man gjorde avsteg, men dessa konstruktioner upplever aldrig frost, så frost är ett litet bekymmer inne i anläggningen (främst betong i vattenvägen och inne i berget).

Täckskikten har anpassats efter stenstorleken enligt RIDAS med Dmax 45 mm.

K-faktor på flygaska var låg (0,4).

Karbonatisering är ett litet bekymmer på grund av att betongen är tät.

Rek gjutningar under olika säsonger? - Enligt AMA anläggning.

➤ *Har utförandet underlättats i jämförelse med traditionell betong? Om ja – hur?*

Praktiskt: det fanns en diskussion om att pumpa med 45 mm sten, men det har fungerat utmärkt. Ytfinish har förbättrats (oklart om på grund av utförande eller betongen). Pumpningen har funkade bra. Vi har inte hört att något skulle ha varit besvärligt, hellre tvärtom: arbetsmiljön har förbättrats och det blev mindre kostnader på grund av minskat kylbehov.

- *Vad var din första inställning till betongen?*

Applåd att det äntligen kommer till användning och att någon tar chansen.

- *Hur har man löst materialparameterfrågan, dvs tillgång till data för dina beräkningar?*

Erfarenheter från Norge gav mycket bra stöd. För beräkningarna har man använt parametrar för vanlig betong. Man skulle vilja följa upp att man tar med tempotvecklingen i den här typen av betong för kommande beräkningar.

I Norge tar beräkningarna inte hänsyn till om det är flygaskebetong eller inte vid dimensioneringen. Sprickviddskrav finns endast ibland (anges i Statens vägvesen, hänvisar till dessa). Sprickviddskrav om 75% av draghållfastheten inom vattenkraft.

- *Har införandet av flygaskebetong, vid projektering, påverkat kravställning gällande någon/några av följande parametrar?*

Vid dimensioneringen har man utgått från traditionell betong.

Hållfasthetsklass – Nej, man har gått på RIDAS och vi tror att man har uppfyllt kraven, men det är en NCC-fråga. Ingen konstruktion är utsatt till belastning vid 28d, så det var ok att den uppfyller kraven vid 56d.

Vct – Samma som i traditionell betong.

Alkalihalt – Vanlig procedur, samma som i traditionell betong.

Täckande betongskiktets tjocklek – enligt Ridass?

Relevanta temperaturutvecklingsberäkningar – NCC har utfört beräkningarna. Om man gör det själv ska värmeutveckling, hållfastheten (tryck och drag) mätas i testbetong och sedan användas för dessa beräkningar.

Relevanta mognadsgradsutvecklingsberäkningar – NCC har utfört dessa. Vi har gjort det ibland själva, och då har vi tagit hjälp av erfarenheterna från Norge.

- *Anser du dig ha tillräckliga data för att kunna bestämma betongens långtidsegenskaper (krypning och krympning)?*

Ja, vi har mycket forskning på det i Norge och rapporter som är tillgängliga för allmänheten. Data från flygaskebetong, traditionell betong och FA-cement är tillgänglig. Samma för slaggcement. Det finns flera COIN-FOU-projekt som beskriver denna hantering, och även Statens vägvesen har rapporter/data för detta, se länkar nedan:

<https://www.sintef.no/en/projects/2007/coin/coinp/>

https://bibsyst-primo-sb.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/search?query=any,contains,flygaske&tab=default_tab&search_scope=default_scope&vid=VEGDIR&facet=topic,include,Statens%20vegvesen%20Vegdirektoratet&offset=0

- *Läget i Norge för framtiden?*

Kalcinerad lera forskas det på, men det ligger troligen några år framåt. Flygaska importeras främst från Tyskland och Nederländerna, även Polen och Turkiet. I perioder är det svårt att få tillräckliga mängder flygaska. Marknaden i Norge vill ha flygaska i alla konstruktioner idag på grund av minskade CO₂-utsläpp. Kanske att behovet minskar när CCS-fabriken kommer igång (40–50% planeras infångas).

Frågor och svar, Betongleverantör

- *Vad har avsikten varit med användningen av flygaskebetong?*

Huvudmålet var att minska kylbehovet (främst ekonomiska skäl), vilket var initierat av entreprenören.

- *Hur har receptjusteringarna påverkat projektet?*

Inte mycket – det fanns erfarenheter från tidigare projekt (på 70/80 talet) annars var det ett nytt koncept.

- *Vem (vilken organisation) har initierat arbetet med flygaskebetong?*

Entreprenören.

- *I vilket skede har hållbarhetsfrågorna aktualiserats?*

Inte initialt.

- *Har arbetet föregåtts av någon/några förstudier? Vad har ingått i förstudien? Vem har initierat förstudien?*

Ja, reologi, gjutbarhet, pumpbarhet och temperaturutveckling har testats. Temperaturutvecklingen jämfördes med konventionell betong. Man hade ett sättmått på 160–210 mm. Vi hade svårt att uppnå önskat hållfasthet på grund av lufthalten och har istället testat betongen för frostbeständighet genom frysprvning - med godkända resultat. I och med detta godkände beställaren att man frångår standarden med hänsyn till krav på lufthalt.

- *Hur skiljer sig flygaskebetongen i detta projekt mot traditionella blandningar? Cementshalt, Halt flygaska, vct, ballastgradering, dmax, tillsatsmaterial, -medel, mm? Och hur har detta påverkat armering, täckande betongskikt, Lufthalt, leverans-temperatur?*

Dmax 45mm

Flyttillsats och luftporbildare i början.

Ingen receptjustering gjordes med hänsyn till trånga sektioner istället hade man en dialog med konsulterna för att ändra designen så att samma recept skulle kunna fungera.

Leverans-temperatur: 15 grader (som vanligt för betongleverantören).

- *Har ni upplevt att olika cementsorter inverkar på värmeutvecklingen? Och betongens klimatpåverkan?*

Vi fick olika värmeutveckling med olika typ av bindemedel. Klimatfrågan var inte huvudmålet.

Beskriv behovet av luftporbildare i er betong

Det var svårt att uppnå hållfasthetsnivå därför finns ingen luftporbildare i konceptbetongen.

- *Beskriv behovet av exempelvis superplasticerare, retarderare och acceleratorer för att styra temperaturutvecklingen.*

Vi har inte sett behovet av dessa i detta projekt.

- *Vilka justeringar av ballastgradering och Dmax görs för att minska värmeutvecklingen respektive betongens klimatpåverkan?*

Dmax 45 mm för att minska bindemedelsbehovet och det för att minska temperaturutvecklingen.

- *Kravställs ballasten på samma sätt eller gör man några avsteg alt kravskärpningar?*

Det var ingen systematisk konceptutveckling; Vi har inte funderat över det förutom temperaturutvecklingen/dmax/reologi.

- *Har återanvänd betong använts som ballast i någon av projekten? Hur ställer man sig till detta?*

Nej

- *Används Anläggningscement FA eller trad. Anläggningscement? CEM I, II eller III? Om trad. Anläggningscement - var kommer den från (Brevik/Sverige)?*

Anläggningscement FA + ytterligare flygaska.

- *Är FA inmalad (i fabriken)? Eller har man tillsatt FA i efterhand?*

Flygaska har tillsatts tillsammans med cementet.

- *Hur många % bindemedel har man ersatt med FA? Och hur mycket FA har man totalt i betongen? Har ni ändrat den totala bindemedelshalten? Och har vbt förändrats (hur mkt vatten har använts)?*

Betongleverantören valde att inte svara på den fråga.

- *Var kommer FA från? Vad har man för krav på FA?*

Från Heidelberg Materials.

- Har man behövt justera blandningstid/-sekvenser (för att bl.a. säkerställa jämn och tillräcklig lufthalt i betong)?*

Nej.

Har justeringar gjorts avseende betongens gjuttemperatur?

Nej.

- *Vilka krav ställs (utöver de "normala")?*

Inga specifika krav, däremot har man frångått från krav angående 28d hållfasthet och lufthalten.

- *Har några provningar utförts avseende lufthalten i den hårdnade betongen? Överensstämmer denna med uppmätt lufthalt i den färska betongen? Efterfrågas denna typ av provning?*

Nej, det har man inte testat. Men man har kollat lufthalt innan/efter transport.

- *Hur hanteras beständighetsfrågor såsom vattentäthet, sprickbildning, erosion i vattenlinjen, urlakning, frostangrepp, ASR och försenad ettringitbildning? Har flygaskebetongen någon inverkan på dessa parametrar?*

Vi har inte testat något av dessa.

- *Har betongen tillverkats i fabrik eller på plats?*

I fabrik.

- *Har ni levererat bruk/betong som är avsett för injekteringsbetong? Dvs har ni på något sätt varit inblandade i denna typ av process?*

Nej.

- *Har ni sett några skillnader mellan säsonger - gällande utförande, recept, temp på levererad betong? Har ni på något sätt anpassat betongen utifrån säsong?*

Nej – vi gjorde på vårt vanliga sätt (entreprenör vidtar nödvändiga åtgärder skulle de behövas).

- *Vid vintergjutning - är gränsen fortfarande 5 MPa innan betongen får frysa? Och anser man att gränsen är tillräcklig för att förebygga skador p.g.a. tidig frysning?*

Man utgår från samma samband som med konventionell betong.

ERFARENHETER AV FLYGASKEBETONG

För att minska koldioxidutsläppen vid tillverkning av cement så kan cementklinker ersättas till viss del med flygaska, vilket introducerades till vattenkraftens betongkonstruktioner på 2010-talet. För att kunna tillmötesgå behovet av reducerad värmeutveckling, så har flygaska på senare år tillförts i betongens beredning, snarare än i cementets tillverkning. Det har skett i renoveringar och ombyggnationer av kraftstationer och dammar, bl.a Lilla Edet, Forshuvudforsen samt Rengård. Dokumentationer av flygaskebetongens prestation vid laboratorie- samt praktiska erfarenheter i fält kan därmed spridas. Projektet "Erfarenheter flygaskebetong" har syftat till att sammanställa denna dokumentation och sprida kunskap och erfarenheter från de olika projekten. Fokus har lagts på att återge praktiska erfarenheter från gjutning och efterbehandling av betongen.

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.



Energiforsk