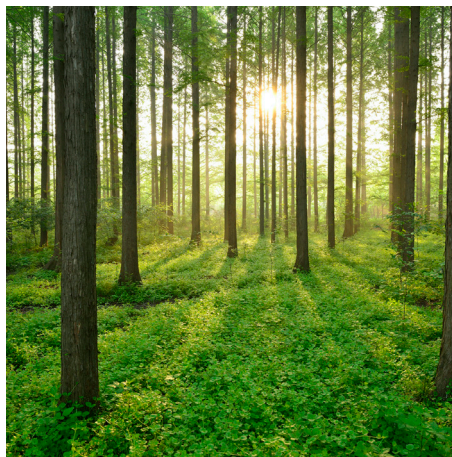


NYA BINDEMEDEL TILL BETONG FÖR VATTENKRAFTSANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2025:1073



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Nya bindemedel till betong för vattenkraftsanläggningar

KATARINA MALAGA OCH ELISABETH HELSING

ISBN 978-91-89919-73-0 | © Energiforsk januari 2025

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

Förord

Betongkonstruktioner för vattenkraftverk har ofta större dimensioner än andra infrastrukturprojekt. Vid gjutning av dessa grova konstruktioner är en av de viktigaste parametrarna låg värmeutveckling, för att undvika att sprickor bildas i ett tidigt skede. Detta ställer krav på det vattenbyggnadscement som används i dessa konstruktioner och med högre krav på miljövänliga bindemedel, med lägre CO₂-utsläpp, som måste kunskapen höjas kring vilka bindemedel som säkrar betongkonstruktionernas beständighet.

Det genomförs många olika analyser av inblandning av olika bindemedel i vattenbyggnadsbetong. Flygaska, granulerad masugnsslagg, kalcinerade leror och belit-rika cementsorter är ett urval. I projektet "Bindemedel i framtidens vattenbyggnadsbetong" så har både egenskaper för betongkonstruktioner och de för framtiden aktuella bindemedel som finns både i Sverige och globalt, undersökts för att resultera förslag på utvecklingsaktiviteter på kommande forskningsområden inom betong för vattenbyggnadssyften.

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

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

Sammanfattning

Denna rapport är en analys av möjligheter, utmaningar och behovet av utveckling när det gäller användning av godkända och potentiella alternativa bindemedel i betong för vattenkraftsanläggningar.

Portlandcement och alternativa bindemedel används för att producera betong för olika typer av konstruktioner som ska hålla god kvalitet under en lång tid. Under det senaste decenniet har utveckling och användning av alternativa bindemedel ökat i Sverige och i övriga världen. Det finns ett antal godkända och beprövade alternativa bindemedel som mald granulerad masugnsslagg (GGBS), flygaska och silikastoft som kan användas i vattenbyggnadskonstruktioner. Nya alternativa bindemedel utvecklas och kommer att introduceras på marknaden inom de närmaste åren. Den största drivkraften för utvecklingen har varit behovet av att minska klimatavtrycket hos betong genom ersättning av delar av portlandcementklinkern i betongen med alternativa bindemedel. Forskning, utveckling, verifiering och certifiering beskriver olika steg innan en tillämpning av nya material kan ske på bred front. Förutsättningar och krav som betong med alternativa bindemedel måste uppfylla för att kunna användas för vattenbyggnadskonstruktioner är beroende av flera faktorer:

- kunskap och osäkerheter när det gäller materialens inverkan på betongegenskaperna i relation till den avsedda miljön,
- möjlig ersättningsnivå,
- tillgänglighet på materialen och
- direkta eller indirekta kostnader förknippade med deras användning.

Ett antal nya alternativa bindemedel och tillsatsmaterial som naturliga och kalcinerade naturliga puzzolaner kommer med stor sannolikhet att inkluderas i den svenska betongstandarden SS 137003 under 2025 vilket öppnar för fler möjligheter, men också för fler frågor om deras inverkan på betongens prestanda och beständighet. Erfarenheter kring långtidsegenskaper av kalcinerade leror, vulkanisk aska, sedimentära avlagringar med puzzolana egenskaper i ett nordiskt klimat är fortfarande mycket begränsad.

Det behövs mer forskning kring användning av dessa nya material som alternativt bindemedel och tillsatsmaterial i vattenkraftens grova konstruktioner som utsätts för vatten, frost och andra påfrestningar i vattenkraftsmiljön. Då dessa material finns tillgängliga idag genom import och potentiellt kan komma att bli tillgängliga genom svensk produktion, bör denna forskning ha hög prioritet.

Nyckelord

Portlandcement, alternativa bindemedel, masugnsslagg, GGBS, flygaska, FA, puzzolaner, betong, beständighet

Summary

This report is an analysis of challenges, opportunities and the need for development regarding the use of approved and potential alternative binders in concrete structures for hydroelectric power production.

Portland cement and alternative binders are used to produce concrete for various types of structures that must maintain good quality for a long time. Over the past decade, the development and use of alternative binders has increased in Sweden and in the rest of the world. There are several approved and proven alternative binders such as ground granulated blast furnace slag (GGBS), fly ash and silica fume that can be used in hydroelectric power plants. New binders are being developed and will be introduced to the market within the next few years. The main driver of the development has been the need to reduce the climate footprint of concrete by replacing parts of the Portland cement with materials with lower carbon footprint. Research, development, verification and certification describe different steps before the application of new materials can take place on a broad front. The prerequisites and requirements that concrete with alternative binders must meet in order to be used in hydroelectric power plants depend on several factors:

- knowledge and uncertainties regarding the impact of materials on concrete properties in relation to the planned environment,
- the possible replacement level of the binder,
- availability of the materials, and
- direct or indirect costs associated with their use.

Several new alternative binders and additives such as natural and calcined natural pozzolans will most likely be included in SS 137003 in 2025, opening up for more possibilities, but also creating more questions about their impact on performance and durability. Experience on long-term properties of calcined clays, volcanic ash, sedimentary deposits with pozzolana properties in a Nordic climate is still very limited. More research is needed on the use of these materials as alternative binders and additions in large hydraulic structures that are exposed to water, frost and other loads from the hydro power environment. As these materials are available today through import and can potentially become available through Swedish production, this research should have a high priority.

Innehåll

1	Inledning	10
1.1	Bakgrund	10
1.2	Syfte	11
1.3	Avgränsningar	12
2	Viktiga egenskaper hos betong för vattenkraftsanläggningar	13
3	Alternativa bindemedel	16
3.1	Allmänt	16
3.2	Standardiserade alternativa bindemedel	18
3.2.1	Mald granulerad masugnsslagg (GGBS)	18
3.2.2	Kiselrik flygaska (från kolkraftverk)	20
3.2.3	Silikastoft	21
3.2.4	Silikakalciumstoft	22
3.2.5	Kalkrik flygaska	22
3.2.6	Naturliga och kalcinerade puzzolaner	23
3.2.7	Bränd skiffer	24
3.2.8	Kalksten	24
3.2.9	Specialcement	25
3.3	Nya bindemedel	26
3.3.1	Mekaniskt aktiverade naturliga puzzolaner	26
3.3.2	Restprodukter från produktion av metaller	26
3.3.3	Finmaterial från återvunna byggmaterial	27
3.4	Framtida bindemedel	28
3.4.1	Askor från förbränning av biomassa	28
3.4.2	Bottenaska och flygaska från förbränning av avfall	29
3.4.3	Filler av bergmaterial	30
3.4.4	Gruvavfall	30
3.5	Jämförelse av alternativa bindemedel	30
3.5.1	Påverkan på betongens egenskaper	30
3.5.2	Hur kan en eventuell negativ påverkan kompenseras	32
3.5.3	Mognadsgrad – tekniskt, regeltekniskt och kommersiellt	34
3.5.4	Potentiell ersättningsgrad, tillgänglighet, pris	36
3.5.5	Klimatavtryck	38
4	Användning av alternativa bindemedel i vattenkraftanläggningar	40
4.1	Kort historik om regler och användning av alternativa bindemedel i Sverige	40
4.2	Gällande och framtida regler i Sverige och vissa andra europeiska länder	41
4.3	Krav på certifiering	45
4.4	Praxis	47
4.4.1	I Sverige	47

4.4.2	I Norden	48
4.4.3	I övriga Europa	49
4.4.4	I Nordamerika	49
4.4.5	I Asien	50
5	Diskussion	52
6	Slutsatser	56
7	Behov för vidare utveckling	61
8	Referenslista	62
8.1	Litteraturhänvisningar	62
8.2	Refererade standarder	63

1 Inledning

Det finns en lång erfarenhet av att använda alternativa bindemedel och tillsats-material för att helt eller delvis ersätta portlandcement i betong för vattenkrafts-anläggningar i flera europeiska länder samt i Nordamerika. I Sverige har det funnits några perioder då masugnsslagg använts men dåtidens kunskap om detta material gav inte ett acceptabelt resultat, vilket ledde till att vidare utveckling av området samt användning av slagg i betong upphörde och inte kom tillbaka i Sverige förrän på 2000-talet. Däremot har utveckling och användning av masugnsslagg i betong fortsatt i andra länder (Nederländerna, Storbritannien, Belgien, Canada). Det finns flera verifierade och väl underbyggda studier om flygaska och masugnsslagg i betong för vattenkraftsanläggningar. Det svenska regelverket har också förändrats och anpassats till den nya kunskapen samt till de alltmer skärpta klimatkraven, som förutsätter att andelen portlandcement i betong minimeras för att minska betongens klimatavtryck. Som det har noterats i [1] och [2] råder det redan brist på flygaska från stenkolsförbränning och masugnsslagg inom EU. Behovet av andra alternativa bindemedel är stort och kommer att bli ännu större då de fria utsläppsrättigheterna förvinns kring 2030. Som ett resultat av det kommer även priset på såväl rena portlandcement som alternativa bindemedel att ökas.

Läsanvisning: Litteraturhänvisningar i denna rapport är markerade med författare och årtal med fullständig referens i referenslistan i avsnitt 8.1. För publicerade standarder anges i texten enbart beteckningen. Fullständig referens, inklusive utgåva och årtal ges i Tabell 12 i avsnitt 8.2.

1.1 BAKGRUND

Det pågår en intensiv utveckling av olika alternativa bindemedel både i Sverige och i övriga länder. Vissa råmaterial som används till framställning av dessa finns i Sverige, men andra behöver importeras. Det behövs en samlad kunskap av vilka bindemedel eller kombinationer av bindemedel som kan användas i betong för vattenkraftsanläggningar, och uppfyller både tekniska och miljömässiga krav.

Det finns ett antal potentiellt användbara material som kan ersätta delar av portlandcementet i betongen. Det som bedöms ha störst potential på kort sikt är naturliga puzzolaner. Dessa består främst av vulkaniska eller sedimentära material. De förekommer inte i svensk berggrund eller i mycket små mängder och behöver därför importeras. Ett annat material som bedöms ha bra förutsättningar att användas som alternativt bindemedel är kalcinerade leror. Det finns betydande fyndigheter av leror i Sverige och i andra länder, men tillgänglighet och produktion för användning i betong behöver utredas ytterligare. Lerornas lämplighet för användning i betong till grova konstruktioner som vattenkraftsanläggningar behöver också utredas.

Identifiering och utvärdering av nya alternativa bindemedel innebär också flera utmaningar. Materialet ska vara tillgängligt lokalt, ha specificerade egenskaper och kunna fungera tillsammans med andra material. För betong till vattenkraftsanläggningar bör de även ge betongen lägre värmeutveckling, samt ha lämplig hållfasthet, täthet och beständighet. Avgörande för att nya alternativa bindemedel ska kunna implementeras på ett säkert sätt är att deras egenskaper kan certifieras mot en produktstandard som specificerar de egenskaper som krävs vid användning i betong. Detta saknas idag för helt nya alternativa bindemedel. För naturliga och kalcinerade puzzolaner utarbetas en produktstandard som kommer att ges ut av SIS under 2024. För att minska samhällets sårbarhet är det dessutom viktigt att ha tillgång till flera olika alternativa bindemedel. Det finns även andra potentiella cementsättningsmaterial som kan bli aktuella på lite längre sikt, till exempel slaggsorter från tillverkning av andra metaller eller från järn tillverkat i andra processer än i masugn, samt olika typer av askor. Hur utveckling av alla dessa material framskrider och deras lämplighet för vattenkraftsanläggningar kommer att gås igenom i denna rapport.

Dessutom finns det cementtyper på marknaden som inte alls innehåller portlandcementklinker. För vissa av dessa är kunskapen om hur de påverkar betongens beständighet fortfarande begränsad.

1.2 SYFTE

Målet med projektet är att samla in och analysera tillgänglig kunskap och information om potentiella bindemedel med lågt eller inget koldioxidavtryck. Detsamma gäller de utmaningar och möjligheter de

medför för framtidens betong för vattenkraftsanläggningar i svenskt klimat.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Rapporten är en litteraturstudie och en samling av resultat från andra projekt som författarna förfogar över och kan rapportera om. Projektet omfattar inga praktiska provningar av olika bindemedel.

2 Viktiga egenskaper hos betong för vattenkraftsanläggningar

Krav på betong behöver förhålla sig till:

- färsk betong (som arbetbarhet, tillstyvnandetid, m.m.)
- betong i tidig ålder (som värmeutveckling, sprickbenägenhet, tidig hållfasthet)
- egenskaper hos härdad betong (som hållfasthet, nötningsmotstånd, täthet)
- beständighetsegenskaper för att undvika risk för främst
 - karbonatiseringsinitierad korrosion
 - kloridinitierad korrosion
 - nedbrytning på grund av frostangrepp
 - nedbrytning av betongen på grund av kemiskt angrepp eller urlakning
 - skador på grund av alkalisilikareaktioner (ASR)

Vilka beständighetsegenskaper som är av vikt för betongen bestäms av den miljö en viss anläggning kommer att utsättas för under den tid den kommer att vara i bruk, och även av den förväntade livslängden. Vattenkraftsanläggningar är belägna i sötvatten i älvar och utsätts normalt inte heller för tölsalter. Risken för korrosion av armering orsakad av inträngande klorider är därför vanligtvis försumbar. Däremot bör hänsyn tas till armeringskorrosion på grund av att betongytan karbonatiserar och pH-värdet i täcksiktet sänks. Ständig närvaro av sötvatten och en ofta vattenmättad betong ökar risken för frostskador. ASR-skador kan uppstå om olämplig ballast har använts. Dessutom kan strömmande vatten orsaka urlakning av alkalier i betongytan, vilket försämrar korrosionsmotståndet, men även nötningsmotståndet och frostbeständigheten.

I den europeiska betongstandarden SS-EN 206 kategoriseras betongens omgivningsmiljö av ett antal exponeringsklasser, kopplade till de vanligaste nedbrytningsmekanismerna. Nedan anges de

exponeringsklasser som är aktuella för vattenkraftanläggningar. Med avseende på korrosion orsakad av karbonatisering:

- XC1 Torr eller ständigt våt (i delar ständigt under vatten) eller
- XC4 Omväxlande våt och torr

Med avseende på frostangrepp:

- XF3 Hög vattenmättnad, utan avisningsmedel

Den exponeringsklass av dessa som innebär störst begränsningar av tillåtna bindemedel och strängaste kravet på tillåtet högsta ekvivalenta vattencementtal v_{ctekv} är XF3. I denna rapport fokuseras därför utvärderingen av de alternativa bindemedlens påverkan på betongegenskaper på de som har betydelse för XF3. Då karbonatisering utöver att påverka korrosionsbeständigheten även påverkar frostbeständigheten bör även detta inkluderas, då de flesta alternativa bindemedel gör betongen mer karbonatiseringskänslig.

Tabell 1: Uppskattning av betydelse av betongs egenskaper i olika typer av vattenkraftsanläggningar

Egenskap	Massivdamm oarmerad	Massivdamm armerad	Lamelldamm	Valvdamm	Utskovsdelar
Hållfasthet					
Tyngd					
Täthet					
Sprickbenägenhet					
Frostbeständighet yttre och inre					
ASR					
Erosionsmotstånd					
Korrosionskänslighet					
Risk för urlakning					
Risk för tempsprickor					
	Mycket viktig egenskap				
	Viktig egenskap				
	Relevant egenskap				
	Ej relevant egenskap				

I tillägg till exponeringsklasserna i SS-EN 206-1, så kan anläggningen hänföras till en omgivningskategori E2 med avseende på risken för ASR-skador enligt den svenska tillämpningsstandaren till SS-EN 206; SS 137003.

I tabell 1 görs ett försök till uppskattning av vilka egenskaper hos betong som är av störst betydelse för olika typer av vattenkraftsanläggningar eller delar därav.

Ett idealiskt alternativt bindemedel för vattenkraftsanläggningar ska:

- ha hög långtidshållfasthet vilket även ger högt erosionsmotstånd men behöver inte vara snabbhärdande
- ha låg eller moderat värmeutveckling för att undvika temperatursprickor
- ge begränsad krympning för att undvika uttorkningssprickor
- inte påverka frostbeständigheten (utan salt) negativt
- inte påverka ASR-motståndet negativt
- får gärna öka motstånd mot ASR
- inte öka permeabiliteten och försämra dammens vattentäthet
- inte innebära ökad risk för urlakning av CaO och alkalier i ytan i färskvatten, vilket kan ge lägre beständighet
- inte öka karbonatiseringsdjupet och ge större risk för karbonatiseringsinitierad korrosion av armering
- inte öka risken för plastisk sprickbildning

Att något alternativt bindemedel skulle uppfylla alla dessa krav är inte realistiskt. Det gäller att hitta de som uppfyller tillräckligt många av dessa krav och för vilka det inte krävs stora och kostsamma åtgärder för att säkerställa att de eventuella negativa effekterna minimeras eller undanröjs.

3 Alternativa bindemedel

3.1 ALLMÄNT

Betong består av sand, naturgrus eller krossad sten samt bindemedel och vatten. Rent portlandcement är det mest använda bindemedlet för betong men det finns ett antal godkända cement som innehåller väl bestämda mängder av alternativa bindemedel utöver portlandcement som har egenskaper som liknar de hos rent portlandcement. Det finns ett antal nya material som kan fungera som potentiella kandidater till alternativa bindemedel som kan ersätta en del av portlandcementinnehållet. Påverkan av de alternativa bindemedel som används i dag, främst flygaska från koleldade kraftverk och mald granulerad masugnsslagg (GGBS), är relativt väl känd. Tillgången på dessa material är begränsad och kommer att minska i takt med att man stänger kolkraftverk och förändrar processen för tillverkning av stål som i dag ger användbar slagg. På sikt behövs andra källor till alternativa bindemedel. Sådana alternativa bindemedel kan användas på två sätt:

- som ersättning av en del av portlandcementet i fabrikstillverkat cement (olika cementtyper)
- som tillsatsmaterial som tillsammans med ett cement tillsätts i betongblandaren (tillsatsmaterial typ II)

När ersättningsmaterialen används för att ersätta en del av portlandcement i ett fabrikstillverkat cement fås så kallade blandcement. De europeiska produktstandarderna för ordinära cement, SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5, omfattar blandcement med nio olika alternativa bindemedel. Proportionerna mellan delmaterialen bestämmer de 32 olika cementtyperna i dessa standarder, varav 31 är blandcement. Proportionerna är baserade på egenskaperna hos respektive material och deras inverkan på cementets och betongens egenskaper. Det grundläggande kriteriet för hur mycket av portlandcementklinker som kan ersättas är att cementen ska kunna klara de krav som cementstandarden specificerar: tidig hållfasthet och hållfasthet vid 28 dygn, bindetid och volymbeständighet.

Ju mer ersättningsmaterialets sammansättning liknar ett rent portlandcement, desto högre ersättningsnivå kan normalt användas.

Nya bindemedel för vattenkraftsanläggningar ska:

- inte negativt ändra den långsiktiga beständigheten hos armerad betong
- inte minska armerad betongs tekniska prestanda
- inte påverka miljön negativt genom att läcka ut skadliga ämnen i mark
- inte ändra de färska betongegenskaperna negativt
- inte skada byggnadsarbetare som hanterar betongen
- ge konstruktioner samma säkerhetsnivå som de traditionella materialen
- ha kontrollerade och certifierade egenskaper

I de fall någon betongegenskap påverkas negativt av materialet ska det finnas sätt att motverka detta som inte leder till andra negativa effekter.

Det finns även ekonomiska krav:

- Materialet ska vara överkomligt och inte öka kostnaderna för byggande och byggprodukter alltför mycket.
- Materialet ska vara regionalt tillgängligt och finnas i tillräckliga mängder. Långa transporter ökar dessutom CO₂-utsläpp i transportskedet, vilket kan underminera det minskande CO₂-avtrycket som eftersträvas.
- Leverans- och logistikkedjor för effektiv hantering av materialet måste finnas på plats.

Alla dessa krav tas i beaktande vid analysen av möjliga alternativa bindemedel.

Vissa alternativa bindemedel har använts under en längre tid och deras påverkan på betongen är kända. Vilka egenskaper de behöver ha för att fungera i betong och hur de kan användas i betong har standardiserats, endera som beståndsdel i cement eller som tillsatsmaterial i betong eller både och. För dessa alternativa bindemedel används beteckningen *standardiserade alternativa bindemedel* i det följande.

Det finns även andra material som kan fungera som potentiella bindemedel. När det gäller vissa av dem har forskningen om deras egenskaper och påverkan på betongens egenskaper kommit en bra bit på väg, men de har ännu inte standardiserats som alternativa bindemedel. Då forskningen i dagsläget om dessa material är intensiv kan de komma att standardiseras och introduceras praktiskt inom en inte alltför avlägsen framtid (högst 10 år). För dessa alternativa bindemedel används beteckningen *nya alternativa bindemedel* i det följande.

För vissa material som har identifierats som potentiella alternativa bindemedel är kunskapen om materialens egenskaper och deras inverkan på betongen inte särskilt väl beforskad och utvecklad. De kan därför enbart komma i fråga som bindemedel i betong på längre sikt (minst 7-8 år). För dessa alternativa bindemedel används beteckningen *framtida alternativa bindemedel* i det följande.

3.2 STANDARDISERADE ALTERNATIVA BINDEMEDEL

Nedan listas de alternativa bindemedel som i dag är standardiserade i Europa. Vissa av dessa är standardiserade både som huvudbeståndsdel i cement och som tillsatsmaterial typ II enligt SS-EN 206 för inblandning i betong vid betongtillverkningen (3.2.1 – 3.2.3), medan andra enbart är standardiserade som huvudbeståndsdel i cement (3.2.5 – 3.2.8). Ett tillsatsmaterial typ II är reaktivt och ger reaktionsprodukter som liknar de som erhålls när portlandcement reagerar. Ett nära inert tillsatsmaterial benämns tillsatsmaterial Typ I. I något fall är materialet standardiserat som ett tillsatsmaterial men inte som beståndsdel i cement (3.2.4). Det finns även ett antal specialcement som inte är baserade på portlandcementklinker, vilka nämns i 3.2.9. Alla dessa material produceras dock inte i Sverige.

3.2.1 Mald granulerad masugnsslagg (GGBS)

Masugnsslagg är en restprodukt från järnframställning där syre tas bort från järnmalmen med hjälp av kol och koks. Järnmalmen består inte enbart av järnoxid utan innehåller också andra mineral som kalksten och dolomit som avskiljs genom att tillsätta slaggbildare. Vid snabbkylning med vatten fås ett grusliknande material som benämns granulerad masugnsslagg. Snabb nedkylningen medför att slaggen inte hinner kristallisera utan får en glasig (amorf) struktur. Slaggen mals sedan och benämns mald granulerad masugnsslagg – på

engelska GGBS (ground granulated blast furnace slag). Denna beteckning används även i Sverige.

GGBS är ett latent hydrauliskt material, vilket innebär att GGBS, förutom vatten, behöver en alkalisk aktivator för att reagera. Kalciumhydroxid och andra alkalier som portlandcement avger vid sin reaktion med vatten, fungerar som en aktivator i portlandcement-GGBS-blandningar. Vid reaktionen bildas kalciumsilikathydrater som dock skiljer sig något från de som bildas vid portlandcementens hydratisering (något lägre CaO-halt). Dessutom minskar halten kristallin Ca(OH)_2 , portlandit i betongen.

GGBS kan antingen tillsättas betong som ett mineraliskt tillsatsmaterial typ II eller ingå som en huvudbeståndsdel i cement. GGBS för användning som tillsatsmaterial typ II i betong har standardiserats i SS-EN 15167-1 där bland annat krav på reaktivitet och kemisk sammansättning specificeras. För användning i cement anges kraven på GGBS i cementstandarderna SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5. GGBS kan även ingå med höga andelar i slaggcement CEM III.

Då GGBS är latent hydrauliskt kan en relativt stor del av portlandcementklinkern ersättas med GGBS, och i cementstandarderna specificeras slaggcement med upp till 95 % GGBS, se tabell 4. Enligt den svenska tillämpningsstandarden SS 137003 till den europeiska betongstandarden SS-EN 206 får enbart en GGBS-halt på 50 % av bindemedlet tillgodoräknas som ett reaktivt tillsatsmaterial typ II.

Cement med masugnsslagg innehåller vanligen lite mindre alkalier och lite mer kvarts och aluminium än vanlig portlandcement. Egenskaper som arbetbarhet och långtidshållfasthet för betong innehållande masugnsslagg är lite bättre än för betong som bara innehåller portlandcement. Hållfasthetsutvecklingen i tidig ålder är dock något lägre, vilket gör att sådan betong kan kräva något mer omfattande härdningsåtgärder (temperatur- och uttorkningsskydd) direkt efter gjutning. Avformning kan behöva ske senare ur ett hållfasthetsperspektiv. Cement med GGBS har lägre värmeutveckling vilket minskar risken för termiska sprickor.

Vid höga halter av GGBS får betongen sämre motstånd mot karbonatisering och större risk för karboniseringsinitierad korrosion, vilket dock i viss mån kompenseras genom ökad täthet.

Frostbeständigheten kan också påverkas negativt av höga halter av GGBS.

Betong med GGBS får också tätare struktur än portlandcementbetong, vilket ger betongen bättre motstånd mot kloridinträngning och kloridinitierad armeringskorrosion vilket dock inte är en primär skadeorsak i vattenkraftsanläggningar.

GGBS och dess inverkan på betongens egenskaper beskrivs mer ingående i bland annat Betonghandbok - Material del I [3].

3.2.2 Kiselrik flygaska (från kolkraftverk)

Flygaska är en restprodukt från koleldad produktion av elektricitet. Upp till 85 % av den aska som bildas vid koleldade kraftstationer är flygaska. Det är den icke brännbara mineraliska delen av förbränningsgaserna som kallas flygaska. Flygaskan består i huvudsak av sfäriska partiklar i samma storleksordning som cement, ungefär 10–100 µm. Mineralogiskt utgörs den huvudsakligen av amorfa (glasiga) men även kristallina faser. Askan är sammansatt av oxider av kisel, aluminium, järn och kalcium beroende på vilken typ av kol som används. Utöver detta innehåller flygaska en liten mängd oförbränt kol, så kallat restkol.

Det finns två klasser av flygaska, kiselrik och kalkrik. Kalkrik flygaska behandlas under punkt 3.2.5.

I den kiselrika flygaskan begränsas andelen reaktiv kalciumoxid till högst 10 % samtidigt som andelen reaktiv kiseldioxid inte ska understiga 25 %. För att begränsa andelen restkol i flygaskan ställs det krav på högsta glödförlust. Enligt flygaskestandarden finns det tre kravnivåer, 5 %, 7% och 9%. I Sverige får bara den med högst 5 % användas i betong.

Den kiselrika flygaskan har puzzolana egenskaper, vilket innebär att den kräver kalciumhydroxid från portlandcementens hydratisering för att reagera. Puzzolana material kan därför bara ersätta en begränsad del av portlandcementklinkern.

Det är enbart den kiselrika flygaskan som accepteras som tillsatsmaterial typ II i betong och som standardiseras i SS-EN 450-1. Vid användning som huvudbeståndsdel i cement enligt SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5 anges kraven på flygaskan i dessa standarder. I ordinära cement enligt SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5 specificeras en

ersättningsnivå på högst 50 % av bindemedelshalten. Enligt betongstandarden SS-EN 206 får enbart en halt av kiselrik flygaska på 25 % av bindemedlet tillgodoräknas som ett reaktivt tillsatsmaterial typ II.

Flygaska sänker den tidiga hållfasthetsutvecklingen hos betong mer än vad GGBS gör. På lång sikt (90 dygn och därefter) är dock påverkan på hållfastheten positiv. Betong med större mängder flygaska kräver därför mer skydd i tidig ålder (härdningsåtgärder) för att egenskaperna ska utvecklas optimalt. På sikt fås en tätare betong. När det gäller värmeutveckling, skydd mot kloridinitierad- och karbonatiseringsinitierad korrosion, samt frostresistens fås i princip samma inverkan av flygaska som av GGBS.

Kiselrik flygaska och dess inverkan på betongens egenskaper beskrivs mer ingående i bland annat Betonghandbok - Material del I [3].

3.2.3 Silikastoft

Silikastoft är ett restmaterial som bildas vid tillverkning av kisellegeringar. Det är ett mycket finkornigt material, med upp till 100 gånger mindre partikelstorlek än vanligt portlandcement. Det består till största delen av ren amorf kiseldioxid.

Silikastoft för användning som tillsatsmaterial typ II i betong är standardiserat enligt SS EN 13263-1. Den innehåller två klasser av silikastoft, Klass 1 med minst 85 % SiO_2 och Klass 2 med minst 80 % SiO_2 . Den höga halten kiseldioxid och den extrema finkornigheten gör materialet till en mycket reaktiv puzzolan, vilket begränsar hur stor andel av portlandcementet den kan ersätta. I cement och normal betong begränsas halten till högst 10 % av bindemedlet. Dess reaktivitet gör att det kan ersätta samma mängd portlandcement utan att den långsiktiga hållfastheten reduceras.

Silikastoft påverkar hållfastheten (även den tidiga) hos betong positivt, och har på grund av sin extrema finkornighet möjliggjort framställning av högpresterande betong. Silikastoft förbättrar även betongens vidhäftning. På grund av sin finkornighet påverkar silikastoft också märkbart betongens färskas egenskaper (arbetbarhet, kohesion, m.m.) och kräver flytmedel för att dispergeras väl i betong. Betong med silikastoft kräver därför mer omfattande härdningsåtgärder, bl.a. för att undvika plastiska sprickor i tidig ålder. I vanlig konstruktionsbetong används oftast en ersättningsnivå

på 4- 5 %. Detta görs då oftast för att öka betongens arbetbarhet och vidhäftning.

En utmaning med en storskalig användning av silikastoft som ett alternativt bindemedel till ordinär cement är, utöver att tillgången är relativt liten, dess pris, som är 3–5 gånger högre än ordinärt portlandcement.

Silikastoft och dess inverkan på betongens egenskaper beskrivs mer ingående i bland annat. Betonghandbok - Material del I [3].

3.2.4 Silikakalciumstoft

År 2015 gavs den harmoniserade standarden SS-EN 16622 ut vilken behandlar silikakalciumstoft för användning som tillsatsmaterial typ II i betong. Silikakalciumstoft är en restprodukt från den karbotermiska processen för tillverkning av kiselkalciumlegeringar. Den innehåller minst 70 % SiO₂ och mellan 10 och 20 % CaO. Den har både puzzolana och latent hydrauliska egenskaper. Kornstorleken kan skilja sig marginellt från silikastoft. Det finns dock ännu inga användningsregler för detta material i SS-EN 206 och inga svenska erfarenheter av dess användning, vilket i dag gör det omöjligt att använda silikakalciumstoft i betong i Sverige. Tillgången är dessutom mycket begränsad. Materialet är heller inte upptaget som huvudbeståndsdel i cement i cementstandarderna SS-EN 197-1 eller SS-EN 197-5.

3.2.5 Kalkrik flygaska

Den kalkrika flygaskan har både puzzolana och latent hydrauliska egenskaper. I den kalkrika flygaskan ska andelen reaktiv kalciumoxid vara minst 10 % medan kravet på andel reaktiv kiseldioxid beror på halt reaktiv kalciumdioxid. Kalkrik flygaska kan ingå i sju av cementtyperna i SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5. Det saknas erfarenheter av dessa cementtyper i Sverige och de är inte allmänt accepterade för användning enligt SS 137003.

Kalkrik flygaska är inte allmänt accepterad som tillsatsmaterial typ II i betong i Europa. I USA och vissa andra länder har kalkrik flygaska standardiserats och används, ofta benämnd flygaska typ C.

3.2.6 Naturliga och kalcinerade puzzolaner

Puzzolana material består huvudsakligen av reaktiv kiseldioxid och aluminium-oxid. De hårdnar inte själva vid blandning med vatten, men vid närvaro av vatten och om de är finmalda reagerar de med löst kalciumhydroxid och bildar hållfasthetsutvecklande föreningar av kalciumsilikater och kalciumaluminater liknande de som bildas vid hårdnande av portlandcement. Andelen reaktiv kalciumoxid är försumbar. Även om silikastoft och flygaska är puzzolana material behandlas de som separata huvudbeståndsdelar i cementstandarderna SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5 och även så i denna rapport.

De naturliga puzzolanerna är vanligen material av vulkaniskt ursprung och bildar en grupp alternativa bindemedel med stor variation och variabilitet. De består främst av pyroklastiskt material (material från ett snabbbrörligt, ofta glödande utsläpp av gas, aska och sten i samband med ett vulkanutbrott). De kan också bestå av sedimentära bergarter med lämplig kemisk och mineralogisk samman-sättning, som amorf kiseldioxid av organiskt ursprung. Hit räknas zeoliter och suevitisk nedslagsbreccia. De naturliga puzzolanerna är milt reaktiva material som innehåller hög andel amorf kiseldioxid och aluminiumoxidglas.

Naturliga kalcinerade puzzolaner är material av vulkaniskt ursprung, leror, skiffrar eller sedimentära bergarter som aktiverats genom värmebehandling (kalcinering) så att de reagerar puzzolant.

Vissa lermineral kan vara lämpliga att använda som alternativa bindemedel till betong. De behöver då göras mer reaktiva genom aktivering, antingen mekaniskt eller genom att hetta upp materialet till mellan 600 °C och 800 °C (kalcinering).

Det är endast naturliga puzzolaner och kalcinerade naturliga puzzolaner som är standardiserade på europnivå och förekommer bara som huvudbeståndsdelarna P, (naturliga puzzolaner) och Q (naturliga kalcinerade puzzolaner) i ordinära cement enligt SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5. De ska vara finfördelade och innehålla minst 25 % reaktiv kiseldioxid och försumbar halt kalciumoxid. Mekaniskt aktiverade puzzolaner omfattas inte av cementstandarderna.

Naturliga och kalcinerade puzzolaner för användning som tillsatsmaterial typ II i betong har under 2024 standardiserats i Sverige SS 137004. Målet är att de också ska accepteras som alternativa

bindemedel i en kommande version av den svenska betongtillämpningsstandarden SS 137003 som ger anvisningar för användningen av dem i betong. På sikt planeras att också inkludera mekaniskt aktiverade puzzolaner i den standarden.

3.2.7 Bränd skiffer

Lerrika sedimentära bergarter, i första hand lågmetamorfa skiffrar som lerskiffer, används på flera platser i världen som råvara för tillverkning av bindemedel. Bränd skiffer, speciellt bränd oljeskiffer, tillverkas i speciella ugnar vid en temperatur på cirka 800 °C. Sammansättningen av det naturliga materialet och tillverkningsprocessen gör att bränd skiffer innehåller klinkerfaser som till största delen består av kalcium, silikat och aluminat samt reaktiva puzzolana oxider, speciellt kiseldioxid. Bränd skiffer uppvisar därför både puzzolana och hydrauliska egenskaper. För att vara godkänd som huvudbeståndsdel med beteckningen T i ordinära cement enligt SS-EN 197-1 ska den brända skiffen uppnå 25 MPa vid bruksprovning efter 28 dygn och inte uppvisa för stor expansion, det vill säga vara volymbeständig.

3.2.8 Kalksten

Kalksten som innehåller minst 75 % kalciumkarbonat (CaCO_3), och inte innehåller mer än en mindre andel lermineral kan när den är finfördelad användas som huvudbeståndsdel i cement. Dess huvudsakliga bidrag till cementens hållfasthetsutveckling beror på att de små kornen fungerar som nukleationskärnor för portlandcementens hydratiseringsprodukter. Malningen kan dock även ge kalkstenen en begränsad kemisk reaktivitet så att den reagerar med aluminiumoxid för att bilda kalciumkarboaluminathydratfaser som kan bidra till betongens styrka och hållbarhet. Möjligheten att ersätta portlandcement med kalkfiller är begränsad på grund av mängden aluminiumoxid i cement och kalkfillerns låga reaktivitet. Kalksten betecknad L får innehålla högst 0,50 % organiskt kol och om halten organiskt kol är högst 0,20 % betecknas den LL. I de flesta cement är kalkstenshalten begränsad till högst 20 % men i några fall kan upp till 35 % ingå. Som alternativt bindemedel accepteras mald kalksten för närvarande enbart när det förekommer i ett fabrikstillverkat cement. Men kalkstensfiller används också som ett inert tillsatsmaterial typ I i betong eller som ballast i betong. Det pågår dock standardisering inom CEN för att göra det

möjligt att även använda kalksten som tillsatsmaterial typ II i betong med begränsad reaktivitet.

Kalkstens och dess inverkan på betongens egenskaper beskrivs mer ingående i bland annat Betonghandbok - Material del I [3].

3.2.9 Specialcement

I början av 1900-talet användes ibland *aluminatcement*.

Aluminatcement består huvudsakligen av kalciumaluminater till skillnad från portlandcement som innehåller högre halt av kalciumsilikater [5]. Aluminatcement härdar snabbt och ansågs idealiskt för tillämpningar där man behövde kunna riva formarna snabbt. Priset för aluminatcement var tre gånger högre än för portlandcement, vilket gjorde att det inte fick någon bredare tillämpning. I Sverige användes aluminatcement mellan 1926 och 1941. Efter hand observerade man att hållfastheten minskade och porositeten ökade i byggnadsdelar där man använt betong med aluminatcement. Detta berodde på en omvandling av inte helt stabila kalciumaluminathydrat som har en lägre densitet (högre volym), till stabila hydrat med en högre densitet (mindre volym). Den här oönskade omvandlingen kan inträffa efter upp till 30 år i fuktiga miljöer. På grund av detta förbjöds användning av aluminatcement i lastbärande konstruktioner från och med 1960. Aluminatcement tål höga temperaturer (1500–1600 °C) och används i dag vid gjutning av eldfasta komponenter till eldstäder och insatser i värmepannor och i eldfast bruk. Dessutom används det i avjämningsmassor och i reparationsbruk.

SS-EN 14647 är en standard som behandlar kalciumaluminatcement.

Det finns andra typer av cement, som kalciumsulfoaluminatcement, supersulfatcement, magnesia-cement, fosfatcement, belitcement, alitcement och CSA-belitcement. Dessa cement har särskilda användningsområden och tillverkas inte i någon större omfattning. För dessa finns inga europeiska eller svenska standarder men det kan finnas europeiska tekniska godkännanden (ETA, European Technical Approval).

3.3 NYA BINDEMEDEL

3.3.1 Mekaniskt aktiverade naturliga puzzolaner

Reaktiviteten hos naturliga puzzolaner är främst beroende av mineralogin och de fysiska egenskaperna hos dessa material [6]; [7]; [8]; [9]. Att förutsäga reaktiviteten hos naturliga puzzolaner är mer komplicerat än med industriellt framställda alternativa bindemedel som flygaska eller silikastoft, som är relativt rena och har låg porositet. Många vulkaniska glasmaterial har dessutom en relativ hög vattenhalt, som måste avlägsnas under bearbetningen. De får då en hög vattenabsorption som måste beaktas när de används i betong. Vissa typer av vulkaniska stenar med alltför låg reaktivitet för att betraktas som naturliga icke-kalcinerade puzzolaner kan få puzzolana egenskaper när de mals, de kan alltså aktiveras mekaniskt. I synnerhet gäller det stenar som härrör från vulkanisk aska, så kallade vulkaniska tuffbergarter. Puzzolaner av denna typ ingår inte i de som omfattas av begreppet naturliga och kalcinerade naturliga puzzolaner (3.2.5). Den nya svenska puzzolanstandarden SS 137004 utesluter dock inte mekaniskt aktiverade naturliga puzzolaner. Ett exempel på naturlig puzzolan som kan aktiveras mekaniskt och som är vanligt förekommande i Sverige är illitlera.

3.3.2 Restprodukter från produktion av metaller

Vid produktion av metaller fås i utvinningsprocessen restprodukter med en sammansättning som påminner om portlandcement. Metallerna kan vara järnhaltiga eller icke-järnhaltiga. Masugnsslagg, d.v.s. slagg som är en biprodukt vid framställning av järn i en masugnsprocess, beskrivs separat i avsnitt 3.2.1. Järn tillverkat genom andra processer kan ge restprodukter med annan sammansättning och annat funktionssätt i betong än vad GGBS har. Forskning pågår i bland annat Tyskland för att använda den slagg som genereras från de ljusbågsugnar som ersätter befintliga masugnar. Det finns dock hinder med att ta vara på denna eftersom koncentrationerna av fri bränd kalk (CaO) och andra oxider som magnesiumoxid (MgO) som förekommer i slagg från ljusbågsugnar behöver regleras.

Stålslag är en restprodukt av ståltillverkningsprocessen. Slaggen bildas under raffineringsprocessen vid omvandling av tackjärn till stål genom att blåsa luft eller syre till smältan och genom att kombinera flödena med icke-järnhaltiga oxider.

Slagg från produktion av icke-järnhaltiga metaller är en restprodukt som produceras tillsammans med metaller som koppar, nickel, bly och zink genom att smälta motsvarande malmer. I allmänhet har dessa slaggar stora mängder amorfa faser och kan kemiskt bestå av de viktigaste oxiderna av silika, järn och ibland kalcium.

Slagg från metalltillverkning (förutom GGBS) har ofta en sammansättning som påminner om kiselrik flygaska och deras reaktionssätt tillsammans med portlandcement är företrädesvis puzzolant. Det pågår därför arbete för att standardisera vissa slaggar från svensk metalltillverkning som ett tillsatsmaterial typ II. Dessa har stor likhet när det gäller sammansättning och funktion med naturliga puzzolaner och flygaska.

En fördel med restprodukter från metalltillverkning är att man i tillverkningsprocessen av metallen i fråga har stora möjligheter att styra sammansättning och form även hos restprodukten, och därmed också dess användbarhet och funktion i betong.

Då dessa slaggar fungerar som puzzolaner så liknar inverkan på betongens egenskaper den man får med kiselrik flygaska eller naturliga puzzolaner.

3.3.3 Finmaterial från återvunna byggmaterial

I byggmaterial inräknas i detta fall dels återvunnen betong från betong- eller förtillverkad betongproduktion, dels återvunna rivningsmaterial som till största delen består av återvunna krossade betongkonstruktioner eller stenmaterial. Materialen krossas i en anläggning för att producera återvunnen ballast. Det krossade och malda materialet har normalt inte tillräcklig latent hydraulisk eller puzzolanisk reaktivitet för att räknas som ett aktivt alternativt bindemedel. Liksom kalksten kan den dock ge ett visst bidrag till hållfastheten och ersätta en viss portlandcementmängd i ett blandcement. En standard för blandcement innehållande finmaterial från återvunna byggmaterial publicerades 2023; SS-EN 197-6. I denna standard ingår sex cementtyper, i fyra av dem kombineras återvunnet finmaterial med andra alternativa standardiserade huvudbeståndsdelar. I två av cementtyperna kan upp till 29 % respektive 35 % återvunnet finmaterial användas, men i de övriga högst 20 %. Användning av cement enligt denna standard har inte förts in i SS 137003.

Genom karbonatisering av den återvunna betongen kan reaktiviteten förbättras. Karbonatisering förekommer naturligt, men det är en mycket långsam process och sker i ytskiktet. Accelererad karbonatisering genom höga koncentrationer av koldioxid från avskild koldioxid från exempelvis cementproduktion ger en snabb karbonatisering av cementpastan i den krossade betongen. Det finns i dag ingen kommersiell produktion av finmaterial från karbonatiserad återvunnen betong. Forskning inom karbonatisering av betong bedrivs bl.a. av A. Oliva m.fl [4].

3.4 FRAMTIDA BINDEMEDEL

3.4.1 Askor från förbränning av biomassa

Aska från avfall från jordbruk

Aska från förbränning av avfall från jordbruk kan användas som ett kompletterande bindemedel och som komponent i cementbaserade eller alkaliaktiverade bindemedel. Organisk kol omvandlas mestadels termiskt till CO₂ och de återstående resthalterna är rika på SiO₂. Det är ett förhållandevis billigt material jämfört med andra alternativa bindemedel. Risskalsaska har det högsta utbytet och den högsta kiseloxidhalten och används i risproducerande länder. Aska från vete, durra, havre och rishalm innehåller också höga kiselhalter.

Aska från trä- och cellulosaprodukter

Aska från trä framställs huvudsakligen av träavfall från massa- och pappersindustrin som har eldats tillsammans med kol. Lövträ producerar vanligtvis mer aska än barrved. Barken och bladen producerar allmänt mer aska än den inre delen av trädet. Lågteknologiska förbränningsprocesser producerar träaska som innehåller stora partiklar av endast delvis förbränt bränsle. Askan har normalt därför ett brett spektrum av partiklarstorlek och partikelform.

Den huvudsakliga kemiska sammansättningen är normalt cirka 60 % CaO och 20 % SiO₂ och mindre mängder K, P och Mg.

Askor från förbränning inom pappersindustrin används i nuläget endast till mark- och vägfyllnad. Skogsmaterial som förbränns är relativt heterogent och det innehåller också höga halter av föroreningar, till exempel salter och reaktivt kol. Försök med borttvättning av salterna pågår i Sverige i projektet *Ash2Salt* [10].

3.4.2 Bottenaska och flygaska från förbränning av avfall

Vid förbränning av kommunalt avfall och verksamhetsavfall återstår efter förbränningen aska. Dels får man bottenaska som ligger kvar i förbränningsugnen, dels får man flygaska som följer med rökgaserna. Sammansättningen av bottenaskan är mycket heterogen och innehåller föroreningar som tungmetaller beroende på vilka material som förbränns och på själva förbränningsprocessen. Allmänt består askan bland annat av fragment av glas, metaller, keramik, sand, rester av polymerer, benfragment och kol med mera.

Man har försökt utnyttja sådan bottenaska under de senaste 20 åren inom byggindustrin, även som alternativt bindemedel. Det har dock varit problem med kvalitetssäkring av den slutliga produkten på grund av stora variationer i kemisk sammansättning och sporadiskt uppträdande skadliga komponenter. Det har också varit svårt att styra kvaliteten på de konstruktioner i vilka den använts på grund av de variationer i betongens mekaniska egenskaper som uppstått.

Flygaskan från förbränning av kommunalt avfall är oregelbundet formade partiklar som vanligtvis är mindre än 300 µm. Kemiskt består den av kisel, kalcium, aluminium, järn och svavel och den har puzzolana egenskaper. Till skillnad från bottenaska betraktas flygaskan som farligt avfall, då den innehåller ett stort antal tungmetaller, lösliga salter, klorerade organiska ämnen och kalk från rökgasreningen. De största hindren mot att använda bottenaska och flygaska från avfallsförbränning är relaterade till inverkan på miljön på grund av risk för utlakning av skadliga ämnen eller beständighetsproblem på grund av innehåll av för betongen skadliga metaller.

Försök genomförs idag, bland annat i projektet *Ash2Salt* [10] med att rena flygaskor genom tvättning från främst salter och tungmetaller som sedan kan återvinnas. Från tvättningen uppkommer bland annat en kiselrik sand som restprodukt och denna bedöms ha potential som ett alternativt bindemedel. Det är dock ännu oklart hur stora volymer av sanden som kan tas fram från denna typ av process. Resultat från projektet pekar på att den kiselrika sandens förmåga som bindemedel i betong överstiger det hos vanliga flygaskor, men mer forskning om detta material behövs innan det kan användas som ett alternativt bindemedel.

3.4.3 Filler av bergmaterial

Filler av bergmaterial är fina partiklar, inerta eller svagt reaktiva som produceras genom malning. Ingen annan bearbetning än malning behövs normalt. Det finns många typer av bergmaterial som kan användas som filler, exempelvis kalksten, dolomit, basalt, eller granit. Det vanligaste fillermaterialet är kalksten eftersom den finns i stor mängd och är lättillgänglig.

På grund av låg reaktivitet hos de flesta kristallina bergmaterial, även efter malning, så kan det dock inte bli fråga om att ersätta någon betydande andel av portlandcementet i betong.

3.4.4 Gruvavfall

Med gruvavfall menas här restprodukter från malmutföring, så kallade *tailings*, från gruvdrift efter avskiljningsprocessen.

Avfallet består av berggrund, vatten och bearbetningskemikalier. Materialet pumpas vanligtvis genom rörledningar till ett lagringsutrymme där det torkas och samlas. Vissa avfallsrester kan innehålla giftiga kemikalier och måste hållas avskilda. Gruvavfall kan ha en grov och oregelbunden yta med varierande densitet beroende på mineralfaserna i avfallet. Den kemiska sammansättningen av gruvavfallet beror i hög grad på berggrundens sammansättning och produktionsprocessen.

3.5 JÄMFÖRELSE AV ALTERNATIVA BINDEMEDEL

3.5.1 Påverkan på betongens egenskaper

I Tabell 2 sammanfattas de olika alternativa bindemedlens inverkan på betongens olika egenskaper. För standardiserade och väl studerade material anges inverkan med relativt hög säkerhet. För inte lika väl undersökta material är uppgifterna mer osäkra och baseras i första hand på inverkan av material som är etablerade och som har snarlik sammansättning och funktionssätt i betongen. För vissa material är osäkerheten så stor att ingen uppskattning ges. Detta beror endera på att kunskap saknas eller på att materialegenskaperna kan variera alltför mycket på grund av ursprung, renhet, kornstorlek och dylikt. I tabell

Tabell 2: De olika alternativa bindemedlens påverkan på betongens egenskaper

	Arbetbarhet, färska	Korttidshållfasthet	Hållfasthet lång tid	Täthet	Sprickbenägenhet (plastiska)	Ben. för temp. sprickor	Frostbeständighet	ASR-motstånd	Kloridmotstånd	Karbonatiseringsmotstånd
GGBS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kiselrik flygaska	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Silikastoft	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Silikakalciumstoft	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kalkrik flygaska	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Naturliga puzzolaner (inkl. kalcinerade)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bränd skiffer	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kalksten	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mekaniskt aktiverade puzzolaner	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Metallslag	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Återvunnet byggmaterial	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Bioaskor	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Avfallsaska	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Bergfiller	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gruvavfall	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
● enbart marginell skillnad från portlandcement ● ger bättre prestanda än portlandcement ● ger sämre prestanda än portlandcement ? okänd påverkan eller mycket varierande beroende på ursprung						Fyllda cirklar: känd påverkan Ofyllda cirklar: påverkan uppskattad baserad på liknande material				

3.5.2 Hur kan en eventuell negativ påverkan kompenseras

Som synes av Tabell 2, påverkas vissa av betongens egenskaper negativt av att viss del av portlandcementet ersätts med de alternativa bindemedlen. I de flesta fallen kan dessa förändringar motverkas genom att det görs förändringar i betong-sammansättningen (som lägre $v_{C_{tek}}$, ökad mängd bindemedel, användning av accelererande eller retarderande tillsatsmedel) eller mer omfattande härdningsåtgärder, d.v.s. skydd mot uttorkning under härdningstiden.

När det gäller arbetbarhet och färskas egenskaper, som starkt påverkas av partikel-storleksfördelningen i den färskas betongen (inklusive ballasten), så kan de vanligtvis förbättras genom en omsorgsfull proportionering av betongsammansättningen och val av ballast samt användning av vattenreducerande tillsatsmedel eller flytmedel.

Då korttidshållfastheten i sig, som avgör när en konstruktion kan avformas, sällan är ett problem vid byggande av vattenkraftsanläggningar behöver normalt inga speciella åtgärder vidtas för att höja korttidshållfastheten. En långsam hållfasthetutveckling i tidigt skede gör dock betongen mer känslig för yttre angrepp i tidig ålder, då betongens motståndskraft successivt byggs upp i takt med hållfasthetsutvecklingen. Härdningstiden, det vill säga den tid från gjutning och framåt under vilken betongen måste skyddas mot uttorkning för att uppnå optimala egenskaper i härdat tillstånd, blir längre. Dessutom kan en mer krävande skyddsmetod vara nödvändig. Detta gäller också för att undvika att plastiska sprickor utvecklas i betongen tidig ålder.

De bindemedel som inte är reaktiva eller har mycket låg reaktivitet (kalksten, bergfiller, gruvavfall) tillsätts normalt inte i högre ersättningshalter än 20 %. Genom att portlandcementhalten i bindemedlet minskar om en del av den ersätts av dessa icke-reaktiva material blir kvoten mellan vattenhalt/portlandcementhalt lägre, vilket påverkar i stort sett alla egenskaper negativt. Genom sin finkornighet kan dock materialen bidra till hållfasthetsutvecklingen genom att fungera som nukleationskärnor vid cementreaktionen. Malningen kan också i viss mån aktivera dessa material. Hållfasthetsutvecklingen hos fabriksstillverkade cement med denna typ av material justeras oftast genom en väl utprovad partikelfördelning hos cementet. Den negativa inverkan av dessa material när de förekommer i ett cement blir därför för det mesta bara marginell. Vid

iblandning direkt i betongblandaren bör de betraktas som inert tillsatsmaterial typ I eller som filler, d.v.s. en del av ballasten, inte som ett bindemedel. I den mån det utarbetas särskilda standarder för dessa material som tillsatsmaterial typ II, kommer hänsyn att tas till deras låga reaktivitet genom ett lågt k-värde, som gör att en viss mängd av materialet bara kan ersätta en betydligt mindre mängd cement.

Temperatursprickor kan uppstå i massiva konstruktioner på grund av den temperaturhöjning som sker vid cementreaktionen. Den primära åtgärden är att använda ett bindemedel som inte har för snabb och stor värmeutveckling. Alla alternativa bindemedel förutom silikastoft ger en lägre värmeutveckling. Sprickrisken påverkas dock även av andra betongparametrar och i AMA Anläggning [11, p. 2024] finns metoder för att uppskatta sprickrisken. Dessa metoder är dock utarbetade för det traditionellt använda portlandcementet med moderat värmeutveckling (CEM I 42,5N-MH). Metoderna i AMA Anläggning har i viss mån setts över och giltighetsområdet har utökats något. Om bindemedelssammansättningen avviker mycket från den som förutsatts måste dock ett antal parametrar fastställas genom provning på aktuell betong för att sprickrisken ska kunna beräknas.

I stort sett alla alternativa bindemedel inverkar vid högre ersättningsnivåer negativt på frostresistensen, särskilt när det gäller saltfrostbeständighet vilket utgjort beslutsunderlag för kraven i SS 137003. När det gäller frostbeständighet i fuktig betong utan närvaro av salt så finns det inte lika gediget underlag i form av laboratorieundersökning och fältprovningar. Huruvida kraven i SS 137003 är de som krävs för att ge frostbeständighet i exponeringsklass XF3 kan därför ifrågasättas. Är kravet på en viss lufthalt tillräckligt? Är den provningsmetod och kravnivån som anges om man vill påvisa frostbeständighet genom provning de rätta? Tas tillräcklig hänsyn till att provningen sker vid tidig ålder, då de nya alternativa bindemedlen normalt har lägre korttidshållfasthet, medan exponering för frost sker vid högre ålder då hållfastheten är jämbördig eller högre? Frågan är alltså om frostbeständigheten på lång sikt med alternativa bindemedel är fullt tillräcklig i XF3 trots den negativa effekten på den uppmätta frost-beständigheten?

Kalciumhydroxiden från cementreaktionen är en av huvudorsakerna till att portlandcement betong har ett högt pH, vilket skyddar armeringen från korrosion. Den puzzolana eller latent hydrauliska reaktionen förbrukar kalciumhydroxid vilket gör att pH-värdet

sjunker och mindre kalciumhydroxid blir tillgängligt för att reagera med luftens koldioxid. Karbonatiseringsdjupet ökar därför när de flesta alternativa bindemedlen används. Huruvida den ökade tätheten som fås med dessa material på lång sikt motverkar den ökande karbonatiseringstendensen genom att minska möjligheten för luftens koldioxid att tränga in i betongen är inte klarlagt. Den vanliga åtgärden för att öka tätheten hos betongen från start är att sänka v_{ctekv} , vilket dock ökar mängden bindemedel i betongen. Karbonatiseringen påverkar även frostbeständigheten negativt.

I stort sett alla alternativa bindemedel ger större täthet, bättre kloridmotstånd och bättre motstånd mot skadliga alkalisilikareaktioner (ASR) än rena portlandcement. Att tätheten ökar beror på att volym-andelen kalciumsilikatgel, som har mycket små porer, blir större. En större andel av de alkalier som finns i bindemedlen binds kemiskt i reaktionsprodukterna när alternativa bindemedel används och sänker därför alkalihalten i porvattnet, vilket minskar risken för ASR.

3.5.3 Mognadsgrad – tekniskt, regeltekniskt och kommersiellt

Hur moget ett material är i förhållande till att kunna användas i praktiken beror dels på dess tekniska mognadsgrad, dels hur långt man har kommit regeltekniskt för att kunna använda produkten på ett säkert sätt i praktiken. Dessutom beror den på dess kommersiella mognadsgrad, d.v.s. om det finns en uppbyggd infrastruktur för att ta hand om, bearbeta och saluföra produkten.

Den tekniska mognadsgraden beskrivs enligt TRL-skalan från [12]

En produkts teknisk mognadsgrad:

1-4	forskning och validering i laboratorium,
5/6	validering/demonstration i pilotprojekt,
7	prototyp i relevant miljö
8/9	färdigställd/i produktion

Regeltekniskt krävs det dels att det finns en överenskommen produktspecifikation, mot vilken den kan certifieras så att produkt har verifierade egenskaper. Detta kan skilja mellan om det är för användning som beståndsdel i ett fabriksstillverkat cement eller om det är fråga om som användning som ett tillsatsmaterial till betong. Certifiering sker normalt av ett oberoende certifieringsorgan, eller om det är fråga om CE-märkning mot en harmoniserad standard eller

baserat på ett Europeiskt Tekniskt Godkännande (ETA) av ett anmält organ. (se avsnitt 4.3).

Nästa steg i denna process är att det ska finnas regler för hur produkten får användas, t.ex. i vilka mängder och i vilka konstruktionstyper. Dessa kan vara gemensamma för EU eller utarbetade för ett eller flera länder.

I Tabell 3 redovisas de olika typerna av mognadsgrad för de alternativa bindemedlen.

Tabell 3: Teknisk, regelteknisk och kommersiell mognadsgrad för alternativa bindemedel

	Teknisk mognadsgrad	Produktspecifikt cement	Produktspecifikt tillsatsmaterial	Användningsspecifikation tillsatsmaterial	Certifieringsmöjlighet cement	Certifieringsmöjlighet tillsatsmaterial	Kommersiell mognad	Krav på behandling
GGBS	9	●	●	●	CE	CE	Hög	Malning
Kiselrik flygaska	9	●	●	●	CE	CE	Hög	Nej
Silikastoft	9	●	●	●	CE	CE	Hög	Nej
Silikakalciumstoft	6	●	●	●	Nej	CE	?	Nej?
Kalkrik flygaska	6	●	●	●	CE	Nej	?	Nej?
Naturliga puzzolaner (inkl. kalc.)	8	●	● N, UK, o S	● N, UK, o S	CE	PC	God	Malning och/eller kalcinering
Bränd skiffer	8	●	●	●	CE	Nej	?	Malning, kalcinering
Kalksten	9	●	● F	● F	CE	PC F	Hög	Malning
Mekaniskt aktiverade puzzolaner	8	●	● S	● S	Nej	PC S	God	Malning, aktivering

Rest från metaltillverkning	4	●	o S	o S	Nej	PC S	Go d	Anpassning av process, malning
Återvunnet byggmaterial (ÅB)	4	●	●	●	PC	Nej	Låg	Anpassning av produktion av ÅB
Bioaskor	4	●	●	●	Nej	Nej	Låg	Rening/sortering
Aska från avfall	4	●	●	●	Nej	Nej	Låg	Rening/sortering
Bergfiller	4	●	●	●	Nej	Nej	Låg	Malning/sortering
Gruvavfall	4	●	●	●	Nej	Nej	Låg	Rening/sortering
● Europeiska finns ● Nationella finns (landsbeteckning anges) o Nationella under utarbetande (landsbeteckning anges) ● Finns ej					CE kan CE-märkas PC ackrediterad produktcertifiering möjlig. ? Osäkert			

3.5.4 Potentiell ersättningsgrad, tillgänglighet, pris

Hur stor andel av portlandcementklinkern som kan ersättas med de olika alternativa bindemedlen i betong i allmänhet, inte specifikt för betong till vattenkraftsanläggningar, varierar beroende på deras reaktionssätt, reaktivitet och påverkan på betongegenskaperna. De högsta ersättningsnivåerna erhålls med latent hydrauliska material, som GGBS och lägst med nästan inerta material, som kalkstensfiller. I ett fabriksstillverkat cement kan egenskaperna hos det specifika cementet lättare optimeras, än när blandning av två bindemedel sker i betongblandaren, vilket gör att högre ersättningsnivåer normalt tillåts i ett fabriksstillverkat cement. I Tabell 4 redovisas möjlig ersättningsnivå för de olika standardiserade alternativa bindemedlen enligt gällande standarder, dels när de används i ett fabriksstillverkat cement, dels när de används som tillsatsmaterial typ II. För de övriga alternativa bindemedlen anges med kursiva siffror och ett frågetecken trolig högsta ersättningsnivå, uppskattad baserat på deras likhet med standardiserade material med liknande egenskaper. Detta ställs i Tabell 4 relation till materialens globala tillgänglighet och tillgänglighet i Sverige, samt om användning av materialen som bindemedel i betong konkurrerar med annan användning av

materialet. I den sista kolumnen anges ungefärligt pris på de alternativa bindemedlen i förhållande till priset på ett portlandcement.

Tabell 4: Potentiell ersättningsnivå, tillgänglighet och prisnivå på alternativa bindemedel

	Ersättningsgrad i cement [%]	Ersättningsgrad som tillsattematerial typ II [%]	Global tillgänglighet	Tillgänglighet i Sverige	Konkurrerande användning	Pris (i förhållande till portlandcement)
GGBS	≤90	≤50	Begränsad; minskande	Begränsad	Ja	≈
Kiselrik flygaska	≤50	≤25	Begränsad; minskande	Ingen	Nej	≈
Silikastoft	≤10	≤10	Begränsad	Ingen	Ja	>>
Silikakalciumstoft	≤10 ?	≤10 ?	Okänd	Ingen	?	?
Kalkrik flygaska	≤50	≤25 ?	Begränsad	Ingen	?	?
Naturliga puzzolaner (inkl. kalcinerade)	≤50	≤25 ?	God	Ingen	Ja	≈
Bränd skiffer	≤50	≤25 ?	Begränsad	Ingen	?	≈
Kalksten	≤35	≤20 ?	Mycket god	God	Ja	<<
Aktiverade puzzolaner	≤50	≤25 ?	Trol. god	Ingen	?	≈
Rest från metalltillverkning	≤50	≤25 ?	Trol. god	God	Ja	?
Återvunnet byggmaterial	≤20	≤20 ?	God	God	Nej	?
Bioaskor	≤50 ?	≤25 ?	God	Troligtvis god	Nej	?

Aska från avfall	≤50 ?	≤25 ?	God	Troligtvis god	Nej	?
Bergfiller	≤20 ?	≤20 ?	God	God	?	<
Gruvavfall	≤20 ?	≤20 ?	God	God	?	<
? okänd eller obestämnd ≈ ungefär lika < lägre >> mycket högre / << mycket lägre						

3.5.5 Klimatavtryck

En viktig faktor när det gäller miljöpåverkan från bindemedel är deras CO₂-avtryck, det vill säga hur mycket CO₂ som släpps ut vid tillverkningen av dem. Detta är speciellt framträdande för bindemedel som framställs av råmaterial som innehåller kalciumkarbonat, som är den huvudsakliga komponenten i kalkstens- och märelyfyndigheter. När kalciumkarbonat upphettas över 700 °C, avges CO₂. För varje kilo kalciumkarbonat avges 0,44 kg CO₂. Detta basutsläpp fås från alla bindemedel som tillverkas genom bränning av kalksten. Dessutom tillkommer CO₂ från det bränsle som används vid bränningen. Genom effektivisering av förbränningsprocessen och lämpligt val av bränsle kan dessa utsläpp minskas. Publicerade värden gällande CO₂-utsläpp för samma typ av bindemedel kan därför variera mycket beroende på vilken typ av bränsle som används och den faktiska effektiviteten hos förbränningsprocessen. Portlandcement (CEM I) har ett CO₂-utsläpp på mellan 750 och 940 kg/ton.

CO₂-avtryck är generellt lägre från alternativa bindemedel än från portlandcement, eftersom tillverkningen inte omfattar utdrivning av CO₂ ur råmaterialet. Alternativa bindemedel kan generera CO₂-utsläpp i de behandlingsprocesser, till exempel vid malning, torkning och kalcinerings (bränning vid lägre temperaturer), som kräver energi. Material som kräver kalcinerings behöver mer energi än de som enbart kräver malning.

Tabell 5 sammanfattar CO₂-utsläpp från ett antal alternativa bindemedel. Vissa data i denna tabell är osäkra eftersom det saknas robusta LCA-data för en del potentiella alternativa bindemedel. Vissa data är uppskattade värden. Utsläppen innefattar enbart utsläppen från tillverkningsprocessen. CO₂-utsläpp från produktionen av de

olika alternativa bindemedlen ger dock inte en fullständig bild över bindemedlets verkliga klimatavtryck. Transport av råmaterialet till ett blandcements tillverkningsställe, eller av det alternativa bindemedlet till betongfabriken påverkar klimatavtrycket. Ett material som finns tillgängligt nära användningsstället ger mindre belastning än ett material som måste transporteras långa sträckor, till exempel genom import från andra länder.

Tabell 5: CO₂-utsläpp från produktion av portlandcement och vissa alternativa bindemedel

Tabell 5: CO₂-utsläpp från produktion av portlandcement och vissa alternativa bindemedel.

Material	CO ₂ -utsläpp (kg CO ₂ /ton av materialet)
Portlandcement	750-940
GGBS	70-90
Flygaska	20-40
Silikastoft	120-150 ²
Naturliga icke-kalcinerade puzzolaner	30-50
Kalcinerad lera	80-120 ³
Kalksten	10-20
Metallslaggar	60-90 ¹
Bioaskor	40-60 ⁴
Avfallsaskor	40-60 ⁴
1) Uppskattning baserad på GGBS 2) Från databasen SimPro 3) Från Transportstyrelsen 4) Uppskattning baserad på flygaska	

Om man ser på klimatpåverkan av en konstruktion som helhet måste även dess beständighet och livslängd tas i beaktande. Ett material kan i sig vid tillverkningen ge ett lägre klimatavtryck, men resultera i att den konstruktion i vilken det används får sämre beständighet och kortare livslängd. Konstruktionen kan då behöva genomgå omfattande reparationer för att hålla den förväntade livslängden eller rivas och ersättas med en ny i förtid. Detta innebär betydligt större klimatpåverkan än om ett mer klimatpåverkande bindemedel som ger bättre beständighet använts.

4 Användning av alternativa bindemedel i vattenkraftanläggningar

4.1 KORT HISTORIK OM REGLER OCH ANVÄNDNING AV ALTERNATIVA BINDEMEDEL I SVERIGE

Fram till 1988 accepterades inga andra bindemedel i betong än de som förekom i olika typer av cement. De första svenska reglerna för cement för användning vid byggande, Statliga Cementbestämmelser, gavs ut 1923. Förutom portlandcement och aluminatcement specificerades då slaggcement med en GGBS-halt på max 30 %. Utöver dessa introducerades 1943 ett ersättningscement, E-cement, som innehöll icke-specificerade alternativa bindemedel, hade lägre hållfasthet och begränsad användning, vilket sedan plockades bort 1960. 1960 specificerades också GGBS-halten i slaggcement till mellan 25 % och 60 %.

1982 uppdaterades cementbestämmelserna på nytt. Utöver portlandcement (P) specificerades modifierat portlandcement (M) med högst 35 % hydrauliska eller puzzolana material, samt blandcement (B) med 20-65 % portlandcementklinker.

Användning av reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts i betongblandaren introducerades 1988. Det var ett par typer av flygaska (A och B), GGBS och silikastoft (max 10 %). Materialen skulle vara typgodkända och användningen skulle godkännas av "behörig myndighet".

Kraven på flygaska och silikastoft specificerades 1985, samt tillåten högsta halt i betong, 35 % respektive 10 %, räknat på mängden portlandcement.

1994 började Sverige anpassa sig till EU och till den europeiska förstandaren för cement ENV 197-1, till vilken ett svenskt anpassningsdokument utarbetades. Av de 27 cementtyperna som ingick i standarden ansågs nio vara beprövade för användning i Sverige, men bara de 6 av dessa vilka alla innehöll minst 80 % portlandcementklinker, godtogs i den miljö som vattenkraftsanläggningar då hänfördes till (Klass A2 med hänsyn till

armeringskorrosion och klass B3 med hänsyn till betongens beständighet).

År 2003 infördes den europeiska betongstandarden SS-EN 206-1 i Sverige och en svensk tillämpningsstandard till denna gavs ut, SS 137003, samtidigt som cementstandarden SS-EN 197-1, blev en fullvärdig harmoniserad EN-standard.

SS-EN 206 definierar nya exponeringsklasser, bland annat XF3. Krav på bland annat bindemedel och *vct* är nationellt valbart och anges i SS 137003. I den första utgåvan av SS 137003 fick liksom tidigare endast bindemedel med minst 80 % portlandcementklinker (max 20 % GGBS eller flygaska och max 10 % silikastoft) användas i XF3.

SS 137003 har därefter reviderats flera gånger. 2004 höjdes tillåten halt GGBS till 35 % och 2008 sänktes tillåten halt silikastoft till 5 % för XF3. Vad gäller användning av cement med minst 65 % portlandcementklinker men som innehåller andra huvudbeståndsdelar än GGBS, kiselrik flygaska, kalksten och silikastoft, så infördes 2021 möjligheten att använda dessa i XF3 om det aktuella cementet/bindemedelskombinationen kvalifikationsprovas enligt bilaga T i SS 137003:2021.

Om de gällande reglerna i SS 137003 för användning av olika bindemedel i exponeringsklasserna är relevanta eller inte, baserat på nya forskningsrön och erfarenheter från användning och fältförsök, ifrågasätts kontinuerligt. En exponeringsklass som utpekats som särskilt intressant att göra en djupare genomlysning av inför en eventuell framtida revidering av kraven på sammansättning, är just XF3.

4.2 GÄLLANDE OCH FRAMTIDA REGLER I SVERIGE OCH VISSA ANDRA EUROPEISKA LÄNDER

I Sverige bestäms accepterad sammansättning på bindemedel i olika exponerings-klasser av den svenska tillämpningsstandarden (SS 137003) till den europeiska betongstandarden SS-EN 206.

I XF3 är cement enligt SS-EN 197-1 och SS-EN 197-5 eller kombinationer av cement och tillsatsmaterial typ II som innehåller minst 65 % portlandcementklinker och högst 35 % GGBS, 35 % kiselrik flygaska, 5 % silikastoft eller 20 % kalksten allmänt accepterade. Cement med minst 65 % portlandcementklinker och de andra

huvudbeståndsdelarna som anges i SS-EN 197-1 (bränd skiffer, kalkrik flygaska, naturliga puzzolaner) kan också användas om de först kvalifikationsprovas enligt bilaga T i SS 137003. Kravet på $v_{ct_{ekv}}$ är $\leq 0,55$ för XF3. Dock sänks detta till 0,45 om bindemedlet innehåller mindre än 80 % portlandcementklinker och konstruktionen har ständigt hög fukthalt, som i vattenkraftsanläggningar.

När det gäller exponeringsklasserna med avseende på frostangrepp så har mycket forskning utförts för olika alternativa bindemedel i exponeringsklass XF4 (hög vattenmättnad, med avisningsmedel) finansierat av Trafikverket, vilket har lett till att de krav som ställs för den exponeringsklassen är väl underbyggda. När det gäller XF3 är dock underlaget för kraven i SS 137003 inte lika gediget, vilket av försiktighetsskäl eventuellt kan ha lett till väl hårda krav. I synnerhet är kunskapen bristfällig när det gäller hur alternativa bindemedel påverkar frostresistensen i denna miljö.

Vilka cement som godtas i XF3 i Sverige enligt senaste versionen av SS 137003 från 2024 framgår av Tabell 6 tillsammans med motsvarande regler från vissa andra europeiska länder. Informationen om de andra ländernas regler är dock hämtad från SIS-CEN/TR 15868:2021, vilket är en översyn som gjordes under 2016-2017. Eventuella ändringar i dessa länders regler som införts därefter finns alltså inte med i tabellen. För bindemedelskombinationer med cement och GGBS, flygaska eller silikastoft gäller i Sverige i princip samma begränsningar som om delmaterialen ingick i ett fabriksstillverkat cement.

En förändring som infördes 2021 i SS 137003 var möjligheten att använda många cement efter att man påvisat användbarhet genom kvalifikationsprovning enligt bilaga T i SS 137003. Innan dess fanns inget godkännande för alla de cementtyper som markerats med tabellnot 3 i Tabell 6

Tabell 6: Accepterade cement i Sverige i exponeringsklass XF3 i Sverige och vissa andra europeiska länder

Regler för XF3								
Enligt	SS 137003	SIS-CEN/TR 15868:2021 ⁽¹⁾						
	SE	FI	NO	CH	UK	DE	AT	FR/IT
$vc_{f_{ekv}}$	$\leq 0,55$ /0,45 ⁽⁵⁾	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$	$\leq 0,50$	$\leq 0,40$ /0,60	$\leq 0,50$ /0,55	$\leq 0,55$	$\leq 0,55$ FR $\leq 0,50$ IT
Cementtyp								Alla cement i EN 197-1
I	X	X	X	X	X	X	X	
IIA-S	X	X	X	X	X	X	X	
IIA-D	X ⁽⁴⁾	X	X	(X)	X	X	X	
IIA-V	X		X		X	X	X	
IIA-W	X ⁽³⁾							
IIA-L	X ⁽³⁾				X		X	
IIA-LL	X	X		X	X	X		
IIA-P	X ⁽³⁾					X		
IIA-Q	X ⁽³⁾					X		
IIA-T	X ⁽³⁾					X		
IIA-M	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	(X ⁽²⁾)		X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	
IIB-S	X	X			X	X	X	
IIB-V	X				X		X	
IIB-W	X ⁽³⁾							
IIB-P	X ⁽³⁾					X		
IIB-Q	X ⁽³⁾					X		
IIB-T	X ⁽³⁾					X		
IIB-L	X ⁽³⁾						X	
IIB-LL	X ⁽³⁾							
IIB-M	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾			X ⁽²⁾	X ⁽²⁾	
III-A		X		X	X	X	X	
III-B					X	X	X	
IV-A					X	X		
1) SIS-CEN/TR 15868:2021 En översikt av nationella bestämmelser vid tillämpning av den europeiska betongstandarden EN 206:2013								
2) Restriktioner av tillåtna beståndsdelar								

- | | |
|----|--|
| 3) | Kräver kvalifikationsprovning enligt SS 137003 bilaga T |
| 4) | $\leq 5 \%$ silikastoft är allmänt godkänt, 5-10 % silikastoft kan godkännas efter kvalifikationsprovning enligt bilaga T i SS 137003. |
| 5) | 0,45 om portlandcementklinkerhalten $< 80 \%$ vid ständigt fuktig betong, annars 0,55 |

En skillnad mellan de svenska reglerna och övriga länders regler är att i Sverige begränsas accepterade cement till de som innehåller minst 65 % portlandcement-klinker, medan de flesta övriga länderna godtar slaggcement med under 65 % portlandcementklinker och minst 35 % GGBS (CEM III/A). I Sverige gäller samma lägsta portlandcementklinkerhalt för bindemedelskombinationer med cement och tillsatsmaterial som för fabriksstillverkade cement.

När det gäller konstruktionsregler för kraftverksanläggning, så har inte de gällande eurokoderna (SS-EN-standarder för dimensionering med hänsyn till bärförmåga, stadga och beständighet), gällt eller varit tillämpliga för dammbyggnader. Dimensionering har därför skett enligt de svenska riktlinjerna för dammsäkerhet (RIDAS) som, baserat på eurokoden för betongkonstruktioner har gjort anpassningar som återfinns i TV9 (tillämpningsvägledning för betongdammar). Dessa är dock inte heltäckande då t.ex. anpassning av stabilitetsberäkningar inte genomförts än.

Eurokoderna är dock under omarbetning och undantaget för dammar kommer att försvinna. De nya kommer att börja introduceras i Sverige om ett par år.

En nyhet i de nya eurokoden för betong är introduktion av "Exposure Resistance Classes" (ERC). ERC-konceptet bygger på att betong ska klassificeras med hänsyn till beständighet. I första skedet enbart med avseende på kloridinträngning och karbonatisering. ERC-klasserna är sedan grund för val av täcksikt. Inklassning av betong i ERC-klasser kan sedan göras genom funktionsprovning av en betongs kloridmotstånd respektive karbonatiseringsmotstånd. Detta kommer att underlätta introduktion av bindemedel. Det traditionella systemet där reglerna anger vilka bindemedel som är godkända och hur de ska användas (så kallade *deemed-to-satisfy*-regler) kommer dock att fortleva parallellt. En fördel med att även behålla detta är att betong med bindemedel som använts länge i Sverige inte behöver provas inför varje användning. Systemet var tänkt att vara helt harmoniserat, med samma klasser i hela Europa, men man lyckades inte nå konsensus på europanivå om hur de skulle se ut. Själva grunden för systemet finns dock infört, men hur det ska se ut mer detaljerat och

hur det ska tillämpas kommer att kunna bestämmas nationellt. I Sverige har ett arbete med att ta fram svenska tillämpningsregler för ERC-konceptet startats i Svenska Betongföreningens regi vilket kommer att utmynna i en betongrapport. Målet är att tillhandhålla underlag för revidering av både material- och konstruktionsstandarderna för betong, SS 137003 respektive tillämpningen av betong-eurokoden i Sverige. I de svenska reglerna är det även tänkt att ange ERC-klasser för frostbeständighet.

4.3 KRAV PÅ CERTIFIERING

I Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktions-standarder (eurokoder), BFS 2011:10 med ändringar till och med BFS 2022:4, (EKS) står följande:

Material

17 § Material till bärande konstruktioner, inklusive jord och berg, ska ha kända, lämpliga och dokumenterade egenskaper i de avseenden som har betydelse för deras användning. (BFS 2015:6).

Byggprodukter med bedömda egenskaper

Metoder för bedömning

18 § Med byggprodukter med bedömda egenskaper avses i denna författning produkter som tillverkats för att permanent ingå i byggnadsverk och som antingen

- är CE-märkta,
- är typgodkända och/eller tillverkningskontrollerade enligt bestämmelserna i 8 kap. 22–23 §§ PBL,
- har certifierats av ett certifieringsorgan som ackrediterats för uppgiften och för produkten i fråga enligt förordning (EG) nr 765/2008 av den 9 juli 2008 om krav för ackreditering och marknadskontroll i samband med saluföring av produkter och upphävande av förordning (EEG) nr 339/931, eller
- har tillverkats i en fabrik vars tillverkning och produktionskontroll och utfallet därav för byggprodukten fortlöpande övervakas, bedöms och godkänns av ett certifieringsorgan som ackrediterats för uppgiften och för produkten ifråga enligt förordning (EG) nr 765/2008.

Motsvarande gäller även för transportsektorn.

CE-märkning baseras på harmoniserade EN-standarder eller på en europeisk teknisk bedömning (ETA) av byggprodukter. Enbart vissa

EN-standarder för produkter är harmoniserade och kan användas för CE-märkning. För CE-märkning mot harmoniserade standarder krävs, för produkter som har betydelse för ett byggnadsverks bärförmåga, inblandning av ett oberoende tredjepartsorgan som anmälts för den aktuella produktstandarden, vilket kan vara ett organ i Sverige eller normalt inom EU. För CE-märkning mot ETA så är ett nationellt organ som ingår i EOTA (European Organisation for Technical Approvals) involverat.

För produkter som inte omfattas av harmoniserade EN-standarder men av andra EN-standarder kan alternativ c eller d ovan tillämpas. Dessa alternativ kan även tillämpas för produkter till vilka det finns nationella produktstandards eller andra etablerade produktspecifikationer. De ackrediterade certifieringsorganen behöver inte vara svenska.

Alternativ b, typgodkännande är däremot ett svenskt system, och det finns i Sverige idag två organ som kan utfärda typgodkännande. Till skillnad från de andra alternativen (a, c och d) innebär ett typgodkännande att produkten uppfyller svenska krav. För alternativ a, b och d innebär bedömningen enbart att produkten uppfyller deklarerade krav. Om egenskaperna är tillräckliga för den aktuella tillämpningen är det användarens ansvar att kontrollera.

Harmoniserade standarder kan bara utarbetas för väl etablerade produkter, och processen från det att ett förslag om att utarbeta en ny standard har accepterats till att standarden kan publiceras tar flera år. ETA-spåret är tänkt för mer innovativa produkter. I det fallet ber en tillverkare ett EOTA-organ ta fram ett europeiskt tekniskt bedömningsdokument (EAD) för produkten som fungerar som en produktspecifikation gentemot vilken ett ETA kan utfärdas och produkten CE-märkas. Hur lång tid denna process tar varierar beroende på flera faktorer, bl.a. produktens komplexitet och hur snarlik den är produkter som omfattas av harmoniserade standarder eller någon existerande EAD. Normalt är tiden kortare än för harmoniserade standarder. I både harmoniserade standarder och EAD specificeras vilka egenskaper som ska eller kan kontrolleras och hur och hur ofta det ska ske. Det finns möjlighet för en tillverkare att ange NPD (*no performance determined*) på egenskaper i det fall denne anser att egenskapen i fråga inte är relevant för den aktuella tillämpningen eller för det land där produkten ska sättas på marknaden.

Certifiering enligt alternativ c eller d kan göras mot olika typer av produkt-specifikationer. Att ackreditera sig för en viss produkt-specifikation medför dock kostnader för ett certifieringsorgan, och för att det ska vara värt det krävs det normalt att det finns mer än en kund, såvida inte någon enskild kund har omfattande behov av certifiering. Det kan därför för en tillverkare vara svårt att få tag på ett certifieringsorgan som är ackrediterat för en viss produkt. En produkt certifierad enligt alternativ c eller d av ett utländskt certifieringsorgan, kanske till och med mot en utländsk standard eller produkt-specifikation anses ha bedömda egenskaper. Användaren måste dock kontrollera att egenskaperna uppfyller svenska prestandakrav.

Det mest flexibla och snabba alternativet för nya produkter är ett typgodkännande enligt alternativ b. Detta blir dock formellt sett bara giltigt i Sverige.

Om en produkt inte har bedömda egenskaper bär byggherren det fulla ansvaret för att genom en omfattande mottagningskontroll säkerställa att produktens egenskaper uppfyller ställda prestandakrav och ger byggnadsverket den säkerhet när det gäller de väsentliga samhällskraven, till exempel bärförmåga stadga och beständighet, som samhällets föreskrifter anger.

4.4 PRAXIS

4.4.1 I Sverige

Även om det i Sverige för XF3 generellt har godtagits bindemedel med upp till 35 % annat än portlandcement sedan 2004 års utgåva av SS137003 f, så har man varit restriktivare med användning av GGBS, flygaska och silikastoft i anläggningskonstruktioner genom reglering i AMA Anläggning [11], som större beställare av anläggningskonstruktioner hänvisar till för materialkrav vid upphandling. I Tabell 7 anges vilka restriktioner utöver de som angetts i SS 137003 som AMA Anläggning har specificerat för exponeringsklass XF3. Även om vissa begränsningar enbart gäller broar, har de ofta också tillämpats för andra anläggningskonstruktioner.

Tabell 7: Restriktioner för GGBS, flygaska och silikastoft för XF3 i AMA Anläggning utöver de som anges i avsnitt 4.2

Utgåva av AMA Anläggning	Restriktioner utöver de som anges i betongregler och standarder (avsnitt 4.2)
1998	Max 5 % silikastoft. Enbart lågalkaliskt sulfatresistent CEM I. Tillsatsmaterial kräver godkännande i varje enskilt fall.
2010	För broar: Enbart lågalkaliskt sulfatresistent CEM I och max 11 % flygaska. Inga särskilda restriktioner i övrigt.
2013	För broar: Enbart lågalkaliskt sulfatresistent CEM I, och max 20 % flygaska och max 10 % GGBS. Inga särskilda restriktioner i övrigt.
2017	Max 20 % GGBS
2020	Inga restriktioner
2023	Inga restriktioner

Den skepsis mot speciellt GGBS som funnits under en längre tid i Sverige grundar sig på vissa dåliga erfarenheter av beständighet hos betong i vattenkraftsanläggningar där slaggcement enligt tidigare cementregler använts (se avsnitt 4.1). Den GGBS som då användes var dock inte lika noggrant specificerad som den som används idag i cement enligt SS-EN 197-1 eller SS-EN 197-5 eller som tillsatsmaterial enligt SS-EN 15167-1. De beständighetsregler som gällde vid den tidpunkten gjorde heller inte skillnad på betong med olika cementtyper.

4.4.2 I Norden

Exempel på bindemedel i några dammar av olika ålder i våra grannländer Norge och Island ges i Tabell 8.

Tabell 8: Exempel på dammkonstruktioner i Norge och Island

	Bindemedel	Kommentarer
Norge – Votna I (60-talets mitt)	100 % CEM I	Dammen har omfattande problem med ASR. Kräver tunga och dyra reparationer
Norge -Alta (tidigt 80-tal)	CEM I+ silikastoft (okända proportioner)	Silikastoft användes för att minska värmeutveckling och sprickbildning
Norge– Sarvsfossen (tidigt 2010-tal)	70% CEM I 25% flygaska 5% silikastoft	Bindemedlet designat för en maxtemperatur på 65°C

Island – Kárahnjúkar (2003-2010)	Sprutbetong: CEM II/A-M 42.5R (med 6% silikastoft) Konstruktionsbetong: CEM II/A-V 42.5R + 20% FA	Betongtäckt stenfylld massivdamm. 590 m.ö.h.
-------------------------------------	--	---

I Island föreskrivs användning av ballast som inte är alkalireaktiv för konstruktioner som kraftverksdammar och/eller användning av lågalkaliskt cement. Ett speciellt isländsk cement med 25 % ryolit (naturlig puzzolan) och 10 % silikastoft har utvecklats för denna användning.

4.4.3 I övriga Europa

Exempel på bindemedel i några dammar av olika ålder i övriga Europa ges i Tabell 9

Tabell 9: Exempel på dammkonstruktioner i Schweiz, Frankrike och Spanien

	Bindemedel	Kommentarer
Schweiz– Luzzzone	80% CEM I 20% flygaska	Flygaska användes för att undvika artificiell kylning. Bindemedelshalt 250 kg/m ³
Schweiz – Barberine)	Icke-specifierat cement	w/c = 0,8 och bindemedelshalt 200 kg/m ³
Schweiz – Spitallamm (ny)	CEM I + flygaska (okända proportioner)	Ersätter en gammal damm med sprickor. Belägen 1900 m över havsytan.
Frankrike– Galens	CEM III/B 42.5N-LH/SR 28,5% klinker + 71% GGBS	Cementet var finkornigt och kalkstensfyller användes. Sprickor uppstod vid basen av mittkonsolerna nära kontaktytan mot undergrunden.
Spanien – Enciso (före 2012)	50-70 kg/m ³ CEM I 70-150 kg/m ³ flygaska/naturliga puzzolaner	Vältbetong

I Schweiz har många vattenkraftsdammar problem med ASR-skador och man använder alternativa bindemedel för att minska risken för skadlig expansion.

4.4.4 I Nordamerika

I Tabell 10 anges bindemedel använda i vattenkraftsanläggningar i två fall i Kanada.

Tabell 10: Exempel på dammkonstruktioner i Kanada

	Bindemedel	Kommentarer
Kanada – Magpie river (slutet av 80-talet)	50% Cem ^a 50% GGBS	Inga kända problem. Sammansättning designad för att undvika ASR-problem.
Kanada – Les Cèdres	Cem ^a , flygaska, silikastoft (okända proportioner)	Uppgradering av flera dammar ursprungligen byggda mellan 1914 och 1971.
^a Troligtvis cement som bara innehåller portlandcement och eventuellt kalkstensfiller		

I Kanada har många vattenkraftsdammar ASR-skador och användning av alternativa bindemedel har visat sig kunna förhindra problem med ASR. Det pågår forskning om användning av bindemedel med kalksten och kalcinerad lera (LC3) i vattenkraftsdammar.

Historiskt har man använt cement som är mer belitrika än vanligt portlandcement (HBC) i betong för vattenkraftsanläggningar, t.ex. i Hooverdammen i USA på 1930-talet, på grund av att de har lägre värmeutveckling än vanligt portlandcement. Dessa cement innehåller mer av cementfasen belit och har lägre förhållande mellan CaO och SiO₂ än vanligt portlandcement. De ger dessutom lägre koldioxidavtryck än vanliga portlandcement. Användningen av belitrika cement var dock mycket begränsad på grund av vissa ofördelaktiga egenskaper, t.ex. en längre bindetid, fram till 1970-talet då det åter aktualiserades som ett låg-energicement under oljekrisen. Det svenska Limhamn LH-cementet, utvecklat runt 1930, och använt fr.o.m. mitten av 1930-talet t.o.m. ca 1980 var väldigt likt det cement som användes i Hooverdammen.

4.4.5 I Asien

I Tabell 111 anges bindemedel använda vid treprojekt med vattenkraftsdammar i Kina.

Tabell 11: Exempel på dammkonstruktioner i Kina

	Bindemedel	Kommentarer
Kina – Three Gorges (1990-talet)	Cem ^a & 10-30-40% flygaska (beroende på läge) Cement med hög belithalt (HBC) & flygaska	Belitrikt cement och flygaska för att minska värmeutvecklingen. Karbonatisering och urlakning förändrade yta, men påverkade inte prestandan.
Kina - Naheng	Cem ^a + 60 - 70% flygaska	
Kina - Liujiaxia	Cem ^a & FA (beroende på läge)	Viss sprickbildning
^a Troligtvis cement som bara innehåller portlandcement och eventuellt kalksensfiller		

Under 1990-talet började cement med hög belithalt (HBC) användas i industriell skala i Kina.

5 Diskussion

Betong är ett mycket användbart byggmaterial och i flera fall det enda lämpliga för många typer av konstruktioner. Sedan ett decennium har ett miljöfokus inom byggbranschen skapat stort intresse för alternativa bindemedel som ersätter en del av det koldioxidtunga portlandcementet i betong. Under flera år har branschen fokuserat på teknisk prestanda och beständighet, då många betongkonstruktioner dimensioneras för över hundra års livslängd. Tillgången på portlandcement har varit och är god och behovet av att byta portlandcement mot andra likvärdiga material var inte så uttalat, förrän klimatförändringar hamnade högt upp på allas agendor. Utveckling av alternativa bindemedel befinner sig just nu i en mycket intensiv fas. Detta gäller inte bara Sverige utan även hela övriga världen. För att kunna navigera bland alla valmöjligheter behövs det en samlad bild över vad, hur och när det är lämpligt att använda de olika nya alternativa bindemedlen.

Sammansättningen av betong för svenska vattenkraftsanläggningar styrs idag av SS 137003. Det hänförs normalt till exponeringsklass XF3 (fuktig konstruktion utsatt för frysning utan närvaro av salt) för vilken SS 137003 anger begränsningar. Den lägsta accepterade halten av portlandcement är minst 65 % (2024) vilket innebär att högst ca 32 % av bindemedlet kan bestå av alternativa bindemedel.

De standardiserade och certifierade alternativa bindemedel som kan förekomma i både ett blandcement och blandas in i en betongblandning är GGBS, kiselrik flygaska och silikastoft. Masugnsslagg produceras i Sverige (ca 100–200 kt/år) men de andra måste importeras, med de negativa effekterna på koldioxidavtrycket som långa transporter innebär. Vissa alternativa bindemedel är bara standardiserade då de förekommer i ett blandcement; som kalkstensfiller, puzzolaner, kalkrik flygaska, och bränd skiffer.

Masugnsslagg började användas redan på 1800-talet och andra alternativa bindemedel har funnits och har använts på den europeiska marknaden i över 70 år. Det finns ännu äldre exempel på användning av naturliga puzzolaner men då var det för oarmerade konstruktioner på varmare breddgrader än Norden. Det finns akvedukter som byggdes av romarna för flera tusen år sedan som fortfarande är i drift och förser olika samhällen med vatten.

Masugnsslagg och kiselrik flygaska från kolförbränning har använts mycket i länder där man efter andra världskriget hade både begränsad tillgång på rent portlandcement samt en stor produktion av masugnsslagg vid tackjärns-tillverkning och flygaska från förbränningsanläggningar för kol. Östra Europa och Centraleuropa samt Storbritannien har länge haft god tillgång på alternativa bindemedel, vilket har lett till en utbredd användning av andra typer av bindemedelssammansättningar än i Sverige. Den internationella kartläggningen tyder på att en ersättningsnivå av portlandcement på upp till 70% har förekommit i vissa länder.

Ett flertal nya alternativa bindemedel och tillsatsmaterial kommer med stor sannolikhet att inkluderas i SS 137003 vilket öppnar för fler möjligheter, men också för fler ifrågasättanden av deras inverkan på betongens prestanda och beständighet. En ny svensk standard för naturliga och kalcinerade naturliga puzzolaner kommer att lanseras inom kort och den kommer troligtvis att vara inarbetad i tillämpningsstandarden SS 137003 under 2025.

Naturliga puzzolaner som kalcinerade naturliga puzzolaner i cement finns redan på den europeiska marknaden men erfarenhet kring långtidsegenskaper i ett nordiskt klimat är fortfarande mycket begränsad. Det finns god tillgång på kaolinlera i Sverige som kan aktiveras till en puzzolan, men det finns ingen inhemsk produktion av cement med kalcinerad eller mekaniskt aktiverad lera i dagsläget. Under 2024 har ett nytt cement med importerad vulkanaska, som är en naturlig puzzolan, börjat produceras i Sverige. Detta ökar valmöjligheten när det gäller alternativa bindemedel i Sverige. Den vetenskapliga kunskapen om och erfarenheter av naturliga eller aktiverade puzzolaner är mycket begränsad i Sverige. Det behövs mer forskning kring användning av dessa material som alternativt bindemedel och i grova konstruktioner som är utsatta för vatten och frost. Då dessa material finns tillgängliga idag genom import och potentiellt kan komma att bli tillgängligt genom svensk produktion, bör denna forskning om naturliga och aktiverade puzzolaner ha hög prioritet.

Forskning samt provning av de i Sverige använda standardiserade alternativa bindemedel för olika applikationer, framför allt inom infrastrukturbetong, har fokuserats på den strängaste frostmiljön, exponeringsklass XF4 i vilken fuktig betong utsätts för frysning i närvaro av salt. Detta har lett till relativt hårda krav för den exponeringsklassen. För att validera dessa krav och de metoder som

används för att förprova betong pågår omfattande fältförsök i saltfrostmiljö med olika typer av bindemedel för att säkerställa att utvärderingsmetoderna motsvarar observationer från verkliga exponeringsmiljöer.

Det vetenskapliga och verifierade underlaget för XF3 i SS 137003 är inte lika omfattande som för XF4, vilket av försiktighetsskäl eventuellt kan ha lett till att kraven är alltför hårda. I synnerhet är kunskapen bristfällig när det gäller hur alternativa bindemedel påverkar frostresistensen i denna miljö. En exponeringsklass som utpekats som särskilt intressant att göra en djupare genomlysning av och då ta i beaktande erfarenheter och regler i andra länder med liknade klimat inför en eventuell framtida revidering av sammansättningskraven i SS 137003 är just XF3. Dessutom är det så att den i Sverige använda frostprovning-metoden som används både för XF3 och XF4 ursprungligen är framtagen för betong med portlandcement. Dess relevans, i synnerhet för XF3 och när den ska tillämpas på betong med de nya material som kommer introduceras på marknaden, kan ifrågasättas.

Vissa av de standardiserade alternativa bindemedlen, företrädesvis förekommande i blandcement, har vi inte haft några erfarenheter av i Sverige då sådana cement inte varit aktuella på den svenska marknaden. Då dessa cement har använts i andra länder kan man förutsätta att påverkan på betongens tekniska egenskaper är rätt väl kända. Det som i första hand behöver verifieras är hur de fungerar i ett nordiskt klimat och om de provningsmetoder vi använder för att verifiera beständigheten är tillämpbara på betong med dessa cement. För detta krävs ofta validering mot långvariga fältförsök, därför rekommenderas att utvärdera lämpligheten av alla nya alternativa bindemedel som kommer att vara aktuella inom snar tid såväl genom laboratorieprovningar som i fält i verklig älvmiljö.

När det gäller helt nya material, från nya källor, är steget till introduktion längre. Till att börja med kan antaganden om deras inverkan på betongegenskaperna baseras på deras likhet med andra mer beforskade material. Det kan gälla kemisk sammansättning, reaktionssätt, reaktivitet, korstorleksfördelning, grad av homogenitet, renhet och dylikt. Dessa antaganden måste dock verifieras eller modifieras baserat på forskning och försök. Detsamma gäller inverkan på beständigheten. För ett material med homogen sammansättning med stor likhet med ett redan accepterat material kan detta steg vara

betydligt kortare än för ett material med stor variation i sammansättning eller där likheten med etablerade material är liten.

Begränsningarna som funnits i svenska regler när det gäller användning av alternativa bindemedel har stegvis lättats sedan ca 20 år, och större mängder av de standardiserade ersättningsmaterialen GGBS, flygaska och silikastoft har kunnat användas i vattenkraftsanläggningar. Trots detta så har denna möjlighet inte slagit igenom i någon högre grad i praxis. En faktor som tvingat fram en viss ökning av halten alternativa bindemedel är att det rena portlandcementet som producerats i Sverige och som varit anpassat för anläggningskonstruktioner på grund av bl.a. lägre värmeutveckling än ordinärt cement, har ersatts av ett CEM II/A-V med ca 16 % flygaska.

I takt med att reglerna blir mer tillåtande när det gäller användning av de standardiserade alternativa bindemedlen kan man förvänta att cement med högre halter av dessa material kommer att introduceras på den svenska marknaden.

6 Slutsatser

Under det senaste decenniet har utveckling och användning av alternativa bindemedel ökat i Sverige och i övriga världen. Den största drivkraften har varit behovet av att minska klimatavtrycket hos betong. Introduktion av de olika alternativa bindemedlen är beroende av:

- kunskap och osäkerheter när det gäller materialens inverkan på betonegenskaperna i relation till den avsedda miljön,
- möjlig ersättningsnivå,
- tillgänglighet på materialen och
- direkta eller indirekta kostnader förknippade med deras användning.

Tekniska krav på betong för vattenkraftsanläggningar:

- Sammansättning av betong för svenska vattenkraftsanläggningar som hänförs till exponeringsklass XF3 styrs idag av SS 137003.
- De viktigaste tekniska kraven som de nya alternativa bindemedlen ska uppfylla är de ska ge betongen god frostbeständighet, hög täthet, högt motstånd mot skadlig ASR, god säkerhet mot sprickbildning (temperatursprickor och plastiska sprickor), god gjutbarhet och bra motstånd mot korrosion orsakad av karbonatisering.
- Det finns ett antal godkända och certifierade alternativa bindemedel som kan användas för olika exponeringsklasser med väl bestämda nivåer på ersättning. De som kan användas idag är GGBS, flygaska och silikastoft.
- Det finns en begränsad mängd data över hur de nya alternativa bindemedlen påverkar alla dessa egenskaper. De åtgärder som krävs för att motverka eventuella negativa effekter får inte orsaka alltför stora kostnader eller vara alltför svåra att genomföra i praktiken.

Möjlig ersättningsnivå och praxis:

- Enligt betong- och cementstandarder kan betong tillverkas med så låg portlandcementhalt i bindemedlet som 5 % om resten utgörs av ett latent hydrauliskt material som GGBS. Om det alternativa bindemedlet utgörs av ett puzzolant material begränsas andelen normalt runt 50 %. För silikastoft gäller dock gränsen 10 %. För nästan inerta material begränsas halten vanligtvis till 20 %. Det är dock inte validerat att cement med dessa höga halter av alternativa bindemedel är lämpligt i alla miljöer, till exempel i fuktig miljö utsatt för frost som i vattenkraftsanläggningar.
- Enligt gällande version (2024) av SS 137003 är den högsta tillåtna halten av alternativa bindemedel ca 32% i Sverige. Det finns planer på att göra en översyn av huruvida detta krav är befogat.
- Begränsningarna som funnits i svenska regler när det gäller användning av alternativa bindemedel har stegvis lättats sedan ca 20 år, och större mängder av de standardiserade ersättningsmaterialen GGBS, flygaska och silikastoft har kunnat användas i vattenkraftsanläggningar. Trots detta så har denna möjlighet inte slagit igenom i någon högre grad i praxis. En faktor som tvingat fram en viss ökning av halten alternativa bindemedel är att det rena portlandcementet som producerats i Sverige och som varit anpassat för anläggningskonstruktioner på grund av bl.a. lägre värmeutveckling än ordinärt cement, har ersatts av ett CEM II/A-V med ca 16 % flygaska.
- I takt med att reglerna blir mer tillåtande när det gäller användning av de standardiserade alternativa bindemedlen kan man förvänta att cement med högre halter av dessa material kommer att introduceras på den svenska marknaden.

Tillgänglighet:

- De alternativa bindemedel som används i någon omfattning i Sverige idag är GGBS, kiselrik flygaska, kalksten och för särskilda tillämpningar silikastoft.
- De standardiserade alternativa bindemedlen GGBS, kiselrik flygaska och silikastoft finns i begränsade och minskande mängder.

- Det är bara GGBS som produceras i Sverige och mängden kommer att minska pga. miljöåtgärder inom stålproduktionen.
- Kalkstensfiller är ett lågreaktivt material och det finns tillgängligt i betydande mängder i Sverige men kan ersätta relativt små mängder portlandcement.
- Naturliga puzzolaner som vulkaniska askor eller sedimentära avlagringar måste importeras från andra länder, t.ex. från Island, Tyskland eller södra Europa.
- Sverige har god tillgång till lermineral som kan aktiveras till en puzzolan och fungera som ett alternativt bindemedel, men i dagsläget finns ingen sådan produktion i landet. Kaolinlera är den som är mest beforskad, men den finns vanligtvis i områden där brytning och bearbetning kan orsaka intressekonflikter. Kaolinlera används också för tillverkning av andra produkter, t.ex. porslin.
- Andra typer av leror, t.ex. illit, som också skulle kunna aktiveras till puzzolaner, finns det relativt gott om i Sverige men kunskapen om dem är begränsad och bör utvecklas vidare.
- Material som bioaskor finns i relativt små mängder och deras egenskaper är av varierande kvalitet. Det finns några försök till tillämpning av askor från spannmålsförbränning.
- Filler av bergmaterial och gruvavfall och andra icke-reaktiva restmaterial finns i stora volymer men användning av dessa som bindemedel har inte studerats.
- Slagger från andra metallurgiska processer och bottenaskor/slagg från kraftvärmeverk finns i stora volymer. Några har visat en god potential som reaktiva alternativa bindemedel. När det gäller vissa metallurgiska slagger pågår intensiv forskning och utveckling initierad av metaltillverkarna. För vissa andra material befinner sig forskningen fortfarande i en tidig fas.

Teknisk mognadsgrad och osäkerheter:

- Flera av de potentiella bindemedlen befinner sig på en hög teknisk mognadsgrad. Det som är mest undersökt är deras

reaktivitet och inverkan på mekaniska egenskaper, men det saknas ofta studier om påverkan på betongens beständighetsegenskaper i olika miljöer.

- Den tekniska mognadsgraden av nya bindemedel är avhängig av utvecklingen av kemiska tillsatsmedel. Det finns en utveckling av tillsatsmedel för naturliga puzzolaner men deras inverkan på beständighet är inte utvärderad eftersom de inte har funnits på marknaden.
- Generellt har alla alternativa bindemedel en lägre värmeutveckling och hållfasthetsutveckling i tidig ålder vilket kan göra betongen mer känslig för uttorkning i tidigt skede. Detta kan kräva mer omfattande åtgärder vid och efter gjutningsarbetet.
- Den låga värmeutvecklingen är å andra sidan positivt för att förhindra uppkomst av temperatursprickor.
- Utveckling av nya bindemedel kräver stora ekonomiska investeringar. Det saknas en tydlig bild över prisläget för nya bindemedel i och med att de inte är kommersiellt tillgängliga. Det finns ingen storskalig produktion av de material som kan vara aktuella på längre sikt. Produktionen av potentiella bindemedel kan komma att kräva en intensiv bearbetning av restmaterialen där olika utmaningar finns i form av förekomst av klorider, tungmetaller och av en varierande sammansättning.
- För att ett material ska kunna användas i betong till bärande konstruktioner med livslängder på uppåt 100 år, måste de ha en jämn och specificerad kvalitet. Det vill säga det måste uppfylla en produktspecifikation, och kvaliteten måste kontrolleras och övervakas regelbundet.
- För väl etablerade produkter utgörs specifikationen normalt av en standard, som för svenska förhållanden oftast är europeisk eller svensk. Kvalitetskontrollen sker ofta genom någon typ av certifiering av ett oberoende tredjepartsorgan, det kan vara CE-märkning eller ackrediterad produktcertifiering.

- För mer innovativa material kan europeiska typgodkännande (ETA) eller nationella typgodkännanden som är anpassade för en specifik produkt vara aktuella.

Alternativa bindemedel som kan vara aktuella inom närmaste tiden:

- Under 2024 har ett nytt cement med naturliga puzzolaner (ca 18-20%) börjat produceras i Sverige. Detta cement kommer att vara allmänt tillåtet för användning i betong för vattenkraftanläggningar tidigast 2025. Det kan dock användas efter kvalifikationsprovning dessförinnan.
- En reviderad SS 137003 som omfattar naturliga puzzolaner kommer troligtvis att publiceras under 2025, vilket medför att cement med naturliga puzzolaner och naturliga puzzolaner som tillsatsmaterial därefter kan användas utan kvalifikationsprovning.
- Naturliga puzzolaner är vulkanaska, kalcinerad lera och andra sedimentära material som uppvisar puzzolana egenskaper.
- Det rekommenderas att utvärdera beständigheten hos de nya alternativa bindemedlen genom fältförsök i verklig älvmiljö som kompletteras med provningar i laboriemiljö.
- Det pågår ett standardiseringsarbete i Sverige för att inkludera andra typer av puzzolaner än de naturliga, t.ex. vissa metallslagger, men det kommer att ta ytterligare minst ett år.
- Det förekommer även initiativ till standardisering av fler alternativa bindemedel på europainivå, men den processen är något mer tidskrävande än vid nationell standardisering då olika länders önskemål ska koordineras.

7 Behov för vidare utveckling

Det finns ett stort intresse för att introducera nya bindemedel som ersätter delar av portlandcement på marknaden. Portlandcement och alternativa bindemedel används för att producera betong för olika typer av konstruktioner som ska hålla god kvalitet under en lång tid.

- Det finns ett uttalat behov av kunskapsuppbyggnad när det gäller alternativa bindemedel. För vissa gäller det grundläggande karakterisering av deras egenskaper och deras inverkan på betong och dess beständighet. För andra är det främst beständighetsegenskaper i ett nordiskt klimat som det råder osäkerhet om.
- Det finns ingen eller mycket begränsad grundläggande forskning om vissa nya potentiella bindemedel.
- Det behövs mer forskning om kombinationer av olika alternativa bindemedel och hur de påverkar betongens egenskaper.
- Utvärderingsmetoder för betong baseras på portlandcement och det som har noterats inom forskningen om GGBS och kiselrik flygaska visar att de befintliga metoderna inte alltid är anpassade till andra material med annan hållfasthetstillväxt. Metoder kan behöva modifieras eller nya metoder utvecklas för att kunna ta fram provningsresultat som realistiskt återspeglar egenskaperna hos betong med de nya materialen.
- Det behövs en relevant metod för undersökning av sprickrisk hos massiva konstruktioner med alternativa bindemedel.
- Sättet att utvärdera och prova frostbeständighet behöver ses över, speciellt för exponeringsklass XF3.
- Fältprovningar behövs för att kunna validera laboratorieförsök på betong med alternativa bindemedel med exponering verklig miljö.
- Produktspecifikationer som underlag för certifiering av material saknas och behöver förberedas.

8 Referenslista

8.1 LITTERATURHÄNVISNINGAR

- [1] G. M. Mortensen, H. Tarras, M. Göransson, O. Taromi Sandström, K. Malaga, E. Helsing, P. Utgenannt och E. Sundling, "Alternativa bindemedel till betong -En sammansfattning a vkunskapsläget i etthållbarhetsperspektiv, Rapportering av regeringsuppdrag, Diarie-nr: 31-841/2022, RR 2023:2," SGU, 2023.
- [2] M. Strand, M. Westerberg Wilde, M. Rosenqvist och M. Janz, "Betong för vattenkraftsbyggnad, RApport 2020:653," Energiforsk, 2020.
- [3] AB Svensk Byggtjänst , Betonghandbok - Material Del I, Stockholm: AB Svensk Byggtjänst , 2017.
- [4] A. Oliva Ribera, K. Malaga och U. Mueller, "Accelerated Carbonation of Binders Containing SCM at High CO₂ Concentration". Nordic Concrete Research, E-ISSN 2545-2819, Vol. 69, nr 2, s. 1-10
- [5] F. W. Locher , "Cement: Principles for production and use, ISBN: 3-7640-0559-7," Verlag Bau & Technik GmbH,, 2006.
- [6] U. Mueller, K. Malaga och G. Plusquellec, "Potential for use of activated clays in concrete in Sweden Roadmap, RISE Rppart 2021," RISE, Borås, 2021.
- [7] G. Plusquellec, A. Babaahmadi , E. L'Hopital och U. Mueller, "Activated clays as supplementary cementitious material, RISE Rapport 2021:25," RISE, Borås, 2021.
- [8] A. Babaahmadi, U. Mueller, G. Plusquellec, M. Engdahl och M. Erlström, "Calcined clay as supplementary cementitious material. A feasibility study in Sweden," i *15th International Congress on the Chemistry of Cement*, Prag, 2019.
- [9] M. Juenger, J. L. Provis, J. Elsen, W. Matthes, D. Hooton, J. Duchesne, L. Courard, H. He, F. Michel, R. Snellings och N. D. Nele De Belie, "Supplementary cementitious materials for concrete: Characterization needs," i *Materials Research Society symposia proceedings*, 2012.
- [10] Ragnsells, "Ash2Salt," 2024. [Online]. Available: <https://www.ragnsells.se/om->

oss/foretagsfakta/affarsomraden/treatment-detox/ash2salt-anlaggning/. [Använd 12 Juni 2024].

- [11] AB Svensk Byggtjänst, AMA Anläggning - Allmän material och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten, Senaste utgåva 2023, tidigare utgåvor bl.a. 1998, 2010, 2013, 2017, 2020, 2023.
- [12] EC, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf.

8.2 REFERERADE STANDARDER

Tabell 12: Standarder utgivna av SIS, i nummerordning

Beteckning i rapporten	Fullständig beteckning
SS-EN 206	SS-EN 206:2013+A1:2021 Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse
SS-EN 197-1	SS-EN 197-1:2011 Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement
SS-EN 197-5	SS-EN 197-5: 2021 Cement –Del 5: Portland-kompositcement CEM II/C-M och kompositcement CEM V
SS-EN 197-6	SS-EN 197-6:2023 Cement – Del 6: Cement med återvunna byggnadsmaterial
SS-EN 450-1	SS-EN450-1:2012 Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse
SS-EN 13263-1	SS-EN 13263-1:2005+A1:2009 Silikastoft till betong –Del 1: Definitioner, krav samt kriterier för överensstämmelse
SS 137003	SS 137003:2021 Betong - Användning av EN 206:2013+A1:2016 i Sverige
SS 137004	SS 137004:2024, Naturliga puzzolaner och aktiverade naturliga puzzolaner – Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse.
SS-EN 15167-1	SS-EN15167-1: 2006 Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong, bruk och injekteringsbruk – Del 1: Definitioner, specifikationer och kriterier för överensstämmelse
SS-EN 14647	SS-EN 14647:2005 Kalciumaluminatcement – Sammansättning, specifikation och kriterier för överensstämmelse
SS-EN 16622	SS-EN 16622:2015 Silikakalciumstoft för betong – Definitioner, krav och kriterier för överensstämmelse

NYA BINDEMEDEL TILL BETONG FÖR VATTENKRAFTANLÄGGNINGAR

Den största drivkraften för utveckling av bindemedel har varit behovet av att minska klimatavtrycket hos betong genom ersättning av delar av portlandcementklinkern i betong med alternativa bindemedel. Det finns ett antal godkända och beprövade alternativa bindemedel som mald granulerad masugnsslagg (GGBS), flygaska och silikastoft som kan användas i vattenbyggnadskonstruktioner men tillgången på dessa är mycket begränsad. Nya alternativa bindemedel och tillsatsmaterial utvecklas och kommer att introduceras på marknaden inom de närmaste åren. De mest aktuella nya alternativa bindemedel är naturliga och kalcinerade naturliga puzzolaner som kalcinerade leror, mekanisk aktiverade leror, vulkanisk aska och sedimentära avlagringar med puzzolana egenskaper. Då dessa material finns tillgängliga idag genom import och potentiellt kan komma att bli tillgängliga genom svensk produktion, bör forskning och verifiering av deras långtidsegenskaper ha hög prioritet.

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.

