

BETONG FÖR VATTENKRAFTSBYGGNAD

RAPPORT 2020:653



VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Energiforsk

Betong för vattenkraftsbyggnad

Strategisk utblick

MARTIN J. STRAND
MARIE WESTBERG WILDE
MARTIN ROSENQVIST
MÅRTEN JANZ

ISBN 978-91-7673-653-1 | © Energiforsk februari 2020

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

Förord

Svensk cementindustri står inför en omställning där man ser över alla sina produkter för att minska miljöpåverkan. Den cementkvalitet som har använts historiskt i vattenkraftsindustrin, anläggningscement, ersätts av andra produkter. Utvecklingen av nya produkter drivs av behoven hos de stora användarna, Trafikverket och konventionell byggindustri. Nybyggnads- och reinvesteringstakten i vattenkraftsindustrin är idag låg, och vi får därför anpassa oss till de produkter som utvecklas för andra behov.

I denna rapport har cementindustrins samt de stora användarnas framtidsstrategier vad gäller cementanvändning kartlagts. Detta ger en bild av vilka cementkvaliteter som kommer att finnas tillgängliga för vattenkraftsindustrin framöver, och hur dessa väntas fungera utifrån de aspekter som är viktiga för vattenbyggnadsbetong.

Studien har utförts av Martin J Strand, Marie Westberg Wilde, Martin Rosenqvist och Mårten Janz, samtliga konsulter på AFRY. Projektet har genomförts inom Betongtekniskt program vattenkraft, med intressenterna Fortum Sverige AB, Jämtkraft AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Svensk Kärnbränslehantering, Sydkraft Hydropower AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB Vattenkraft och Vattenfall Indalsälven AB.

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 presenterar en litteraturstudie om önskade egenskaper hos vattenbyggnadsbetong och vilka bindemedel med tillsatsmaterial som är möjliga att använda för att uppnå dessa egenskaperna. Därefter ges en sammanställning av intervjuer med experter inom betongområdet. Till sist diskuteras och sammanfattas de relevanta kunskapsluckorna.

Det finns många oklarheter när det kommer till framtidens betong för vattenkraftsbyggnader. För att minska de koldioxidutsläpp som cementproduktionen innebär kommer det troligtvis bli en ökad användning av bindemedel som innehåller tillsatsmaterial. Restprodukter t.ex. flygaska från kolkraftverk och slagg från stålindustrin används dock redan i stor utsträckning idag. Efterfrågan förväntas öka och tillgången förväntas minska då kol ska fasas ut. Därmed är det osäkert vilka bindemedelskombinationer (cement + tillsatsmaterial) som kommer finnas på marknaden. Det kanske blir vanligare med t.ex. flygaska från kraftverk med annan energikälla än kol, eller kalcinerade leror. Men mycket pekar på att beständigheten hos betong med dessa tillsatsmaterial inte är lika god som för traditionell betong med portlandcement. Den generella kunskapen kring dessa är inte heller lika stor som för traditionell betong med ren portlandcement eller portlandcement med flygaska från kolkraftverk och slagg från stålindustrin. Därmed är de troligtvis inte något alternativ för användning i vattenkraftsbyggnader som utsätts för en tuff exponeringsmiljö och ska ha en lång livslängd. En möjlighet är att betong med sådana nya tillsatsmaterial används i konstruktioner (och lokalt i konstruktionsdelar) utan tuff exponering. För betong som utsätts för en tuff exponering kommer troligtvis traditionell portlandcement, eller portlandcement med upp till 20 % tillsatsmaterial, användas.

Det finns dock fortfarande kunskapsluckor för betong med låg ersättning av flygaska med lågt kalciuminnehåll, slagg, eller kalkfiller som identifierats från litteraturstudien och intervjuerna. Dessa har sammanfattats till följande punkter som vattenkraftsindustrin bör fortsätta arbeta med:

- Inverkan från samverkande mekanismer som resulterar i tidig sprickbildning hos betong med tillsatsmaterial.
- Inverkan från samverkande skademekanismer som är specifika för vattenkraftkonstruktioner hos betong med tillsatsmaterial.
- Optimering av betongrecept till dammkonstruktioner med hänsyn till materialanvändning.
- Optimering av olika betongrecept beroende på den lokala exponeringsmiljö som respektive konstruktionsdel utsätts för.
- Kunskapsinhämtning genom undersökning av befintliga vattenkraftverk som byggts under 1900-talet med betong som innehåller tillsatsmaterial.

Summary

This report presents a literature study on the desired properties of aquatic concrete and which binders with additives can be used to achieve these properties. Then a summary of interviews with experts in the field of concrete is given. Finally, the relevant knowledge gaps are discussed and summarized.

There are many uncertainties when it comes to future concrete for hydroelectric buildings. In order to reduce the carbon dioxide emissions that cement production entails, there will probably be an increased use of binders containing additives. However, residues, e.g. fly ash from coal-fired power plants and slag from the steel industry, are widely used today. Demand is expected to increase, and supply is expected to decline. Consequently, it is uncertain which binder combinations (cement + additives) will be on the market. It may become more common with e.g. residual ash from thermal power plants, or calcined clays. But the durability of concrete with these additives is not as high as for traditional concrete with Portland cement. Also, the knowledge of binder combinations containing these additives is also not as high as the knowledge for traditional concrete with Portland cement. Thus, they are probably not an option for use in hydropower buildings that are exposed to a harsh exposure environment and should have a long service life. One possibility is that concrete with such new additives is used in structures (and locally in structural parts) without tough exposure. For concrete that is exposed to tough exposure, traditional Portland cement, or Portland cement with up to 20% of additive material, is likely to be used.

However, there are still knowledge gaps for concrete with low replacement of fly ash with low calcium content, slag, and limestone filler identified from the literature study and interviews. These have been summarized to the following points that the hydropower industry should continue to work on:

- Interplay between mechanisms of early crack development in concrete containing additives.
- Synergy effects between damaging mechanisms that affect hydropower constructions in concrete with additives.
- How to optimize concrete recipes for hydro power constructions with focus on material usage.
- How to optimize different concrete recipes depending on the local exposure to which each design part is exposed.
- Gathering of information regarding existing hydro power constructions built with concrete containing additives during the 20th century.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte och mål	9
1.3	Metod	9
1.4	Avgränsningar	9
2	Önskade egenskaper hos vattenbyggnadsbetong	10
2.1	Färska betongens egenskaper	10
2.1.1	Konsistens	10
2.1.2	Sammanhållning/Stabilitet	11
2.1.3	Tillstyvning/Bindningstid	11
2.2	Hårdnade betongens egenskaper	12
2.2.1	Täthet	12
2.2.2	Hållfasthet	13
2.2.3	Frostbeständighet	14
2.2.4	Kemisk beständighet	15
2.2.5	Erosions- och nötningsbeständighet	17
2.2.6	Beständighet mot tidig sprickbildning	17
2.3	Reparationsegenskaper	20
2.4	Miljökrav	20
2.5	Alternativ för att minska klimatpåverkan från betongindustrin	20
2.5.1	Tillverkningsprocessen	20
2.5.2	Bindemedel	21
2.5.3	Betongrecept	21
2.5.4	Tillsatsmaterial	22
2.5.5	Ballast	22
2.6	Grov bedömning av alternativen	24
3	Vattenbyggnadsbetong med tillsatsmaterial	25
3.1	Flygaska	26
3.1.1	Färska egenskaper	27
3.1.2	Hårdnade egenskaper	28
3.1.3	Sammanställning för- och nackdelar, samt kunskapsluckor	31
3.2	Slagg	32
3.2.1	Färska egenskaper	33
3.2.2	Hårdnade egenskaper	33
3.2.3	Sammanställning för- och nackdelar, samt kunskapsluckor	36
3.3	Kalkfiller	36
3.3.1	Färska egenskaper	37
3.3.2	Hårdnade egenskaper	37
3.3.3	Sammanställning för- och nackdelar	39

4	Förmåga hos leverantörer och byggindustri	41
4.1	Material	41
4.1.1	Bindemedel	41
4.1.2	Tillsatsmaterial	43
4.2	Beredning	45
4.2.1	Fasta eller mobila betongfabriker	45
4.2.2	Bindemedel med/utan tillsatsmaterial	46
4.2.3	Ballast	47
4.2.4	Tillsatsmedel	48
4.2.5	Transport	49
4.3	Gjutning	49
4.3.1	Bindemedel	49
4.3.2	Ballast/Sparsten	50
4.3.3	Reparation	51
4.3.4	Arbetskraft	51
5	Pågående forskning och utveckling	52
5.1	Svar från intervjuer	52
5.2	SBUF projekt	53
6	Diskussion	55
6.1	Kunskapsluckor hos färska betongens egenskaper	55
6.2	Kunskapsluckor hos hårdnade betongens egenskaper	55
6.3	Sammanställning Frågor för fortsatt forskning	57
7	Slutsatser	59
8	Referenser	60

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Vattenkraftens betongkonstruktioner har vanligtvis större dimensioner än de flesta andra infrastrukturkonstruktioner. Vid gjutning av grova konstruktioner är låg värmeutveckling i samband med betongens hårdnande en viktig parameter för att minska risken för tidig sprickbildning. Under huvuddelen av den svenska vattenkraftsutbyggnaden fanns det ett särskilt anpassat vattenbyggnadscement att tillgå på marknaden. Cementet hade låg och långsam värmeutveckling.

Cementet i fråga var Limhamn LH. Tillverkningen av detta cement upphörde 1979 och sedan 1983 används vanligen Anläggningscement vid vattenkraftens byggnadsarbeten. Anläggningscement har moderat värmeutveckling, vilket ökar risken för sprickor. Cementet är därför inte lika fördelaktigt att använda till grova konstruktioner som det äldre Limhamn LH var. Både Limhamn LH och Anläggningscementet är rena portlandcement ("Ordinary Portland Cement", OPC) med 95-100 % portlandklinker. Sedan slutet av 1970-talet saknas det på den svenska marknaden ett bindemedel som möter vattenkraftens behov beträffande begränsning av betongens värmeutveckling och följaktligen risken för tidig sprickbildning.

I Sverige har betongmassans temperaturstegring under hårdnandet hanterats genom att medelst olika metoder kyla betongen. Kylning leder till ökade kostnader och ibland också produktionsstörningar. Utomlands har istället inblandning av mineraliska tillsatsmaterial (som t.ex. flygaska) setts som en fullgod metod för att sänka betongens temperaturstegring vid hårdnandet.

För att anpassa framställningen av betong till rådande förutsättningar pågår det olika omställningar inom branschen. Ett exempel är att det sedan 2016 saluförs ett Anläggningscement FA för att tillmötesgå önskemål om ett bindemedel som leder till lägre CO₂-utsläpp jämfört med en ren OPC (Anläggningscement). I Anläggningscement FA har klinkerandelen sänkts till 80 % genom ersättning med 15 % flygaska och 5 % kalksten (ett s.k. CEM II/A-V). Bindemedlet mals dock till högre finhetsgrad för att motsvara vanligt Anläggningscement med avseende på betongens hållfasthetstillväxt. Detta förhållande innebär dock att bindemedlets värmeutveckling ej nämnvärt förändras trots tillsatsen av flygaska.

I Norge ersätts sedan lång tid tillbaka en del av OPC med flygaska i betong för vattenkraftkonstruktioner och övrig infrastruktur. Nordström och Hassanzadeh (2018) konstaterade dock att det finns begränsat med dokumenterade erfarenheter med fokus på användningen av flygaska inom norsk dammbyggnad.

Ett exempel på en omställning som vattenkraftsbranschen redan har genomgått gäller ballast. Vid tiden för den stora vattenkraftsutbyggnaden så användes ofta naturgrus som har en naturligt bra kornstorleksfördelning, medan tillverkningen nu har fått anpassas för användandet av bergkross.

Svensk vattenkraft riskerar i framtiden att ställas inför faktum att tillverkningen av rena OPC som t.ex. Anläggningscement, upphör. Utvecklingen går mot att ersätta

portlandklinkern med alternativa bindemedel för att få ner CO₂-utsläppen. Inblandning av mineraliska tillsatsmaterial, såsom flygaska och mald granulerad masugnsslagg, bedöms öka. Viktiga erfarenheter kring alternativa bindemedel i kombination med krossballast och moderna tillsatsmedel anses saknas.

För vattenkraftsbranschen måste det säkerställas att kraven som i dagsläget ställs på vattenbyggnadsbetong kan uppnås efter omställningen till bindemedel med tillsatsmaterial, tillsammans med bergkross och tillsatsmedel. Ur ett svenskt vattenkraftsperspektiv är det viktigt att hantera frågan om vilka bindemedel som kan finnas tillgängliga i framtiden och vilka förutsättningar som krävs för att framställa betong av god kvalitet. En rad frågeställningar behöver hanteras för att identifiera nödvändiga utvecklingsbehov med målet att även framledes kunna framställa och gjuta betong med god kvalitet och beständighet.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Föreliggande projekt syftar till att ge en bild av de förutsättningar som svensk vattenkraft behöver förhålla sig till i framtiden beträffande hur betong av god kvalitet ska åstadkommas. Målet för projektet är att identifiera utvecklingsbehov som ska förbättra vattenkraftens förmåga att bemöta kommande utmaningar.

1.3 METOD

Denna rapport innehåller en litteraturstudie, vilken bygger på tre delar som vävs samman för att uppfylla projektets syfte. Den första delen berör de egenskaper som betong till vattenbyggnader förväntas ha. Den andra delen är en redogörelse för bindemedel som forskarna bedömer kommer kunna användas i framtiden, som är mer klimatsmarta jämfört med dagens bindemedel. Den tredje delen är en beskrivning av aktuellt kunskapsläge kring betong med dessa bindemedel och i vilken utsträckning som betongen bedöms kunna uppfylla de önskade egenskaper ställs på vattenbyggnadsbetong.

Litteraturstudien har kompletterats med intervjuer, där olika experter inom betongbranschen har presenterat sin syn på framtidens betong och tillhörande utmaningar. Dessa har tillsammans omfattande kunskap om OPC, bindemedelskombinationer (OPC + tillsatsmaterial), betongproduktion, samt insyn i den senaste forskningen om betong.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Detta projekt omfattar endast diskussion och resonemang kring de frågeställningar som vattenkraften kan ställas inför gällande betongtillverkning. Konkreta råd för hur betong av god kvalitet ska framställas ligger utanför ramen för projektet.

2 Önskade egenskaper hos vattenbyggnadsbetong

Detta kapitel anger önskade generella egenskaper hos betongen för att erhålla en vattenbyggnadsbetong som uppfyller sitt syfte för konstruktionen, och även har en god beständighet. Det finns önskade egenskaper både på de färska och de hårdnade egenskaperna hos betongen.

Generellt för vattenkraftsbyggnader gäller utförandeklass 3 enligt SS-EN 13670. Detta är den strängaste utförandeklassen som bland annat innebär att fler kontroller ska utföras, samt att det tillkommer fler tilläggskrav i utförandespecifikationen som ska följas.

2.1 FÄRSKA BETONGENS EGENSKAPER

Viktiga egenskaper hos den färska betongen är konsistens, sammanhållning/stabilitet (risk för separation) och tillstyvning/bindningstid. Med önskade egenskaper uppfyllda hos den färska betongen minskar risken för fel vid gjutningen.

2.1.1 Konsistens

Den färska betongens konsistens ska ha en god arbetbarhet. Efter bearbetning av den färska betongen ska den hårdnade betongen resultera i en homogen betong med jämna och förutsägbara materialegenskaper.

Konsistensen som föreskrivs i den tekniska beskrivningen uppfylls normalt sett av betongtillverkarna genom tillsättning av flyttillsatsmedel. Konsistensen är också starkt beroende av bindemedelshalten, vattenhalten, och ballastens kornstorleksfördelning. Lägre vattencementtal (vct) enligt ekvation 1 (låg vattenhalt och hög OPC-halt) bidrar till en styvare konsistens (Betonghandbok Material, 2017).

$$vct = \frac{w}{c} \quad \text{Ekv. 1}$$

Där w är vattenhalt [kg/m^3], och c är OPC-halt [kg/m^3]. Vattenbindemedeltalet (vbt) syftar till vattenhalten i förhållande till den totala halten av OPC och tillsatsmaterial.

Ballastens kornstorleksfördelning kan även påverka till stor del. Om det finns för mycket finmaterial (korn $< 125 \mu\text{m}$) bidrar detta till en trög betongmassa. En linjär kornstorleksfördelning (sett med en vanlig logaritmisk skala på kornfraktionerna) bidrar till en mer lättflytande konsistens. Naturgrus från rullstensåsar har normalt (nästan) en linjär kornstorleksfördelning, plus att kornen har en fördelaktig form då de är rundade och mer kubiska jämfört med krossad sten som generellt sett blir flisiga, vilket bidrar till en trögare konsistens (Betonghandbok Material, 2017).

Den vältkompakterade dammen (eng. roller-compacted concrete, RCC) är vanlig utomlands (används bland annat i Norge, USA, och Kina). För denna typ av damm så används en väldigt styv betong (≈ 0 cm sättmått) som kompakteras med en vält

som vibrerar och komprimerar ca 30 cm betong i taget. Byggtekniken används för att minimera bindemedelshalten och därmed risken för tidiga sprickor (Kleivan et al., 1994).

2.1.2 Sammanhållning/Stabilitet

Sammanhållningen av betongmassan ska vara god. I bästa fall finns då ingen risk för vatten-, bruks-, eller stenseparation under bearbetningen av betongen. Det ska inte heller kunna ske en så stor luftporsmigration som bidrar till att materialegenskaperna skiljer sig markant genom tvärsnittet.

Blödning (eng. bleeding) av betong är en vanlig form av separation, vilket innebär att vatten samlas på gjutytan. Detta innebär att den översta cementpastan lokalt får ett högre vct, vilket bland annat resulterar i lägre hållfasthet och lägre nötningsbeständighet. Det kan även förekomma vattenseparation under armering och större stenar vilket kan resultera i tidiga plastiska krympsprickor. Risk för blödning har visat sig beroende på förhållandet mellan vatten och bindemedlets specifika yta (malningsgrad). Då den specifika ytan ökar blir sammanhållningen bättre och risken för blödning minskar. Det finns även bruks- och stenseparation. Dessa orsakas av dålig kornstorleksfördelning i ballasten (t.ex. större kornsprång) i kombination med för lång vibrering (Betonghandbok Material, 2017).

Ytterligare en typ är luftporssegregation som innebär att luftporer i betongen inte är homogent fördelade. Normalt sett önskas att större porer (> 2 mm i diameter) vibreras ut för att det inte ska bli stora hålrum som bidrar till ökad permeabilitet och sänkt hållfasthet. Under vibreringen migrerar stora porer upp till ytan först på grund av deras högre flytförmåga. Små, fördelaktiga, porer (10 µm till 300 µm i diameter) stannar kvar i betongen på grund av deras låga flytförmåga. Detta innebär att om olika skikt av betongen vibreras olika länge resulterar det i en segregation av luftporerna och kan t.ex. skapa ojämn frostbeständighet.

Betongtillverkarnas recept ska vara optimerade för att ge god sammanhållning och stabilitet hos betongen, vilket innebär att risken ska vara minimal för separation.

2.1.3 Tillstyvning/Bindningstid

Tillstyvnadstiden ska vara så lång att den ger tid för bearbetning av betongen så att den fyller ut formen, och även möjliggöra att flera gjutetapper kan arbetas ihop då det är aktuellt. Därmed ska sprickor, gjutsår, eller andra defekter undvikas som kan uppkomma vid t.ex. flera gjutetapper.

Tillstyvningstiden är beroende på många faktorer. Enligt Arrhenius ekvation (ekv. 2) ökar reaktionshastigheten då temperaturen ökar (Wadsö, 2017).

$$k = Ae^{-\frac{E_A}{RT}}$$

Ekv. 2

Där R är gaskonstanten [J/(K mol)], T är temperaturen [K], E_A är aktiveringsenergin [J/mol], A är en konstant beroende på sannolikheten för molekyler att kollidera, och k är reaktionshastigheten. Formeln säger att de molekyler med en energi (RT) som överstiger aktiveringsenergin bidrar exponentiellt till reaktionshastigheten (Wadsö, 2017).

När den exotermiska reaktionen mellan betongens bindemedel och vatten startar avges värmeenergi som ökar temperaturen. Därmed ökar reaktionshastigheten av sig själv, dvs som en autokatalysator. En ökande specifik yta hos bindemedlet (mindre kornstorlekar, allt högre malningsgrad) ger ökad reaktionshastighet vilket resulterar i kortare bindningstid (och högre maxtemperatur vilket ofta är negativt, se 3.2.6). Med hänsyn till Arrhenius ekvation innebär detta att även omgivande temperatur påverkar reaktionen och därmed bindningstiden. Högre omgivande temperatur ökar reaktionshastigheten och minskar bindningstiden, och vice versa (Betonghandbok Material, 2017).

Betongens tillstyvning- och bindningstid kan betongtillverkarna styra över i stor utsträckning. Om bearbetningen kräver mer tid kan flera olika åtgärder vidtas. Ballasten och vattnet kan kylas innan blandning sker. En del av vattnet kan även ersättas med is (krossad till något som liknar snö), men denna metod medför en risk för en ojämn fördelning av snön och att snön bildar stora ofördelaktiga hålrum. Det går även att lägga in kylrör i konstruktionen där ett kylmedium pumpas runt, vilket innebär att betongens inre temperatur kan sänkas och tillstyvningstiden förlängas. För längre transporter av betongen alternativt om en långsam stighastighet är önskad går det även att styra tillstyvningstiden med retarderande tillsatsmedel (Betonghandbok Material, 2017).

2.2 HÅRDNADE BETONGENS EGENSKAPER

Önskade egenskaper hos den hårdnade vattenbyggnadsbetongen är god täthet, hållfasthet, frostbeständighet, kemisk beständighet, erosions- och nötningsbeständighet, samt beständighet mot tidig sprickbildning. Med väl sammansatt och proportionerad betong minskar risken för gjutfel som kan påverka den hårdnade betongens egenskaper.

2.2.1 Täthet

För betong utsatt för ensidigt vattentryck, såsom i dammar, önskas hög täthet. Detta bidrar till högre beständighet mot eventuella skademekanismer som finns närvarande på grund av vattentransporten från den våta till den torra sidan av betongen. Ballasten bör också vara tät och ha låg porositet.

Kravet på vattentäthet hanteras genom att använda $v_{ct_{ekv}} \leq 0,55$ (RIDAS 2017), och vid användning av CEM II/B-S, CEM II/B-V, och CEM II/B-M så gäller det att $v_{ct_{ekv}} \leq 0,45$ enligt ekvation 3 (SS 137003, 2015).

$$v_{ct_{ekv}} = \frac{w}{c + k \cdot m} \quad \text{Ekv. 3}$$

Där w är vattenhalten [kg/m^3], c är OPC-halten [kg/m^3], m är tillsatsmaterialhalten [kg/m^3], och k är en effektivitetsfaktor enligt SS 137003.

Tätheten syftar främst till de sorptionsegenskaper betongen har och dessa avgör permeabiliteten. Tätheten är beroende av porstrukturens uppbyggnad, vilket främst innebär porstorleksfördelningen, tortuositeten, och kontinuiteten (främst hos de s.k. kapillärporena). Det finns även flaskhalsar i porositeten vilket innebär att stora porer är omgivna av mindre porer. Då porositeten har mer eller mindre flaskhalsar bidrar det till en högre eller lägre kontinuitet för flödena. Vanligtvis

brukar porositeten delas in i tre kategorier; inträngda luftporer, kapillärporer, och gelporer. Inträngda luftporer med diameter mellan 10 och 500 μm som skapas av luftporbildande tillsatsmedel. Kapillärporer är "större" kanaler i cementpastan mellan produkterna som bildas under hydratationen (ibland delas kapillärporer in i mesoporer, 2,5 till 50 nm, och makroporer, 50 nm-10 μm). Dessa utgör alla porer som är större än gelporerna och mindre än de inträngda porerna. Gelporer är utrymmen mindre än 2,5 nm (TC 238-SCM, 2018).

En studie av Zhao et al. (2019) presenterar resultat som visar hur porstrukturen påverkas av olika faktorer. Då vct ökar så ökar den genomsnittliga porradien, och minskar med längre härdningstid och ökad OPC-sand ratio. Porositeten ökar med ökad vct och OPC-sand ratio, medan den minskar med längre härdningstid.

Olika mikrostrukturer resulterar i att betongens egenskaper för gas och vätske-transport ändras. Detta medför att samtliga skademekanismer som är beroende av gas eller vätsketransport genom betongen påverkas. Alltså påverkas betongens beständighet mot dessa skademekanismer då mikrostrukturen påverkas (Betonghandbok Material, 2017).

2.2.2 Hållfasthet

Betongens hållfasthet måste vara tillräckligt hög för att konstruktionen ska hålla. Det viktigaste är dock hållfasthetstillväxten som måste vara tillräckligt hög för att helst eliminera risken för tidig sprickbildning.

Med minskande vct ökar hållfastheten. Då vct är 0,55 eller lägre följer normalt sett hållfasthetsklass C30/37 eller högre, vilket innebär att hållfastheten blir erforderlig. C30/37 betyder att den karaktäristiska cylinderhållfastheten är 30 MPa efter 28 dygn och motsvarande kubhållfasthet är 37 MPa efter 28 dygn. RIDAS rekommenderar minst C25/30 och $vct_{ekv} \leq 0,55$ för betongdammar.

Hållfasthetsklasserna presenteras i tendenskurvor som redovisar hållfasthetsutvecklingen över tiden (med logaritmisk skala) då betongen härdat i ett rum där omgivande temperatur är 20 °C. Dessa kurvor gör det möjligt att göra jämförelser av värden från tendenskurvorna med verkligheten (där omgivande temperatur inte är konstant 20 °C). För att möjliggöra detta finns diagram med OPC-reaktioners temperaturberoende där den relativa reaktionshastigheten jämfört med 20 °C redovisas. Då temperaturen är lägre än 20 °C är faktorn under 1 och vice versa (Betonghandbok Material, 2017). Då faktorn är 0,5 för ett visst bindemedel när temperaturen är under 20 °C och betongen härdat i 2 dygn blir den ekvivalenta härdningstiden i 20 °C 1 dygn (2 dygn $\times$ 0,5). För att få fram den verkliga hållfastheten i konstruktionen läses hållfastheten av i tendenskurvan vid den ekvivalenta härdningstiden, 1 dygn.

Elasticitetsutvecklingen hos betong följer ungefär hållfasthetsutvecklingen med hög tillväxt under de första dygnen som sedan avtar med tiden.

Elasticitetsmodulen (Youngs modul) är användbar, bland annat, för att bestämma spänningar som bildas från t.ex. fukt- och temperaturbetingade rörelser. Högre elasticitetsmodul innebär högre styvhet, d.v.s. att det krävs högre spänning för att konstruktionen ska erhålla en viss töjningsdeformation, och vice versa (Betonghandbok Material, 2017).

När tryckhållfastheten ökar så ökar även böjdraghållfastheten i betong, men denna ökning av böjdraghållfastheten är avtagande (inte linjärt proportionerlig mot tryckhållfastheten). Detta innebär att då tryckhållfastheten ökar så ökar även ration av tryckhållfastheten och böjdraghållfastheten (Betonghandbok Material, 2017).

2.2.3 Frostbeständighet

När vatten fryser, och därmed går från flytande fas till fast fas, sker en volymökning. Om betongen innehåller en stor andel vattenfyllda porer kan denna volymökning omvandlas till spänningar som leder till frostsador. Betongen ska ha en sådan luftporstruktur att den kan motstå frostsador. Luftporstrukturen ska också vara stabil över tid och reaktionsprodukter ska fylla inte igen luftporerna i sådan omfattning att frostbeständigheten försämras.

Frostbeständigheten hanteras genom tillsättning av luftporbildande tillsatsmedel så att lägsta lufthalten blir 4,0 vol-% enligt tabell 9 i SS 137003:2015 (normalt sett är stenmax > 16 mm). Utöver lufthalten i den hårdnade cementpastan ska ballasten vara frostbeständig. Detta bestäms genom att mäta ballastens vattenabsorption. Om absorptionen är ≤ 1 % enligt EN 1097-6 kan ballasten anses frostbeständig. Generellt sett är det en god idé att utgå från magmatiska gångbergarter eller djupbergarter (t.ex. granit).

En annan relativt ny teknik är användningen av superabsorberande polymerer (SAP) som kan blandas i och bilda porer likt luftporbildande medel (TC 225-SAP, 2012). Det finns även ihåliga sfäriska plastkuler som kan blandas i för att skapa en porositet med porer som har fördefinierade storlekar (Sundqvist & Lif, 2012).

Vid användandet av luftporbildande medel skapas små (ca 10 till 300 μm i diameter) luftporer som blir jämnt fördelade i cementpastan. Luftporerna bidrar till att betongen inte vattenmättas lika lätt. Då det fortfarande finns luft inne i porsystemet så kan fasomvandlingen av vattnet (flytande till fast) ske utan att skapa spänningar i betongen (Betonghandbok Material, 2017).

Vattnet som är i kontakt med en damm har normalt sett en temperatur över 0 °C. Detta innebär att frostsador inte sker i betongen som är uppvärmd av vattnet till över 0 °C. Däremot finns det en frostrisk för samtliga delar som är exponerade för utomhusluften eftersom den kan kyla ner betongen under 0 °C. Därmed så är det vanligt förekommande med frostsador utmed vattenlinjen (skvalpzonen) på betongdammar. Dock gäller det fortfarande att den kritiska vattenmättnadsgraden behöver överskridas för att frostsador ska uppkomma. För en mer ingående förklaring av den kritiska vattenmättnadsgraden finns publikationen Fagerlund (1972) där mätningar av kritiska vattenmättnadsgrader mätts för olika material. För att ge en grundläggande kunskap om den kritiska vattenmättnadsgraden presenteras ekvation 4 och 5. Den representerar ett teoretiskt fall där man endast tar hänsyn till volymökningen från vattnets fasändring på 9 % (ingen hänsyn tas till porstorleksfördelningen och tortuositeten hos porositeten).

$$S = \frac{W}{P} \quad \text{Ekv. 4}$$

Där S är vattenmättnadsgraden, W är volymen vatten i porsystemet, P är porsystemets volym. Den teoretiska kritiska vattenmättnadsgraden är då

porvolymen är så stor som vattnets volym efter fasomvandlingen till is, d.v.s. 1,09 W enligt ekvation 5. Då $S \geq S_{kr}$ så finns därmed en risk för frostsador.

$$S_{kr} = \frac{W}{1,09W} \approx 0,917 \quad \text{Ekv. 5}$$

Det finns ytterligare en riskzon för frostsador som är unik för betongdammar. Enligt tidigare så bidrar urlakning till att uppströmssidan blir mer porös, vilket ökar vattenflödet in i betongen. Samtidigt så bidrar självläkningen (tillsammans med karbonatisering av betongytan) på nedströmssidan till att ytan blir mer tät. Dessa två faktorer (porös uppströmssida och tät nedströmssida) medför en risk att vattenmättnadsgraden blir hög vid nedströmssidan. Detta innebär en risk för stora frostsador i betongkonstruktionen. Risken kan motverkas genom att isolera nedströmssidan så att temperaturen i betongen förblir så hög att vattnet inte kan frysa (Ekström T., 2001). Notera att i en oisolerad betongvägg, utsatt för ensidigt vattentryck med en vattenförande spricka, så kan självläkning vara negativt. Detta på grund av att den tätande effekten kan bidra till att den kritiska vattenmättnadsgraden överskrids på nedströmssidan i betongen (vilket innebär risk för frostsador). I övrigt är självläkning en positiv egenskap (Ekström T., 2019).

2.2.4 Kemisk beständighet

Kemisk beständighet hos vattenbyggnadsbetong innebär god förmåga att motstå urlakning, alkali-silika-reaktioner (ASR), sulfatangrepp, samt att inverkan av karbonatisering inte påverkar negativt.

Urlakning

Det är önskvärt att betongen är beständig mot urlakning eftersom många betongdammar exponeras för mjukt vatten. Urlakning sker genom diffusion på uppströmssidan i betongdammar då vatten transporteras genom betongen och löser upp vattenlösliga kalciumprodukter (främst kalciumhydroxid) som bildats från bindemedelshydratationen (Ekström, 2003).

Resultatet av urlakning i en betongdamm blir ökad porositet och permeabilitet vid uppströmssidan, medan det kan bildas kalkutfällningar på nedströmssidan. Kalkutfällningarna bildas då kalciumet som urlakats kommer i kontakt med, och binder, koldioxid som finns i luften. Dessa kalkutfällningar syns tydligt som stora vita områden i kontrast till den grå betongen. Vid små sprickor kan dessa utfällningar bidra till att delvis fylla igen sprickan, vilket kallas för självläkning (Ekström, 2003).

Urlakning sker främst längs sprickor och i betong med hög permeabilitet (genomsläpplighet) där förutsättningar för ett konstant flöde av vatten kan finnas. Därmed är det, för vattenkraftsbyggnader såsom dammar, önskvärt att eftersträva en sprickfri betong som även har låg permeabilitet (tät betong) (Ekström, 2003).

Rosenqvist m.fl. (2017) undersökte kombinationerna av urlakning tillsammans med nötning och/eller frost. Resultaten visar att nedbrytningstakten ökar då de kombineras. Kombinationen av alla tre skademekanismer resulterade i störst skador. Utöver det visade resultaten att urlakning tillsammans med frost resulterade i mer skador jämfört med urlakning tillsammans med nötning.

Alkali-silika-reaktioner (ASR)

Det är önskvärt att designa betongreceptet så att det inte föreligger någon risk för ASR. ASR uppstår då ballast med alkalilöslig kiselsyra reagerar med alkali-hydroxider i den hårdnade cementpastan vid fuktiga förhållanden (över ca 80 % RF). Det bildas då en alkali-silika-gel som absorberar fukt och sväller. Detta skapar spänningar i betongen som leder till sprickbildning (Sims & Poole, 2017).

För att undvika den skadliga alkali-silika reaktionen används bindemedel med ett lågt alkali-innehåll, där mängderna Na_2O och K_2O begränsas enligt SS 134203. Utöver detta används icke-reaktiv ballast, vilket innebär att ballast innehållande exempelvis kvarts bör undvikas för att reducera risken för ASR.

Sulfatangrepp

Risken för sulfatangrepp bör också elimineras för att betongen ska vara lämplig för vattenkraftsbyggnader. Under bindemedlets hydratation reagerar trikalciump-aluminat (C_3A) med sulfationer (från inmalt gips). Vid denna reaktionen bildas ettringit (AFt). Om det finns mer C_3A än tillräckligt för att reagera med alla sulfationer så omvandlas ettringit till monosulfater (AFm). Vid bindemedlets hydratation finns det tillräckligt med utrymme, vilket innebär att omvandlingen till ettringit och sedan till monosulfat inte leder till skador i betongen.

Sulfatangrepp inträffar då externa sulfationer tränger in med vatten i betongen och leder till att monosulfaterna omvandlas till ettringit. Då monosulfaterna binder vattnet innebär omvandlingen en volymökning, vilket leder till inre spänningar som orsakar sprickbildning. Sulfationer förekommer naturligt i grundvatten och sötvatten, där några exempel är natrium-, kalium-, och magnesiumsulfater (Kelham, 2003).

Risken för sulfatangrepp hanteras genom att begränsa C_3A i bindemedlet. Det finns tre klasser sulfatresistent CEM I bindemedel, SR 0 där C_3A -innehållet är 0 %, SR 3 där C_3A -innehållet är över 0 % men under eller lika med 3 %, och SR 5 där C_3A -innehållet är över 3 % men under eller lika med 5 % enligt SS-EN 197-1.

Karbonatisering

Karbonatisering innebär att cementpastan, som utgör betongens yta, binder koldioxid som finns i atmosfären. Därmed skapas en ny produkt som resulterar i att betongytan får andra egenskaper. För en betongyta som är exponerad för atmosfären bör karbonatiseringen inte innebära en drastisk reduktion av beständigheten i ytskiktet (Strand, 2018).

För OPC är det kalciumhydroxiden som binder koldioxiden och bildar kalciumkarbonat som bidrar till en tätare struktur i den hårdnade cementpastan. När betongen innehåller tillsatsmaterial är reaktionerna inte de samma, varför produkterna från karbonatiseringen inte resulterar i samma egenskapsförändringar. Därmed är det viktigt att känna till vilka förändringar som sker då betong med tillsatsmaterial karbonatiserar. Detta för att vara medveten om eventuella problem med armeringskorrosion (Fagerlund, 1992).

Då betongen är okarboniserad har porlösningen ett högt pH vilket passiviserar (elimineras risk för korrosion) armeringen. Korrosion initieras då betongen har karboniserat in till armeringsjärnen (vilket sänker pH-värdet i porlösningen) och det är en fördelaktig fuktighet i betongen för korrosion (Fagerlund, 1992).

Problem med armeringskorrosion är dock inte vanligt i vattenkraftsbyggnader då dessa normalt har högt fukttinnehåll. Det kan förekomma vid miljöer där den relativa fuktigheten är gynnsam (ca 40 till 70 %, Drouet (2010)).

För betongdammar som konstant utsätts för ensidigt vattentryck är den relativa fuktigheten vanligtvis ofördelaktigt hög i hela tvärsnittet för att karbonisering ska inträffa. På grund av att det är få kritiska delar som påverkas av karbonisering (möjligtvis undersida av brobana över dammen) kommer det inte läggas någon fokus på detta i denna rapport.

2.2.5 Erosions- och nötningsbeständighet

Betong till vattenkraftsbyggnader behöver ha god beständighet mot erosion och nötning. Erosion orsakas vanligtvis av is, flytande föremål och strömmande vatten som bidrar till ytliga skador i betongen. Erosion eller nötning av ytan är dock ofta ett resultat från flera bakomliggande skademekanismer. Eftersom det är betongytan som påverkas kommer urlakning, som försvagar ytan, bidra till att öka skadorna från erosion. Därmed innebär förbättrad beständighet mot urlakning också att erosionsskador minskar.

För att öka betongens beständighet mot erosion, och därmed minska skadorna, så höjs betongens hållfasthet. Enligt Fagerlund (1989) kan detta åstadkommas genom att sänka vct, använda hårdare ballast, eller vakuumbehandla ytan. Ett annat alternativ är att öka armeringens täckande betongskikt, vilket ökar tiden tills reparationer kan krävas. Dock kan täckskiktet behöva fiberarmeras för att undvika ytliga sprickor.

2.2.6 Beständighet mot tidig sprickbildning

För grova vattenkraftsbyggnader är det viktigt att minimera risken för tidig sprickbildning. Sprickbildning kan ske i grova konstruktioner till följd av temperatur- och fuktbetingade rörelser. En mekanism som kan motverka tidig sprickbildning är självläkning.

Temperaturbetingad rörelse

Bindemedelsreaktionen i betong är en exoterm process, vilket innebär att värme avges och ökar betongens temperatur. När betongens temperatur stiger sker en volymökning och då betongens temperatur sjunker sker en volymminskning. Detta orsakas av så kallade temperaturbetingade rörelser. Spänningarna blir större då temperaturskillnaden är större. Sprickor uppkommer främst när grova sektioner gjuts på samma gång eftersom då blir temperaturskillnaden större mellan mitten av betongsektionen och betongytan (Betonghandbok Material, 2017).

För att undvika tidig sprickbildning krävs framförallt att värmeutvecklingen minimeras. Detta kan göras genom att möjliggöra en minskning av cementhalten

genom att justera kornstorleksfördelningen och/eller tillsätta tillsatsmedel. Ett annat sätt är att ersätta en del av OPC-halten med tillsatsmaterial. OPC-reaktionen har generellt en högre värmeutveckling jämfört med reaktioner av tillsatsmaterial (Malm 2019).

Då latent hydrauliska och puzzolana tillsatsmaterial blandas i så blir det en viss fördröjning av reaktionen. Latent hydrauliska börjar reagera först med hjälp av en aktivator (t.ex. OPC) som bidrar med t.ex. alkalier och kalciumhydroxid (eller sulfater, klorider, nitrater, karbonater, och silikater). Puzzolana tillsatsmaterial börjar inte reagera förrän det finns kalciumhydroxid (produkt från OPC-reaktionen) tillgängligt, varför värmeavgivningen blir fördröjd jämfört med OPC-reaktionen. Därmed blir värmeutvecklingen fördelad över en längre tid vid användning av dessa tillsatsmaterial, vilket resulterar i en lägre maxtemperatur under hydrationsprocessen. Temperaturgradienten över betongtvärsnittet bör inte överskrida 20 grader för att undvika ytsprickor (Fagerlund 1989).

Avdelningen för byggmaterial på LTU har haft en rad forskningsprojekt där tidig sprickbildning undersökts och modellerats (Emborg 1989, Jonasson 1994, Westman 1999, Hedlund 2000, Larson 2003). Den senaste i raden av doktorander vars projekt handlar om risk för temperatursprickor är Anders Hösthagen som publicerade sin licentiatavhandling 2017. LTU har utvecklat ett testprogram för att kunna göra fem mätningar av materialdata och sedan kalibrera en "Equivalent restraint method" (ERM)-beräkning efter dessa empiriska mätvärden.

Genom de empiriska mätvärdena ger modellen en noggrann beräkning av risken för tidiga sprickor för det specifika materialet. De materialdata som mäts är hållfasthetsutveckling, värmeutveckling, spänning vid fullt tvång, krypning, samt kombinerad krypning och termisk utvidgning. Av dessa fem mätningar har de tre förstnämnda större signifikans. ERM beräkningarna ger väl kalibrerade resultat för OPC, men enligt Hösthagen (2017) är det troligt att det krävs justeringar i modellerna då tillsatsmaterial används i betongen.

Fuktbetingad rörelse

Fuktbetingad rörelse innebär att det sker en krypning under betongens uttorkning. Då både avsvaivning och uttorkning bidrar till en volymminskning i betongen kan dessa leda till töjningar som resulterar i sprickor i betongen.

Den fuktbetingade rörelsen delas in i tre delar hos betong. Dessa är viktiga att känna till för att försäkra sig om att olika mätresultat är jämförbara. Den kemiska krympningen är till följd av att produkterna som bildas vid hydratationen har ca 8-10 % mindre volym. Denna krympning kan ske fritt tills betongen tillstyvnar och den hårdnade cementpastan bildat ett skelett som håller emot krympningen. Därefter kommer matrisen av hårdnad cementpasta hålla emot en del av den kemiska krympningen, vilket innebär att vid mätning av krympningen så erhålls inte hela den kemiska krympningen. Den krympningstöjning som erhålls då ett prov hårdas utan uttorkning (100 % RF i omgivande luft som motverkar fuktutbyte) i konstant temperatur kallas för den autogena krympningen. Denna är intressant att mäta eftersom den ger information resultatet från kemisk krympning tillsammans med utvecklingen av hållfastheten, elasticitetsmodulen och övrigt som kan inverka. Den autogena krympningen påverkar främst betong med vct under

cirka 0.42. Detta beror på att vid vct 0.42 finns så mycket vatten som cementen kan reagera med, vid högre vct finns därmed överflödigt vatten. Utöver kemisk och autogen krympning finns även uttorkningskrympningen.

Uttorkningskrympningen är den krympning till följd av fuktutbyte med omgivande luft. Alltså blir den totala uppmätta krympningen av betong summan av den autogena krympningen och uttorkningskrympningen (Betonghandbok Material, 2017).

För grova konstruktioner är uttorkning, och således även uttorkningskrympning, generellt sett en långsam process. Undantag kan t.ex. vara ytskiktet, speciellt om det utsätts för värme (t.ex. direkt solstrålning). Där kan en stor fuktgradient bildas och därmed en spänningsskillnad mellan betongens inre och ytan, vilket kan resultera i ytlig sprickbildning (Malm, 2019).

En relativt ny teknik för att förhindra den autogena krympningen är användandet av superabsorberande polymerer (SAP). Genom att tillsätta SAP och den extra mängd vatten som dessa stabilt kan binda vid blandning av betong så kan den autogena krympningen helt motverkas (TC 225-SAP, 2012).

Självläkning

Förmåga till självläkning är en önskad egenskap hos vattenbyggnadsbetong som bidrar till att tunna sprickor fylls igen, vilket generellt sett är bra då det motverkar vattentransport genom konstruktionen. Självläkning av sprickor i dammar som utsätts för ensidigt vattentryck sker i tre steg. Först urlakas uppströmssidan av vattnet, då löses kalciumhydroxid upp. Därefter transporterar vattnet jonerna genom sprickor till dammens nedströmssida. När vätskan med dessa joner nått slutet av sprickan vid betongytan och kommer i kontakt med koldioxiden så binds koldioxiden, vilket innebär en kristallisering då kalciumkarbonat bildas. Dessa kristaller kan täta sprickor, så länge de inte är för breda (mindre än cirka 0,3 mm) (Fagerlund & Hassanzadeh 2012).

Det finns två typer av självläkning, autogen och autonom. Den autogena är då självläkningsprocessen sker endast med hjälp av det hårdnade bindemedlet som användes i betongen. Den autonoma är då ett syntetiskt material eller bakterier tillförs i små kapslar till betongen under beredningen. Enligt Rajczakowska (2019) är den autogena självläkningsförmågan mer pålitlig, och kostnadseffektiv.

Potentialen till självläkning ökar för betong som endast innehåller OPC, och ökar då OPC-halten ökar. Anledningen till detta är att dessa två faktorer resulterar i en ökad mängd kalciumhydroxid. Då andra bindemedel som flygaska och slagg reagerar med kalciumhydroxiden, minskar potentialen till självläkning (Fagerlund 1989). Rajczakowska (2019) visar bland annat att en ultrahögpresterande betong med vct 0.22 och silika visade sig ha sämre självläkning jämfört med betong vct 0.45 och CEM I.

I en studie av Snoeck D. et al. (2020) visade resultaten att superabsorberande polymerer (SAP) även är intressanta i fallet med sprickor och självläkning. När det bildas en spricka så kan SAP-partiklarna absorbera vattnet och delvis hjälpa till att täta genom svällning. Därefter hålls vattnet kvar vid sprickan och ohydratiserad OPC kan hydratisera och bidra till autogen självläkning. När betongen innehöll

SAP blev effekten från självläkningen också större då klimatet cyklades mellan vått och torrt, samt när det var konstant hög relativ fuktighet. Yang H. et al. (2019) presenterar en studie som undersöker hur effektivt SAP kan tätta sprickor beroende på hur breda sprickan är. Resultaten visar att typen av SAP bör anpassas till förväntad sprickbredd.

2.3 REPARATIONSEGENSKAPER

Vattenbyggnadsbetong förväntas ha lång livslängd och under konstruktionens livslängd kommer det uppstå reparations- och ombyggnadsbehov. Betongen i konstruktionen måste därmed, på ett enkelt sätt, vara reparerbar.

Ny betong på marknaden måste också vara kompatibel med befintlig äldre betong så att befintliga betongkonstruktioner kan repareras på ett bra sätt.

2.4 MILJÖKRAV

I framtiden kan det ställas krav på att vattenbyggnadsbetongen ska optimeras för att minimera klimatpåverkan. I händelse av sådana krav kan koldioxidutsläpp kopplade till betongens framställning behöva minimeras.

Betong är ett viktigt material för dagens infrastruktur och används i väldigt stor utsträckning. Detta innebär att bindemedels- och betongindustrin står för cirka 8 % av de antropogena (orsakade av människan) koldioxidutsläppen (Lehne & Preston, 2018). Att producera OPC från kalksten genom uppvärmning kräver en stor mängd energi, vilket bidrar till koldioxidutsläpp. Enligt WBCSD (2016) resulterar 1 kg OPC i genomsnitt i 0,845 kg CO₂-emissioner. Enligt Scrivener (2014) resulterar ett normalt betongrecept i 0,130 kg CO₂ per kg betong, vilket tar hänsyn till att OPC utgör en relativt liten andel av betong.

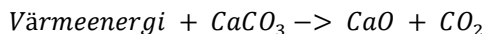
2.5 ALTERNATIV FÖR ATT MINSKA KLIMATPÅVERKAN FRÅN BETONGINDUSTRIN

Det finns flera alternativ för att minska CO₂-utsläpp från betongindustrin. Några av dessa alternativ är utveckling av cementets tillverkningsprocess, övergång till alternativa bindemedel, ersättning av cement med tillsatsmaterial, samt optimering av betongrecept.

2.5.1 Tillverkningsprocessen

Tillverkningsprocessen är utvecklad under många år, vilket innebär att det är väldigt lite energi som kan sparas jämfört med övriga alternativ. Cirka 40 % av koldioxidutsläppen från tillverkningsprocessen är på grund av bränsle och elektricitet. Cirka 60 % av koldioxidutsläppen är på grund av den kemiska omvandlingen då kalkberget värms och bildar klinker. Denna process är en av de mest effektiva som närmar sig 70 % av den teoretiskt maximala verkningsgraden. Därmed är det osannolikt att denna process kan förbättras ytterligare (Scrivener 2014). Förenklat kan tillverkningsprocessen förklaras med följande kemiska reaktion där värme är den tillförda energin genom bränsle och elektricitet. Genom

att värma kalksten (kalciumkarbonat) till 1450 °C så erhålls kalciumoxid, vilket är huvudkomponent i klinkern som skapas, och koldioxid (Betonghandboken 2017).



Cementa och Vattenfall (Wilhelmsson m.fl. 2018) har tillsammans presenterat en rapport angående möjligheterna till att producera cement med endast elektricitet. Detta är en förstudie med syfte att leda till ett pilotprojekt. Därmed är det långt kvar innan cementproduktionen, genom uppvärmningen med hjälp av förbränning, kan ersättas med cementproduktion genom uppvärmning med hjälp av förnybar och koldioxidneutral elektricitet. För att helt undvika koldioxidutsläpp från cementtillverkningsprocessen så krävs koldioxidavskiljning och lagring (CCS, Carbon Capture and Storage) för att undvika att släppa ut den CO₂ som skapas av den kemiska omvandlingen enligt ovanstående förenklade jämviktsformel.

2.5.2 Bindemedel

Alternativa bindemedel, istället för portlandklinkercement, som det forskas kring är så kallade geopolimerer. Hydratationen sätts igång med hjälp av en alkali-aktivator. De vanligaste geopolimererna är flygaska och slagg. Då OPC inte används går det att räkna bort energiåtgången för att producera OPC. Men med hänsyn till de alkaliaktivatorer som måste produceras får det andra effekter på miljön och klimatet. Det finns även begränsad forskning på beständigheten, och kvaliteten av flygaskan och slaggen kan variera väldigt mycket vilket också bidrar till att slutprodukten beständighet blir osäker. Dock så är tillgången på flygaska och slagg den viktigaste faktorn att ta hänsyn till. Eftersom tillgången på flygaska och slagg är betydligt lägre än efterfrågan på OPC så är det praktiskt sett omöjligt att övergå till att använda geopolimerer med alkali-aktivatorer (utan OPC) istället för att använda betong med OPC. På grund av detta kommer geopolimerer med alkali-aktivatorer inte diskuteras mer i denna rapport.

2.5.3 Betongrecept

Enligt Scrivener et al. (2016) sker optimering av betongrecept ofta med hänsyn till CO₂ utsläpp i relation till betongens tryckhållfasthet. Oftast erhålls onödigt hög tryckhållfasthet som skulle kunna reducerats genom att minska på OPC-halten, vilket även minskar CO₂ utsläppen. Alternativt skulle användandet av betong med hög hållfasthet kunna optimeras för att reducera den totala materialförbrukningen. OPC-halten kan även minimeras genom att optimera ballastens kornstorleksfördelning. Då OPC-halten ska minskas/minimeras eftersträvas minimal specifik yta hos ballasten, vilket fås genom att använda större stenar (öka "sten-max"). Tillsammans med dessa alternativ kan även tillsatsmedel användas som hjälper med dispersionen så att betongen får en jämn kvalitet.

För vattenbyggnadsbetong är hållfastheten normalt sett inte dimensionerande utan det är istället egenskaper som täthet och nötningsmotstånd. Betongreceptet kan dock optimeras så att betong som är dämmande eller exponeras mot vattenvägar har högre krav än betong i stödjande konstruktionsdelar.

2.5.4 Tillsatsmaterial

Scrivener (2014) skriver även om alternativen och möjligheterna för att använda mer tillsatsmaterial. Det är viktigt att tänka på att världens totala produktion av OPC är över 4 miljarder ton (Andrew R.M. 2018). Produktionen av slagg är cirka 5 % av OPC-produktionen och produktionen av flygaska är cirka 30 % av OPC-produktionen (Scrivener 2014). Ersättning av OPC med silika har också problemet att produktionen av silika är liten i förhållande till OPC-produktionen. Slagg och flygaska är dessutom inte homogena material, utan har stor variation i kvalitet. Detta innebär att allt som produceras inte är lämpligt att använda i betong. Scrivener (2014) lyfter fram möjliga alternativ som bygger på att det finns stor tillgång på material, samt att det finns potential med hänsyn till ekonomi och beständighet för betongen.

Det mest lovande alternativet, enligt Scrivener, är en trekomponents-bindemedelskombination med kalcinerad lera, kalkfiller och traditionell klinker. Två stora fördelar med lera är att den kalcineras vid ungefär hälften så hög temperatur jämfört med OPC-klinkern (600 till 800 °C), vilket sparar energi och möjligtvis pengar, samt att den kan produceras i befintliga cementfabriker. Enligt resultat från Antoni (2013) kan betong få likvärdig hållfasthet med en bindemedelskombination av 55 % klinker, 30 % metakaolin och 15 % kalkstensfiller. Betongen får även en tätare porstruktur med högre total porositet.

Det finns dock ett hinder som gör att detta bindemedel troligtvis inte är ett möjligt alternativ i grova konstruktioner som gjuts inom vattenkraftsindustrin. Värmeutvecklingen är mycket högre under de första 12 timmarna jämfört med OPC enligt kalorimetermätningar av Antoni (2013). I en grov konstruktion kommer detta leda till tidig sprickbildning. Det ska dock inte uteslutas som alternativ för användning i slanka konstruktionsdelar av vattenkraftsbyggnader som inte har så tuff exponering.

Utöver alternativet med kalcinerade leror så nämns även bland annat risskal som alternativ då forskning visat att det finns potential med att även använda detta som tillsatsmaterial. Nackdelen som nämns av Scrivener är att tillgängligheten är begränsad med hänsyn till plats, tid på året, och mängd. Då det inte förekommer någon risodling i Sverige är detta alternativet inte heller aktuellt att ta upp som ett seriöst alternativ.

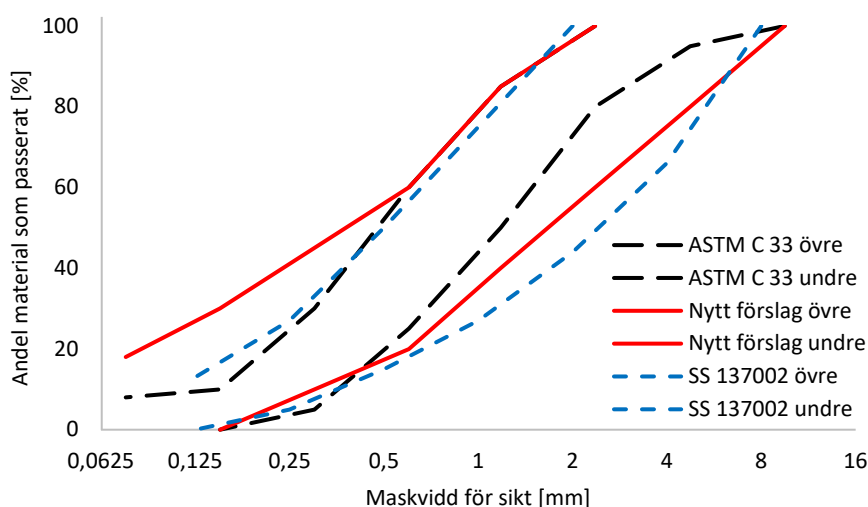
År 1978 påbörjade Cementa produktionen av "Massivcement" som utvecklats under 2 år och skulle ersätta Limhamn LH, som hade låg värmeutveckling och var designat för att användas i grova betongkonstruktioner. Bindemedlet framställdes genom att 65 % slagg maldes tillsammans med OPC till en finhet runt 400 m²/kg. Den höga slagghalten innebar låg värmeutveckling, men även långsam hållfasthetsutveckling och försämrad självläkningsförmåga. På grund av detta blev det problem i konstruktioner med tidig sprickbildning, varför detta alternativ valdes bort och produktionen lades ner 1982 (Rosenqvist, 2018).

2.5.5 Ballast

Ballasthalten och kornstorleksfördelningen bör optimeras, eftersom ballasten är en viktigt komponent som normalt sett kan utgöra ca 65 vol-% (alternativt ca

75 vikt-%) av betongen. Kornstorleksfördelningen har en stor inverkan på kompaktionen (hållfastheten), sammanhållningen (risk för olika typer av separationer), och konsistensen i betongmassan (förutom flyttillsatsmedel). För att kunna minska OPC-halten och värmeutvecklingen eftersträvas normalt sett att blanda in ballast med större maximal stenstorlek. Med större maximal stenstorlek får ballasthalten en mindre specifik yta i förhållande till sin volym (total omslutningsarea runt samtliga ballastkorn) som cementpastan (bindemedlet tillsammans med vattnet) ska täcka. Med mindre specifik yta kan ballasthalten ökas (Rached m.fl., 2009).

Rached m.fl. (2009) utförde tester för att minimera OPC-innehållet, och kostnaden per m³ betong, genom att optimera ballastens kornstorleksfördelning. I studien ersattes OPC med mikrofiller, och flyttillsatsmedel användes även för att skapa samma konsistens i blandningarna. Recept med OPC-halt ner till 222 kg/m³ testades. Besparingar redovisades per volym betong för respektive recept med hänsyn till att recepten krävde olika mängder mikrofiller och flyttillsatsmedel. En av slutsatserna var förslag på ändring av rekommenderad siktkurvor/kornstorleksfördelning hos finmaterialet; enligt Figur 1. För att kunna jämföra med svensk standard redovisas A- och B-kurvorna enligt SS 137002. Det skulle alltså främst innebära en ökning av fraktioner under 500 µm för SS 137002.



Figur 1. Jämförelse mellan kornfraktionskurvor enligt Rached m.fl. (2009), ASTM C 33, samt SS 137002.

Under sent 1800-tal fram till mitten av 1900-talet användes även sparsten. Detta var större stenar (upp till ca 1/3 m³) som fick användas i delar av konstruktionen där det inte skulle förekomma dragspänningar. Andelen sparsten fick utgöra ungefär 10 till 20 vol-% av konstruktionen. Den främsta motiveringen för sparsten var att minska materialkostnaden, eftersom priset för OPC relativt sett var mycket högre under början av 1900-talet. Användningen minskade i taket med att priset för OPC gick ner och det blev ekonomiskt omotiverat (Rosenqvist, 2018).

Ett annat alternativ vid sidan om sparsten är återvunnen betong som fyllnads-material (TC 37-DRC, 1986). En fördel skulle kunna vara att vidhäftningen har potential att bli bättre mellan ny och gammal cementpasta jämfört med ny cementpasta och stenyttan hos sparsten. Då cementpasta möter stenyttan bildas det

så kallade "interfacial transition zone" (ITZ), som är ett lager där det effektiva vattencementtalet blir högre. Ett problem kan dock vara att det finns en osäkerhet i den återvunna betongens kvalitet.

2.6 GROV BEDÖMNING AV ALTERNATIVEN

I en UNEP rapport av Scrivener et al. (2016) redovisas de ekonomiskt möjliga vägarna för att göra betongindustrin miljövänligare för att klara "2 °C -målet". Slutsatsen är att de två främsta områden som det behöver arbetas med för att reducera betongindustrins CO₂-utsläpp är att använda mer tillsatsmaterial och samtidigt använda OPC på ett mer effektivt sätt.

Nedan listas de mest lovande alternativen för framtidens vattenbyggnadsbetong, där betongmassans värmeutveckling ofta är en avgörande faktor:

- Låg ersättning med flygaska, slagg, eller kalkfyller för att undvika negativa effekter som stora ersättningsmängder kan medföra.
- Optimering av betongreceptet, särskilt med hänsyn till att minimera bindemedelshalten t.ex. med hjälp av tillsatsmedel, justering av ballastfraktionerna och möjligtvis nyttjande av sparsten.
- Användning av olika betongrecept beroende på exponeringen som respektive konstruktionsdel utsätts för. Bindemedel och betongrecept, vilka ger hög beständighet används lokalt där konstruktionen kräver det. Bindemedel, och betongrecept, med tillsatsmaterial och minimerad mängd OPC, som ger låg beständighet, används i konstruktionsdelar med liten eller ingen exponering.

Beroende på hur marknaden och eventuell lagstiftning ser ut framöver kan det inte uteslutas att det blir ett bindemedel som mer eller mindre blir "tvingande" genom att alternativ inte längre erbjuds. Det verkar rimligt att de produkter som kommer ut på marknaden i närtid kommer vara i likhet med första punkten ovan.

Under denna litteraturstudie noterades det att det finns väldigt lite information tillgängligt om befintliga konstruktioner. Den litteratur som hittades var Rosenqvist (2018) och Kleivan et al. (1994), men dessa nämnde endast ett fåtal kraftverk och relativt lite information om beständigheten hos dessa då det inte var huvudsyftet med deras rapporter. Eftersom tillsatsmaterial använts under 1900-talet så finns det befintliga resultat att hämta för att analysera, d.v.s. vilka konstruktioner som klarat sig bäst.

Den information som vore av intresse är vilken betong och byggnadsteknik som har använts, samt hur många renoveringar och ombyggnationer som olika anläggningar har krävt på grund av undermålig beständighet hos betongen. Ett sådant arbete skulle öka kompetensen kring vilka alternativa bindemedel av de som använts historiskt som är bäst lämpade för vattenkraftsbyggnader.

3 Vattenbyggnadsbetong med tillsatsmaterial

Denna litteraturstudien har lagt fokus på möjliga bindemedel för framtida vattenbyggnadsbetong. I detta kapitel beskrivs tre tillsatsmaterial som kan användas för att ersätta en del av cementen enligt den första punkten i avsnitt 2.6. Det beskrivs även hur en ersättning med respektive tillsatsmaterial påverkar betongens egenskaper. Därmed ges en uppfattning om huruvida dessa bindemedelskombinationer uppfyller de önskade egenskaperna på vattenbyggnadsbetong som redovisats i kapitel 2. Efter genomgång av varje tillsatsmaterial ges även en sammanfattning av för- och nackdelar, samt vilka kunskapsluckor som identifierats från litteraturstudien.

För vattenkraftsbyggnader blir de dimensionerande exponeringsklasserna XC4 och XF3 enligt SS 137003:2015 tillsammans med vattentäthet. Därmed ställs det krav på $v_{ct,ekv}$, tillsammans med att OPC-halten ska vara $\geq 200 \text{ kg/m}^3$. I Tabell 1 nedan redovisas tillåtna bindemedel enligt SS 137003:2015 och SS-EN 197-1:2011 för XC4 och XF3. De relevanta alternativen för vattenbyggnadsbetong är alltså flygaska med lågt kalciuminnehåll, slagg, och kalkfiller med organiskt kolinnehåll under 0,20 %.

Tabell 1. Tillåtna bindemedel enligt SS 137003:2015 och SS-EN 197-1:2011 för XC4 och XF3.

CEM	Klinker	Slagg	Flygaska ¹⁾	Kalkfiller ²⁾	Mindre komponenter ³⁾
I	95-100%				0-5
II/A-S	80-94%	6-20			0-5
II/B-S	79-65%	21-35			0-5
II/A-V	80-94%		6-20		0-5
II/B-V	79-65%		21-35		0-5
II/A-LL	80-94%			6-20	0-5
II/A-M	80-94%	-----12-20-----			0-5
II/B-M	79-65%	-----21-35-----			0-5

¹⁾ med kalciuminnehåll $< 10\%$.

²⁾ med organiskt kolinnehåll $< 0,20\%$.

³⁾ t.ex. gips ingår alltid för att hindra falsk bindning p.g.a. aluminaten i bindemedlet.

Litteraturstudien har fokuserat på review-litteratur och begränsats till studier om bindemedel som innehåller låga mängder av slagg (CEM II/A-S, CEM II/B-S), flygaska (CEM II/A-V, CEM II/B-V), och kalkfiller (CEM II/A-LL). Dock så innebär CEM II/A-M och CEM II/B-M extremt många kombinationer. Ingen review-litteratur har påträffats som på ett systematiskt och översiktligt sätt redogör för materialegenskaper och beständighet för de möjliga kombinationer som innefattas av CEM II/A-M och CEM II/B-M. På grund av detta läggs ingen fokus på att CEM II/A-M och CEM II/B-M, utan det konstateras bara att det saknas review-litteratur för dessa bindemedelskombinationer.

När tillsatsmaterial ska blandas in i betongen är det viktigt att ta hänsyn till vilket sätt OPC har ersatts på. De tre mest förekommande sätten att ersätta en fraktion av OPC med tillsatsmaterial är (1) med hänsyn till effektivitetsfaktorn (k-värdet), (2)

massa OPC mot massa tillsatsmaterial, eller (3) volym OPC mot volym tillsatsmaterial. Eftersom de olika tillsatsmaterialen och OPC inte har samma k-värde, samt kompakt- och skrymdensitet resulterar dessa tre ersättningsmetoder i tre olika betongrecept med olika materialegenskaper.

3.1 FLYGASKA

Pulveriserad flygaska som används till betong tas från kolkraftverk där den samlas in innan den passerar skorstenarna. Flygaska har normalt kornstorlekar mellan 1 och 200 µm och delas in beroende på kalkhalt. Klass C har högt CaO-innehåll (> 10 %) och klass F har ett lågt CaO-innehåll (< 10 %), enligt SS-EN 450-1:2012. Tabell 2 presenterar några exempel på hur den kemiska sammansättningen av flygaska kan variera beroende på olika länder (Betonghandbok Material, 2017).

Tabell 2. Kemisk sammansättning av flygaskor från Betonghandbok Material 2017.

Mineral-komponent	Tyskland (stenkol) [%]	Storbritannien (stenkol) [%]	Nordamerika (stenkol) [%]	Nordamerika (brunkol) [%]
SiO ₂	34-50	48-53	35-53	25-60
Al ₂ O ₃	21-30	28-40	17-23	10-25
Fe ₂ O ₃	8-29	5-12	6-7	3-22
CaO	2-12	1-3	2-15	7-25
MgO	1-5	1,3-1,6	1-5	1-10
SO ₃	0,1-2,1	0,5-0,7	0,2-3	0,2-12
Na ₂ O	0,4-2,0	0,2-1,6	1-2	0,2-18
K ₂ O	1-5	1,3-4,3	0,6-2	0,2-2

Eftersom flygaska är en restprodukt från en förbränning innebär det en risk för att obränt material följer med vilket kan bidra till stora variationer av flygaskans innehåll och kvalitet. På grund av detta mäts glödförlusten ("loss on ignition", viktörlust vid uppvärmning till +975 °C), vilket visar hur stor andel av flygaskan som var obränd. Eftersom obränt material innebär en energiförlust för kraftverken så är det även fördelaktigt för kraftverken att minimera denna. Den mest högpresterande kategorin av flygaska för betongtillverkning är, enligt SS-EN 450-1, flygaska med en glödförlust på < 5 %.

Två effekter som flygaska har på hydratationen är fillereffekten, och att den bidrar till extra reaktionsytor. Fillereffekten innebär att flygaskan till en början inte kan reagera för att bilda några hydrater. Därmed är det effektiva vattencementalet högre för OPCn i blandningen, vilket bidrar till att alla OPC har tillgång till mer vatten och därmed en mer fördelaktig hydratation. De extra reaktionsytorna som flygaskan bidrar med innebär att sannolikheten ökar för att fler OPC-reaktioner startar tidigare.

För flygaska får k-värdet (se ekvation 2) sättas till 0,5 då flygaskan utgör upp till 20 % av den totala bindemedelsmängden då tre villkor enligt SS 137003:2015 är uppfyllda, annars får den sättas till 0,4 enligt SS-EN 206:2013. I Tabell 3 redovisas en jämförelse mellan sju recept för att ge en uppfattning om k-värdenas inverkan vid ersättning av OPC med flygaska. Notera att det enligt Tabell 1 kan vara

aktuellt att använda upp till strax under 35 % flygaska (klass F) i bindemedlet för de aktuella exponeringsklasserna enligt dagens standarder.

Tabell 3. Jämförelse mellan sex recept med flygaska och ett recept utan flygaska.

Bindemedel [kg/m³]	OPC [kg/m³]	Flygaska [kg/m³]	Vatten [kg/m³]	Andel flygaska	k	vct _{ekv}	vbt k=1
300	300	0	135	0%	-	-	0,45
300	255	45	135	15%	0,5	0,49	0,45
300	255	45	125	15%	0,5	0,45	0,42
368	255	113	135	31%	0,4	0,45	0,37
300	210	90	135	30%	0,4	0,55	0,45
300	210	90	111	30%	0,4	0,45	0,37
435	210	225	135	52%	0,4	0,45	0,31

Exempel på betongdammar där flygaska använts: Keepit-dammen, Clatworthy-dammen, och Hartwell-dammen. Keepit-dammen började byggas 1939 i Australien, sedan pausades bygget mellan 1941 till 1946 p.g.a. andra världskriget och stod klar 1960 (State water, 2009). Clatworthy-dammen började byggas 1957 i Storbritannien och stod klar 1960 (Wilks S., 2009). Hartwell-dammen började byggas i USA av USAs armé 1955 och stod klar 1963 (USACE 2019).

I gravitationsdammen Førrevatn i Norge användes ett bindemedel som innehöll OPC tillsammans med 25 % flygaska och 5-10 % mikrosilika. Detta var en RCC-betong (Kleivan et al., 1994). Dammen stod klar 1986 (Nynäs H., 2013).

3.1.1 Färska egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan flygaska har hos de färska egenskaperna.

Konsistens

På grund av att flygaskan består av sfäriska korn bidrar detta till en så kallad kullagereffekt, vilket bidrar till en mer lättflytande massa. Enligt Neville (2011) bidrar den elektriska laddningen på partiklarna även till en positiv dispersionseffekt då de adsorberas på OPC-partiklarna.

Vid en ersättning upp till 20 % flygaska så kan vattenbehovet minskas m.h.t. konsistensen, men vid en ersättning över 20 % ökar vattenbehovet igen (TC 238-SCM, 2018). Förklaringen som gavs till detta var att den specifika ytan ökade och dispersionseffekten minskade. Vid användning av flygaska som har större än 1 % glödförlust ökar vattenbehovet öka (TC 238-SCM, 2018).

Det har visat sig att flygaska adsorberar tillsatsmedel, såsom flyttillsatsmedel. Därmed krävs det ofta högre dosering jämfört med betong utan flygaska.

Sammanhållning/Stabilitet

Flygaska, utan tillsatsmedel, som ersätter OPC (med samma vikt) bidrar till ökad kohesivitet (sammanhållning) och minskad risk för blödning (vattenseparation). Detta på grund av kornens runda form och, jämfört med OPC, lägre skrymdensitet, vilket bidrar till större bindemedelsvolym.

Vid användning av tillsatsmedel är det viktigt att testa tillsatsmedelskombinationer som ska användas tillsammans för att säkerställa att de bibehåller sin funktion med olika bindemedel. Det har visat sig att kombinationer av tillsatsmedel kan bidra till en större risk för separation och därmed motverka sammanhållningen i betong.

Tillstyvning/Bindningstid

Den puzzolana reaktionen av flygaska innebär generellt sett att struktur- och hållfasthetsutvecklingen blir långsammare, vilket resulterar i en längre tid för att bearbeta betongen på ett fördelaktigt sätt. Vid användning av flygaska med högt CaO-innehåll (klass C) som har en hög reaktivitet kan det bli motsatt effekt, d.v.s. en kortare bindningstid (TC 238-SCM, 2018).

3.1.2 Hårdnade egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan flygaska har hos de hårdnade egenskaperna.

Täthet

Tillsats av flygaska bidrar till en tätare betong (mindre genomsnittsdiameter hos porerna) vid låg inblandning jämfört med betong med endast OPC. Detta visar sig bland annat genom reducerad hastighet vid kapillärabsorption. En ökad fraktion flygaska resulterar i en ökad fraktion flaskhalsar (flaskhalsar skapas av stora porer som är omgivna av mindre porer enligt kapitel 2.2.1) och en ökad andel mesoporor (därmed minskad andel större kapillärporer) (Strand 2018).

Enligt en studie av Zhao et al. (2019) minskar genomsnittsporstorleken med ökad mängd flygaska. Resultaten visar även att porositeten minskar då 20 % av cementen ersätts med flygaska, och ökar sedan då 40 % av cementen ersätts med flygaska. Anledningen som ges till detta är att med en för hög fraktion flygaska i relation till OPC så finns för lite kalciumhydroxid för att all flygaska ska kunna hydratisera. Ytterligare en sak som händer med en ökad mängd flygaska, enligt LF-NMR mätningar (lågfälkt kärnmagnetisk resonans) av Zhao et al. (2019), är att den ekvivalenta porradien ökar (ekvivalenta porradien definieras i artikeln). Det innebär att det blir en grövre porstruktur, främst för mesoporerna. Mätningarna utfördes efter 28 dagars hydratation. Förklaringen till att porositeten hos mesoporerna blir grövre, enligt Zhao et al. (2019), är att under den tidiga hydratationen har flygaskan en inert effekt vilket innebär att det är färre kalciumsilikathydrater som bildas jämfört med om OPC inte ersatts med flygaska.

Hållfasthet

Hållfasthetstillväxten minskar med ökande mängd flygaska. Men det har visat sig att hållfasthetstillväxten fortsätter under en längre tid, vilket innebär att betong med flygaska kan ha högre sluthållfasthet jämfört med betong utan flygaska. Detta beror dock på OPCn (vilket kemiskt innehåll) och hur OPCn ersätts (enligt tidigare kan man ersätta (1) m.h.t. effektivitetsfaktorn (k-värdet), (2) massa OPC mot massa tillsatsmaterial, eller (3) volym OPC mot volym tillsats-material).

Frostbeständighet

Det går att göra betong som innehåller flygaska frostbeständig genom att tillsätta luftporbildare. Men det är känt att flygaskan gör det svårare eftersom den har en tendens att adsorbera tillsatsmedel (t.ex. luftporbildare). En högre glödförlust leder till minskad lufthalt, varför det finns krav på maximal glödförlust (Betonghandbok Material, 2017). Tunstall (2016) har studerat denna adsorption och skriver bland annat att de luftporbildare som har större benägenhet att interagera med kalciumjonerna bidrar till frostbeständighet vid en lägre dosering av luftporbildaren. Tunstall (2016) fann även ett samband som visar att en högre dos luftporbildare bidrar till en bättre frostbeständighet även om luftporsanalysen visade att luftporsystemet verkade sämre (längre avståndsfaktor och/eller lägre lufthalt). Tunstall (2016) tror att detta beror på att ökad mängd luftporbildare har en positiv effekt på luftporsskalens egenskaper (övergången mellan luftporen och de mindre omgivande kapillär- och gelporerna) i betongen.

På grund av att hydratationen blir långsammare för betong där en fraktion av OPC ersatts med flygaska ökar risken för tidig frysning. Eftersom hydratationshastigheten reduceras så sänks hållfasthetstillväxten och obundet vatten som kan orsaka frysskador förekommer under en längre tid. Enligt Eurokod så anses betongen vara skyddad mot tidig frysning då den uppnått en tryckhållfasthet över 5 MPa. Enligt mätresultat presenterade av Kaasgard m.fl. (2012) har betong med 25 % flygaska med 1 dygns ekvivalent härdningsålder (som härdats i 10 till 60 °C) uppnått en hållfasthet över 5 MPa med god marginal i de flesta fall. Detta anses innebära beständighet mot tidig frost. Det är dock viktigt att beakta att 1 dygn ekvivalent härdningsålder tar det längre än 1 dygn i realtid att uppnå då medeltemperaturen i betongen är under 20 °C.

Kemisk beständighet

Nedan sammanfattas vilken inverkan flygaska har beträffande den kemiska beständigheten och inverkan av karbonatisering på den hårdnade strukturen.

Urlakning

Urlakning är, enligt tidigare, upplösning av kalcium, och främst kalciumhydroxid. Då flygaskan reagerar med kalciumhydroxid bildas en produkt som är mindre löslig i vatten. Det innebär även att det finns mindre kalciumhydroxid som kan urlakas. Enligt Nordström E. & Hassanzadeh M. (2018) blir därmed den hårdnade pastan mer beständig med urlakning. Det har inte hittats några studier som gjort mätningar på urlakning hos betong med flygaska.

ASR

För att skydda mot ASR ska alkaliniteten (främst Na⁺- och K⁺-koncentrationen) vara låg under betongens livslängd, och ballasten ska inte innehålla reaktiv ballast (alkalilöslig kisel). Lothenbach m.fl. (2011) skriver att användandet av flygaska (och andra tillsatsmaterial) bidrar, bland annat, till att sänka pH i porlösningen, vilket bidrar till en ökad beständighet mot ASR.

Sulfatangrepp

Resultat från Ferraris (2006) indikerar att klass F flygaska (låg CaO-halt) har högre beständighet mot sulfatangrepp jämfört med klass C flygaska (hög CaO-halt). Ingen förklaring till varför ges i artikeln eftersom den fokuserar på att jämföra olika metoder för att mäta sulfatresistens.

Enligt Dunstan (1987) bidrar flygaska med en ökad sulfatresistens så länge förhållandet $(\%CaO-5)/(\%Fe_2O_3)$ är lägre eller lika med 3,5. Tickalsky (1995) visade att då flygaskan har ett CaO/SiO₂-ratio på under 0,25 fanns ingen C₃A vilket ökar sulfatresistensen. Om samma ratio var över 0,60 minskade sulfatresistensen (TC 238-SCM, 2018).

Karbonatisering

När flygaska blandas in i betong sänks Ca/Si-rationen vilket innebär att betongen blir mer känslig mot karbonatisering (kalciuminnehållet sjunker). Med ökad fraktion flygaska ökar karbonatiseringshastigheten. Då OPC karbonatiserar blir porositeten lägre och strukturen blir mer tät. När betong med flygaska karbonatiserar blir minskningen av porositeten inte lika stor, och då bindemedlet består av höga fraktioner flygaska kan porositeten bli högre (Strand 2018).

Karbonatisering resulterar i att flaskhalsarna i mikrostrukturen reduceras och fraktionen mesoporor ökar medan den totala porositeten minskar. Kapillär-sugningsmätningar visar att den hårdnade cementpastan minskar permeabiliteten för vattensugning efter karbonatisering, men denna effekt minskar med ökande fraktion (klass F) flygaska (Strand 2018). Karbonatisering kan även påverka ytan precis ovanför vattenlinjen kan den torka och karbonatisera. När vattenytan sedan höjs igen till den karbonatiserade ytan så kan karbonatisering därmed påverka resistens mot urlakning. Eftersom kapillär-sugningsmätningarna visar att den hårdnade cementpastan minskar permeabiliteten är det troligt att resistensen mot urlakning förbättras (karbonatisering minskar urlakning).

Erosions- och Nötningsbeständighet

Flygaska bidrar med ett urlakningsmotstånd enligt tidigare, och hållfastheten går att öka genom att ytterligare sänka $v_{ct,ekv}$, vilket innebär att i teorin kan betong med flygaska ha ett relativt högt erosions- och nötningsmotstånd. Det saknas dock studier på hur erosions- och nötningsbeständigheten är i betong med flygaska.

Tidig sprickbildning

Nedan sammanfattas hur flygaska inverkar på risken för tidig sprickbildning och potential för självläkning.

Temperaturbetingad rörelse

Då OPC ersätts med flygaska så minskar den totala värmeutvecklingen, effekt per massa bindemedel. Därmed kommer temperaturökningen i mitten av ett givet betongtvärsnitt bli mindre, vilket leder till att det blir lättare att hålla temperaturdifferensen över tvärsnittet under 20 °C.

Fuktbetingad rörelse

Enligt resultat som presenteras av Saha (2018) blir uttorkningskrympningen också mindre med ökad fraktion av flygaska (klass F). Li och Zhang (2019) presenterar en studie där de testat uttorkningskrympning i betong med en ersättning upp till 20 % flygaska. De experimentella resultaten visar enligt Li och Zhang (2019) att den mest fördelaktiga ersättningsnivån är 20 % flygaska för krympningen.

Den tidiga kombinerade spänningen från fukt- och temperaturbetingad rörelse blir därmed lägre, vilket minskar risken för tidig sprickbildning. Dock så krävs det att hållfasthetstillväxten är tillräckligt snabb för att hålla emot de uppkomna spänningarna. Med en högre fraktion flygaska blir hållfasthetstillväxten lägre, varför andelen flygaska och bindemedelshalt måste optimeras.

Sjävläkning

Rajczakowska (2019) visade att betong med vbt 0,45 ($k=1$) och CEM II/A-V (upp till 20 % flygaska) kunde visuellt fylla igen spricköppningar bättre än motsvarande betong med endast OPC, men det blev ingen återhämtning i böjhållfasthet.

3.1.3 Sammanställning för- och nackdelar, samt kunskapsluckor

Enligt litteraturstudien bedöms betong med upp till 20 mass-% klass F flygaska vara ett intressant alternativ för vattenbyggnadsbetong som bör studeras vidare. Fördelarna med flygaska är:

- + Förbättrad arbetbarhet.
- + Minskad värmeutveckling och långsam utveckling av elasticitetsmodulen.
- + Tätare (okarbonatiserad) betong m.h.t. kapillärsugning.
- + Ökad beständighet mot ASR, och i vissa fall sulfatangrepp.

Nackdelarna med betong med flygaska är:

- Ökad risk för separation vid användning av tillsatsmedelskombinationer, samt adsorption av tillsatsmedel vilket innebär ökad doseringsmängd.
- Långsam tidig hydratation och hållfasthetsutveckling vilket minskar motståndet mot tidiga sprickor.
- Snabbare karbonatiseringshastighet som bidrar till grövre mikrostruktur vid betongytan, vilket resulterar i en ökad permeabilitet och därmed troligtvis minskat motstånd mot urlakning.

Identifierade kunskapsluckor med flygaska:

- Hur stor är risken för tidiga sprickor vid gjutning av grova konstruktioner, och hur varierar risken beroende på hur stor andel flygaska som betongen innehåller?
- Hur väl fungerar det att reparera konstruktioner, som har betong med endast OPC, med betong som innehåller flygaska? Hur blir t.ex. vidhäftningen mellan reparationsbetongen och den äldre betongen? Då reparationsbetongen har andra egenskaper jämfört med den äldre betongen, innebär detta ytterligare

risker för hur konstruktionen fungerar framöver (m.h.t. t.ex. fukttransport genom betongen)?

- Hur goda självläkningsegenskaper har betong som innehåller flygaska, och hur varierar självläkningsegenskaperna beroende på hur stor andel flygaska som betongen innehåller?
- Hur resistent är betong som innehåller flygaska mot kombinerade nedbrytningsmekanismer som vattenbyggnader kan utsättas för (urlakning, erosion, självläkning, och frost)?

3.2 SLAGG

Slagg som används till betong är en restprodukt från masugnen vid produktionen av tackjärn. När slaggen kommer ut ur ugnen släcks den med vattenkylning och mals sedan. Den malda (vattenkylda) slutprodukten har egenskaper som delvis kan ersätta OPC. Det finns även luftkylning av slagg, men det har inte varit lika effektivt som vattenkylning i större skala. Luftkyld slagg resulterar i större, icke reaktiva, bitar och används främst som fyllnadsmaterial eller som ballast i betong. Tabell 4 presenterar några exempel på hur den kemiska sammansättningen av slagg kan se ut (Betonghandbok Material, 2017).

Tabell 4. Kemiska sammansättning av slagg, från Betonghandbok Material 2017.

Mineral-komponent	Sverige & Finland [%]	Tyskland [%]	Frankrike [%]	USA [%]
CaO	30,7-39,8	34,6-42,5	37,1-43,5	29-42
MgO	9,8-17,3	6,3-12,4	4,4-7,7	8-19
Al ₂ O ₃	8,3-13,1	10,1-15,3	8,6-16,2	7-17
SiO ₂	30,7-37,0	33,5-39,5	34,8-43,8	32-40
S	1,20-1,39	0,68-1,46	0,7-1,2	0,7-2,2
MnO	0,06-0,62	0,09-0,53	0,18-0,45	0,2-1,0
Na ₂ O+K ₂ O	0,8-1,9	0,3-1,6	0,7-1,2	-
TiO ₂	1,71-3,21	0,43-2,45	-	-

Även med slagg så mäts glödsförlusten (samma som för flygaska, se avsnitt 4.1). När malda granulerad slagg lagras utomhus så kan kornen överst i högen, som är i kontakt med luften, binda vatten eller koldioxid och bilda ett skal över högen. Slagg som kommer direkt ut ur ugnen har en glödförlust på 0,2 till 0,5 %, men denna blir några procent högre för det hårdnade skalet på högen (som bundit vatten och koldioxid). Genom att förhydratisera slaggen lite så bildas hydrater som är mjukare än de färskas kornen. Därmed sparas energi vid malningen, och gör det lättare att producera malda korn med en större specifik yta. Slagg mals vanligtvis till en mindre kornstorlek jämfört med flygaska.

Effektivitetsfaktorn (k-värdet) för slagg får sättas till 0,8 då slaggen utgör upp till 20 % av den totala bindemedelsmängden då tre villkor enligt SS 137003:2015 är uppfyllda. I övrigt får k-värdet sättas till 0,6. I Tabell 5 redovisas en jämförelse mellan sju recept för att ge en uppfattning om k-värdenas inverkan vid ersättning av OPC med slagg. Enligt Tabell 1 kan upp till strax under 35 % slagg användas i bindemedlet för de aktuella exponeringsklasserna enligt dagens standarder.

Tabell 5. Jämförelse mellan sex recept med slagg och ett recept utan slagg.

Bindemedel [kg/m³]	OPC [kg/m³]	Slagg [kg/m³]	Vatten [kg/m³]	Andel slagg	k	vct _{ekv}	vbt k=1
300	300	0	135	0%	-	-	0,45
300	255	45	135	15%	0,8	0,46	0,45
300	255	45	131	15%	0,8	0,45	0,44
311	255	56	135	18%	0,8	0,45	0,43
300	210	90	135	30%	0,6	0,51	0,45
300	210	90	120	30%	0,6	0,45	0,40
360	210	150	135	42%	0,6	0,45	0,38

I en rapport från Storbritannien har det uppmätts utsläpp på 0,913 kg CO₂ per kg klinker (notera att denna skiljer sig från siffran i kap 2.4 eftersom detta är ett uppmätt värde och siffran i 2.4 är ett genomsnittligt värde) och 0,067 kg CO₂ per kg slagg (framräknat exklusive utsläpp till följd av produktionen av tackjärn) (TC 238-SCM, 2018). Därmed kan ersättning minska utsläppen med 19 % vid ersättning med 20 % (då k = 1).

I Norge göts Virdnejavidammen med ett OPC som innehöll 30 % slagg blandat tillsammans med 10 % mikrosilika. Detta är, likt Førrevatn, också en välkompakterad betongdamm ("roller compacted concrete", RCC).

3.2.1 Färska egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan slagg har hos de färska egenskaperna.

Konsistens

Generellt sett så bidrar slagg till en bättre arbetbarhet vilket innebär att mängden flyttillsatsmedel kan sänkas jämfört med när endast OPC används. Denna effekt minskar dock då specifika ytan på slagget ökar och vbt < 0,30 (TC 238-SCM, 2018).

När 15 % av OPC ersattes med slagg visade det sig att självkompaktions-egenskapen förlängdes från 30 till 60 min (TC 238-SCM, 2018).

Sammanhållning/Stabilitet

Då en fraktion OPC ersätts av finmalt slagg med större specifik yta minskar blödningen (vattenseparation) (TC 238-SCM, 2018).

Likt flygaskan så bidrar tillsatsmedel till en större risk för separation, varför tillsatsmedelskombinationen måste testas innan gjutning (TC 238-SCM, 2018).

Tillstyvning/Bindning

Generellt sett ökar tillstyvningstiden då en fraktion OPC ersätts med slagg. Denna effekt blir större (tillstyvningstiden ökar) med en lägre omgivande temperatur.

3.2.2 Hårdnade egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan slagg har hos de hårdnade egenskaperna.

Täthet

Då en ökad fraktion OPC ersätts med slagg så minskar permeabiliteten. En ökad mängd slagg har visat sig kunna öka andelen flaskhalsar och även öka andelen mesoporer (och därmed minska andelen större kapillärporer) (Strand 2018). Enligt Johari m.fl. (2011) visar kvicksilverporosimetrimätningar att det främst är porer under 30 nm som ökar, och andelen porer mellan 30 och 50 nm minskar.

Hållfasthet

Hållfasthetstillväxten följer reaktionshastigheten som, enligt tidigare, blir lite långsammare med ökad andel slagg. Beroende på reaktiviteten, den specifika ytan, och halten uppnår betong med slagg samma hållfasthet som betong med endast OPC efter 10 till 35 dygn. Den långsamma hållfasthetsutvecklingen kompenseras dock med en högre sluthållfasthet jämfört med betong som endast innehåller OPC (TC 238-SCM, 2018).

Vid höga temperaturer, som de inre delarna av grova betongkonstruktioner utsätts för, sker en temporär ökad hållfasthetsutveckling som sedan resulterar i en lägre sluthållfasthet. Vid ett försök där hållfasthetstillväxt vid 20 °C jämförs med adiabatisk (isolerad) hållfasthetstillväxt (vilket motsvarar härdning i grova konstruktioner), visar resultaten att den adiabatiska hållfasthetstillväxten medför att slaggbetongen (upp till 35 % ersättning) har samma eller högre hållfasthet än betongen med endast OPC efter 1 dygn. Efter den adiabatiska härdningen var hållfastheten efter 28 dygn ungefär samma som för proverna som härdats i 20 °C (TC 238-SCM, 2018).

Slagg i betong har även visat sig kunna resultera i en högre böjdraghållfasthet jämfört med betong med endast OPC. Detta är på grund av en mycket tätare struktur (TC 238-SCM, 2018).

Resultat från mätning av krypningen hos betong som innehåller slagg motsäger ofta varandra. Detta är på grund av att det är svårt att jämföra då det är starkt beroende på receptet, härdningen, belastningen, och när belastningen påbörjades. Men med hänsyn till hållfasthetsutvecklingen är det troligt att krypningen blir större för betong med slagg jämfört med betong med OPC i början av belastningen och mindre på slutet eftersom den beror på förhållandet mellan spänningen från lasten dividerat med betongens hållfasthet (TC 238-SCM, 2018).

Frostbeständighet

Luftporbildande tillsatsmedel måste användas för att få betong med slagg frostbeständig. Enligt tidigare krävs det att tester genomförs innan gjutningen så att tillsatsmedelskombinationer fungerar tillsammans. Därmed kan önskad effekt åstadkommas utan risk för blödning eller annan separation.

Kemisk beständighet

Nedan sammanfattas vilken inverkan slagg har hos den kemiska beständigheten och vilken inverkan karbonatisering har.

Urlakning

Urlakningen minskar generellt sett för betong som innehåller slagg jämfört med betong som endast innehåller OPC (TC 238-SCM, 2018).

ASR

Slagg reducerar alkaliniteten, minskar mobiliteten av alkalierna, minskar kalciumoxiden och minskar permeabiliteten hos betongen (Özbay m.fl. 2016). Detta resulterar i en ökad beständighet mot ASR.

Sulfatangrepp

Slaggen bidrar till en högre sulfatresistens på grund av minskningen av C_3A , löslig $Ca(OH)_2$, och permeabiliteten hos betongen (Özbay m.fl. 2016).

Karbonatisering

Generellt resulterar en ökad fraktion slagg i en ökad karbonatiseringshastighet (Özbay m.fl. 2016). Karbonatisering (likt flygaskan) resulterar i att flaskhalsarna i mikrostrukturen reduceras och fraktionen mesoporerna ökar medan den totala porositeten minskar (Strand 2018). Kapillärsugningsmätningar visar att upp till 35 % slagg så minskar permeabiliteten för vattensugning efter karbonatisering (Strand 2018). För en större ersättning av 70 % slagg blir permeabiliteten för vattensugning oförändrad efter karbonatiseringen. (Enligt tidigare så påverkar karbonatiseringen främst resistensen mot urlakning vid skvalpzonen.)

Erosions- och nötningsbeständighet

Då slagg bidrar till en tätare betong, ökat urlakningsmotstånd, och en högre hållfasthet efter lång tid, innebär detta teoretiskt att det blir ett högre erosions och nötningsbeständighet. Det saknas dock studier på erosions och nötningsbeständighet hos betong som innehåller slagg. Özbay m.fl. (2016) nämner dock en studie som visade att en ersättning med 20 och 40 % slagg gav bättre resultat.

Tidig sprickbildning

Nedan sammanfattas hur slagg inverkar på risken för tidig sprickbildning och potential för självläkning.

Temperaturbetingad rörelse

Enligt tidigare (4.2.1 Tillstyvning/Bindning) blir reaktionen långsammare med slagg. Den bakomliggande orsaken är att slaggreaktionen är beroende av alkalier som är produkter från OPC-reaktionen. Kalciumhydroxid och alkalier fungerar som aktivatorer till slaggreaktionen, vilket innebär att den blir något fördröjd jämfört med OPC-reaktionen (likt flygaskareaktionen). Därmed blir den maximala värmeenergin som avges under första dygnet lägre då en fraktion av OPC ersatts med slagg (anta $k=1$). Detta bidrar till lägre maxtemperatur i betongen och minskar risken för sprickor till följd av temperaturbetingad rörelse. Då omgivande temperatur är låg blir slaggreaktionen ytterligare fördröjd större vilket resulterar i en ytterligare minskad maxtemperatur i betongen (TC 238-SCM, 2018).

Fuktbetingad rörelse

Den autogena krympningen hos betong som innehåller slagg ökar med minskad vbt och den ökar även med ökad fraktion slagg. Detta kan förklaras med att elasticitetsmodulens utveckling blir långsammare med slaggtillsats. Men den uppnår samma värde som för betong med endast OPC efter lång tid (ca 150 dygn). Efter lång tid har betong med slagg en högre draghållfasthet med ungefär samma elasticitetsmodul som betong av ren OPC (TC 238-SCM, 2018).

Li och Zhang (2019) presenterar en studie där de testat uttorkningskrympning i betong med en ersättning upp till 20 % slagg. Resultaten visar att den mest fördelaktiga ersättningsnivån är 20 % slagg för att minimera krympningen.

Sjävläkning

Det finns en brist på studier om sjävläkning av betong som innehåller slagg.

3.2.3 Sammanställning för- och nackdelar, samt kunskapsluckor

Enligt litteraturstudien så bedöms betong med upp till 30 mass-% slagg vara ett intressant alternativ för vattenbyggnadsbetong som bör studeras vidare.

Fördelarna med denna slagg är:

- + Förbättrad arbetbarhet.
- + Minskad värmeutveckling och långsam utveckling av elasticitetsmodulen.
- + Tätare (okarbonatiserad) betong.
- + Ökad beständighet mot ASR och sulfatangrepp.
- + Upp till 35 % ersättning så blir betongen mer tät av karbonatisering (jämfört med okarbonatiserad).

Nackdelarna med betong med slagg är:

- Ökad risk för separation vid användning av tillsatsmedelskombinationer (viktigt att testa kombinationerna innan).

Identifierade kunskapsluckor med slagg:

- Hur stor är risken för tidiga sprickor vid gjutning av grova konstruktioner, och hur varierar risken beroende på hur stor andel slagg som betongen innehåller?
- Hur goda sjävläkningsegenskaper har betong som innehåller slagg, och hur varierar sjävläkningsegenskaperna beroende på hur stor andel slagg som betongen innehåller?
- Hur resistent är betong som innehåller slagg mot kombinerade nedbrytningsmekanismer som vattenbyggnader kan utsättas för (urlakning, erosion, sjävläkning, och frost)?

3.3 KALKFILLER

Normalt mals kalkfiller tillsammans med portlandklinkern, men den kan även malas separat och tillsättas vid blandningen av betongen. I vanlig CEM I får det

ingå upp till 5 % av mindre beståndsdelar. Av de fem procenten ingår normalt sett cirka två procent kalkfiller som malts tillsammans med klinkern. Enligt Tabell 1 kan det vara aktuellt att ersätta strax under 20 % av OPCn (på grund av de mindre komponenterna)

I äldre litteratur kan kalkfiller benämnas som inert (den reagerar inte under OPC-reaktionen utan fungerar endast som en filler). Det har dock visat sig i senare studier att då kalkfiller mals tillsammans med OPCn så kan det även reagera och bidra till hydratationen, även om det är i mindre utsträckning jämfört med slagg och flygaska (TC 238-SCM, 2018).

Under 1940- och 1950-talet användes kalkfiller i "E-cement". Denna typ av bindemedel började produceras på grund av det var en brist på kol i landet och produktionen av E-cement krävde mindre kol jämfört med OPC. Inmalningen var normalt sett 30-50 % (Rosenqvist 2018). Enligt Tabell 1 skulle detta bindemedel inte tillåtas idag.

3.3.1 Färska egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan kalkfiller har hos de färska egenskaperna.

Konsistens

Kalksten bidrar till en lösare konsistens och bättre arbetbarhet då den mals tillsammans med portlandklinkern vilket bidrar till att den får en hög specifik yta (TC 238-SCM, 2018). Kalksten tycks även ha en bättre kompatibilitet med tillsatsmedel jämfört med slagg och flygaska. Förklaringen till detta som ges är att tillsatsmedlen adsorberar hellre till OPC-partiklarna jämfört med kalkfillerpartiklarna (TC 238-SCM, 2018).

Sammanhållning/Stabilitet

Då kalksten mals tillsammans med portlandklinkern erhåller betongen en reducerad risk för blödning. Detta är dock beroende på finheten där effekten märks först då specifika ytan är $> 770 \text{ m}^2/\text{kg}$ (TC 238-SCM, 2018).

Tillstyvning/Bindning

Det finns lite motsägelsefulla studier beroende på kalkinnehåll, men kalkfiller tycks minska tillstyvningstiden. Förklaringen som ges till detta är att partiklarna bidrar till fler reaktionsytor och ökar hastigheten för OPC-hydratationen (TC 238-SCM, 2018).

3.3.2 Hårdnade egenskaper

Nedan sammanfattas vilken inverkan kalkfiller har hos de hårdnade egenskaperna.

Täthet

Porositeten minskar vid en tillsättning av cirka två procent kalkfiller, därefter ökar den med ökad kalciumhalt (TC 238-SCM, 2018).

Hållfasthet

Hållfastheten ökar vid en tillsättning av cirka två procent kalkfiller, därefter minskar den med ökad kalciumhalt (TC 238-SCM, 2018). Benaicha M. et al. (2019) presenterar en studie där de mäter tryckhållfastheten och elasticitetsmodulen i betong med en ersättning upp till 40 % kalkfiller. Resultaten visar att en ökad fraktion kalkfiller ger en minskad tryckhållfasthet och en minskad elasticitetsmodul. Notera att i refererad studie är jämförelsen mellan blandningar med kalkstensfiller och referensblandningen, utan kalkstensfiller, något missvisande eftersom referensblandningen inte innehåller flyttillsatsmedel.

Frostbeständighet

Frostbeständighet kan uppnås då luftporbildande medel används så att en erforderlig lufthalt erhålls (TC 238-SCM, 2018).

Kemisk beständighet

Nedan sammanfattas vilken inverkan kalkfiller har hos den kemiska beständigheten och vilken inverkan karbonatisering har.

Urlakning

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar urlakningsmotståndet. Eftersom porositeten ökar är det troligt att motståndet mot urlakning minskar.

ASR

Enligt Chen och Yan (2013) ökar resistensen mot ASR med ökande ersättning av kalkfiller upp till 25 %. Förklaringen till detta är att kalkfiller bidrar med en utspädningseffekt som resulterar i att mängden alkalier minskar.

Sulfatangrepp

För betong som innehåller kalkfiller, och därmed relativt mycket kalciumkarbonat jämfört med OPC, finns det risk för thaumasitbildning. Thaumasit bildas vid yttre sulfatangrepp och låga temperaturer ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Angreppet innebär att den hårdnade cementpastan förlorar sin hållfasthet. Troligtvis är det dock den föregående ettringit-bildningen som innebär att konstruktionen går till brott (TC 238-SCM, 2018).

Hossack A. et al. (2020) presenterar laboratorie- och fältresultat som visar att en ökad ersättning med kalkstensfiller (upp till 22%) minskar motståndet mot yttre sulfatangrepp, medan det ökar om flygaska eller slagg också tillsätts.

Karbonatisering

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar urlakningsmotståndet. Eftersom porositeten ökar är det troligt att motståndet mot karbonatisering minskar.

Erosions- och nötningsbeständighet

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar urlakningsmotståndet. Eftersom porositeten ökar är det troligt att nötningsmotståndet minskar.

Tidig sprickbildning

Nedan sammanfattas hur kalkfiller inverkar på risken för tidig sprickbildning och potential för självläkning.

Temperaturbetingad rörelse

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar den fuktbetingade rörelsen. Eftersom kalkstensfiller är delvis inert innebär detta att den totala värmeutvecklingen minskar då en andel OPC ersätts.

Fuktbetingad rörelse

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar den fuktbetingade rörelsen. Då porositeten ökar vid högre ersättningsmängder är det troligt att uttorkningshastigheten också ökar.

Sjävläkning

Ingen litteratur hittades som behandlar hur en OPC-ersättning med upp till 20 % kalkstensfiller påverkar självläkningsförmågan.

3.3.3 Sammanställning för- och nackdelar

Enligt litteraturstudien så bedöms betong med upp till 20 mass-% kalkfiller vara ett tveksamt alternativ för vattenbyggnadsbetong på grund av brist på information på flera punkter enligt ovan. Fördelarna med denna kalkstensfiller är:

- + Förbättrad arbetbarhet.
- + Minskad värmeutveckling.
- + Beständighet mot ASR.

Nackdelarna med betong med kalkfiller är:

- Ökad risk för separation vid användning av tillsatsmedelskombinationer.
- Långsam tidig hydratation och hållfasthetsutveckling vilket ökar risken för tidiga sprickor.
- Minskad beständighet mot sulfatangrepp.

Identifierade kunskapsluckor med kalkstensfiller:

- Hur stor är risken för tidiga sprickor vid gjutning av grova konstruktioner, och hur varierar risken beroende på hur stor andel slagg som betongen innehåller?
- Hur goda självläkningsegenskaper har betong som innehåller slagg, och hur varierar självläkningsegenskaperna beroende på hur stor andel slagg som betongen innehåller?

- Hur resistent är betong som innehåller kalkstensfiller mot karbonatisering?
- Hur resistent är betong som innehåller slagg mot kombinerade nedbrytningsmekanismer som vattenbyggnader kan utsättas för (urlakning, erosion, självläkning, och frost)?

4 Förmåga hos leverantörer och byggindustri

Kapitel 4 och 5 presenterar information från intervjuer med experter inom betongområdet. Svaren har skrivits ihop för att få en kontinuerlig och flytande text utan upprepningar. Svaren har även ändrats så lite som möjligt för att undvika omformuleringar som kan leda till feltolkningar. Samtliga frågor som ställdes presenteras innan de sammanskrivna svaren. Experterna svarade endast på de frågor som var relevanta för deras kunskapsområde.

Den skickades till 34 personer med koppling till följande 22 olika företag och högskolor: BESAB, Betongindustri, Cementa, Chalmers tekniska högskola, Femern, Fortum, Kungliga tekniska högskolan, Luleå tekniska universitet, Lunds tekniska högskola, NCC, Research institutes of Sweden, Schwenk, Skanska, Statkraft, Svensk betong, Svenska byggbranschens utvecklingsfond, Swecem, Sweco, Swerock, Thomas concrete group, Trafikverket, Vattenfall, och VTI. Åtta av de tillfrågade personerna sitter i Betongforskningsrådet som har i uppgift att bland annat sprida information om betongforskningen i Sverige. Tabell 6 presenterar de personer som deltagit och bidragit med informationen som ligger till grund för kapitel 4 och 5. Stort tack till samtliga som bidrog med sin expertkunskap!

Tabell 6. Personer som valt att delta i intervjuer och gett ett stort bidrag till rapporten.

Namn	Jobbar på/ Har koppling till
Göran Fagerlund	Lunds Tekniska Högskola
Henry Flisell	Swecem
Johan Hedman	Skanska
Johan Silfwerbrand	Kungliga Tekniska Högskolan, Betongforskningsrådet
Katja Fridh	Lunds Tekniska Högskola, Betongforskningsrådet
Magnus Svensson	Fortum
Manouchehr Hassanzadeh	Sweco, Betongforskningsrådet
Mikael Westerholm	Cementa
Ulf Jönsson	Femern
Urs Mueller	RISE, Research Institutes of Sweden

4.1 MATERIAL

Nedan ges en sammanfattning av hur experterna svarade på frågorna som handlade om bindemedel och tillsatsmaterial.

4.1.1 Bindemedel

Produktion/import av bindemedel i Sverige 2019.

*Hur mycket portlandcement (CEM I) produceras i Sverige?
(2 svar)*

*Hur mycket portlandcement (CEM I) importeras till Sverige?
(1 svar)*

*Hur mycket bindemedel innehållande tillsatsmaterial (CEM II osv) produceras i Sverige?
(2 svar)*

*Hur mycket bindemedel innehållande tillsatsmaterial importeras till Sverige?
(1 svar)*

Förbrukning av bindemedel 2019. Svara i procent.

*Hur stor andel av producerat bindemedel används för anläggningskonstruktioner?
(2 svar)*

Framtidsutblick.

*Vilka bindemedel efterfrågar bygg- och anläggningsbranchen idag och vilka bindemedel räknar de med att det kommer finnas tillgängliga om 10, 25, och 50 år?
(5 svar)*

*Finns det en framtid för rent portlandcement (CEM I)?
(6 svar)*

*Vilka tillsatsmaterial ser bygg- och anläggningsbranchen som användbara och i vilka kvantiteter? (flygaska med högt eller lågt kalciuminnehåll, slagg, trass, kaolinlera, etc.)
(5 svar)*

*Vilken årlig förbrukning av ett bindemedel krävs för att det skulle kunna utvecklas och skräddarsys för vattenkraftsbranschen?
(4 svar)*

En svarade att år 2018 producerade Cementa för den Svenska marknaden cirka 850 000 ton CEM I, varav cirka 450 000 ton var Anläggningscement. Samma år tillverkades cirka 1 550 000 ton CEM II. Vidare svarade en annan person att år 2019 så uppskattas den totala bindemedelsproduktionen utgöras av 10 % CEM I och 90 % CEM II. Notera att dessa siffror tyder på minskad produktion av CEM I vid jämförelse mellan år 2018 och år 2019. Vidare svarade personen att normalt används cirka 15 % av bindemedlen till anläggningskonstruktioner, men för 2019 var det uppskattningsvis 20 till 25 %. En uppskattar att det importeras cirka 300 000 ton CEM I om produkter som innehåller CEM I som delmaterial räknas in (t.ex. torrbruk).

Fem svarade att till följd av att klimatfrågan står högt upp på agendan kan efterfrågan på bindemedel med lägre klimatbelastning väntas öka ytterligare. De är även överens om att efterfrågan på bindemedelskombinationer innehållande ytterligare tillsatsmaterial kommer öka och användas där så är möjligt.

Tre svarade att en rimlig väg fram är att på ett bättre sätt nyttja bindemedel och betong med hänsyn till exponeringsmiljön. De instämmer också om att den kunskap som krävs om hur en betong till vattenkraftssektorn skulle kunna proportioneras med avseende på förbättrad livslängd och mindre skador på anläggningarna under driftsskedet redan finns. Tas hänsyn till vilken exponeringsmiljö som respektive konstruktionsdel har går det att skräddarsy betongen så rätt kvalitet används på rätt ställe. Därmed skulle det gå att minimera materialåtgången och dimensioneringen blir mer optimerad. En person kommenterade att det kan bli dyrare i produktionsskedet men med bättre ekonomi under driftfasen (med lägre underhålls- och reparationskostnader) när betongen för konstruktionen skräddarsys beroende på exponeringsmiljö. Två nämner att idag så är många konstruktioner överdimensionerade vilket innebär att

bindemedelsförbrukningen är omotiverat hög. En svarade även att kompetensen hos entreprenören/utföraren är avgörande då en hur bra betong som helst kan göras fullständigt värdelös om den hanteras fel på byggplatsen.

Fyra personer delade uppfattning om att det är svårt att bedöma vilken årlig förbrukning av ett bindemedel som skulle krävas för att det skulle löna sig att utveckla och skräddarsy ett bindemedel för vattenkraftsbranschen. En svarade att det inte ska uteslutas att ett bindemedel som passar vattenkraftbranschen redan går att få fram idag utan särskild utveckling. En annan person kommenterade att när Anläggningscementet togs fram var Vattenfalls behov mindre än 50 000 ton vilket inte var lönsamt, men det fanns förhoppningar om att bindemedlet kunde användas utanför kraftindustrin. Vidare skrev personen att så visade sig vara fallet och volymen blev mer än 200 000 ton efter några år, framförallt inom brobyggandet och betongvaruindustrin.

Enligt svar från sex personer är framtiden för användning av betong som endast innehåller CEM I som bindemedel oklar. Två svarade att det är idag svårt att motivera varför betong skulle tillverkas med CEM I som det enda bindemedlet. Två personer nämner att det givetvis finns en framtid för fortsatt produktion och möjligtvis utveckling av CEM I för att ha en god bas till bindemedelskombinationer där ett CEM I och en hög fraktion tillsatsmaterial ingår. Fyra var av samma mening om att ur såväl produktionstekniska som beständighetsaspekter är det möjligt att använda CEM II/A bindemedel för alla applikationer. Två personer svarade att om CEM I finns kvar i framtiden beror till viss del på hur bygg- och anläggningsbranschen anammar att det går lika bra att utgå från CEM II som CEM I vid användning av extra tillsatsmaterial. Två kommenterade att för att nå klinkerandelar < 65 % vid användning av extra tillsatsmaterial tillsammans med CEM II krävs en viss förändring av cement- och betongstandarden.

Fyra personer instämmer om att framtiden för hela cementindustrin är beroende av att "carbon capture storage" (CCS)-tekniken blir framgångsrik och fungerar i stor skala. Två av de fyra personerna tillägger dock att CCS-tekniken inte är helt utvecklad, och kommer inte finnas i tillräckligt stor skala under uppskattningsvis en till två decennier framåt. Dessa två delar uppfattningen om att något annat behöver göras nu för att ha en chans att klara 2 °C-målet.

En person nämner att en annan möjlighet för framtiden av CEM I skulle kunna vara att elektrokemisk kalcinering (elektrolys) utvecklas och anpassas till en tillräckligt stor skala. Optimalt vore att all koldioxid som skapas vid denna process samlas in genom CCS under processen och därmed inte släppas ut i atmosfären.

4.1.2 Tillsatsmaterial

Ersättning av cementklinker med tillsatsmaterial.

Hur ser tillgången på olika tillsatsmaterial ut i Sverige idag? Anses den vara tillräcklig?
(6 svar)

Hur ser tillgången ut för samma tillsatsmaterial enligt er bedömning de kommande 25 åren?
(5 svar)

Vad är avgörande för hur utvecklingen blir enligt er?
(3 svar)

En person konstaterade allmänt att de tillsatsmaterial som idag anses vara allmänt användbara och i vilka mängder ges i betongstandarden, dvs. upp till 35 % flygaska med lågt kalciuminnehåll (typ V) och upp till 65 % slagg beroende på exponeringsklass. Utöver dessa material finns det bindemedel som kan innehålla andra material såsom kalkrik flygaska och naturliga puzzolaner som t.ex. kalcinerad lera. Det pågår forskning kring kalcinerade leror och andra typer av flygaskor, t.ex. bioaskor som kan tänkas användbara i framtiden. En annan person uppskattar produktionen av slagg till mellan 80 000 och 130 000 ton per år i Sverige som används till betong. En annan person uppskattar att cirka 200 000 till 300 000 ton tillsatsmaterial importeras till Sverige, varav cirka 50 000 ton utgörs av slagg som tillsatsmaterial vid betongproduktion. Flygaska med lågt kalciuminnehåll (Klass F) som används till betong importeras.

Tre personer nämner att i nuläget är slagg det mest eftertraktade tillsatsmaterialet, och fyra instämmer om att behovet av nya tillsatsmaterial kommer att öka. Två personer svarade att det krävs att forskning, utveckling samt regelverk måste följa med i utvecklingen. En av personerna anser att regelverken behöver se över kraven på vct och bindemedelshalter. En person kommenterade att kalcinerbara leror är inte standardiserade och används därmed inte i Sverige idag, men kan komma att spela en större roll i framtiden då tillgången är relativt stor. Flygaskan från kolkraftverk verkar vara på tillbakagång men kommer troligtvis att finnas ett tag framöver. Silika och Rise Husk Ash är inte något alternativ då kvantiteterna är för låga och kommer troligtvis så att förbli men kan vara alternativ till vissa konstruktioner där dessa tillsatsmaterials egenskaper kan vara motiverade att nyttja. Utöver flygaska från kolkraftverk finns även askor från bioaskor, men dessa är inte standardiserade och tillåts inte att användas idag.

Sex svarade överensstämmande att under de kommande 25 åren kommer såväl flygaska som slagg troligtvis finnas tillgängligt, men mängderna kan väntas minska framöver. Tre nämner motiveringen att det kommer ske nedläggning eller konvertering av koleldade värmekraftverk, och en person nämner även att Europa kommit över en puckel i stålproduktionen. Denna puckel innebär att på grund av att mycket stål redan finns och kan återanvändas, så minskar nyproduktionen av stål. Denna puckeln väntas även komma för Kina om något år. En person svarade att det även sker processförändringar som innebär att flygaskans och slaggens kemi och innehåll kommer ändras. Därmed kommer användning av framtidens flygaska och slagg kanske begränsas eftersom inblandning inte kommer ge samma betong som så dagens flygaska och slagg blandas in. Personen nämner även att de mängderna som finns av dessa material är idag begränsad och nyttjas i stor grad varför någon stor generell sänkning av klinkermängden inte kan väntas om inte flera alternativa bindemedel hittas och tillåts att användas.

Återigen nämnde två personer att det behövs styrning mot att de konstruktioner som inte har någon större exponering för skademekanismer ska använda betong som motsvarar minimikraven (minimera mängden cement genom att höja vct_{ekv} och öka andelen tillsatsmaterial). De kommenterade även att idag används orimligt mycket OPC till plattor (till hus) för att klara uttorkningskrav som ställs för att få ner byggtider. En person kommenterade att för plattor vore det mer rimligt att använda ett högre vct med låg OPC-halt och genom smart

byggplanering göra det bästa och låta uttorkningen ta lite längre tid. På motsvarande sätt skulle konstruktioner med en större exponering för skademekanismer behöva gå mot bindemedel som motsvarar CEM II, istället för CEM I, och en materialminimering. Vidare kommenterade personen att idag, då det inte finns någon styrning för att bygga mer klimateffektivt, är det billigare för projekt att göra grövre konstruktioner som förenklar arbetet på plats och minimerar projektiden. Att skapa en styrning mot att bygga mer klimateffektivt skulle vara ett politiskt beslut som går att genomföra idag (innan CCS tekniken är klar för stor skala). Men, enligt personen, det tycks inte finnas någon drivkraft till att genomföra en sådan förändring för tillfället.

En person kommenterade att staten skulle behöva gå in i projekt initialt då de har tillgångar och möjligheter att hantera risker som normalt inte andra aktörer har. På så vis skulle det vara möjligt att kunna putta utvecklingen framåt med nya material eller användandet av olika biprodukter. Vidare kommenterade personen att på samma sätt behöver staten ge stöd till grundforskning inom området alternativa bindemedel där kunskapen i sin tur kan nyttjas av industrin inom tillämpad forskning/utveckling. Vidare håller personen med föregående svar om att möjligen skulle en mer stram styrning av vilka bindemedel som får användas i vissa konstruktioner kunna ge en liten men nog så påtaglig effekt. Dock troligen tveksamt att genomföra i dagsläget pga. rådande lagstiftning.

4.2 BEREDNING

Nedan ges en sammanfattning av hur experterna svarade på frågorna som handlade om betongfabriker, beredning av betong med och utan tillsatsmaterial, ballast, tillsatsmedel, och transport.

4.2.1 Fasta eller mobila betongfabriker

Generellt.

I hur stor utsträckning används fasta respektive mobila betongfabriker i Sverige om man ser till stora anläggningsprojekt?

(2 svar)

Hur stora betongmängder behöver köpas för att kunna sätta upp en mobil betongfabrik?

(1 svar)

Produktionsförmåga.

Vid uppvägning av delkomponenter till betongrecept, skiljer sig noggrannheten mellan fasta och mobila betongfabriker? (D.v.s. hur stor spridning i vbt och betongkvalitet bör man räkna med för fasta respektive mobila betongfabriker?)

(3 svar)

Vilken produktionskapacitet (m^3 betong per timme) har en mobil betongfabrik?

(1 svar)

Hur skiljer sig denna kapacitet jämfört med en fast betongfabrik?

(1 svar)

Mobila betongfabriker kan minska transportbehovet och därmed bli lönsamt vid vissa volymer betong och platsen där gjutningen ska ske på. En person gav allmänna kommentarer om att då man pratar om mobila betongfabriker är det

troligtvis vanligt att man endast tänker på något i stil med Carmix. Det är dock en något oklar gräns mellan mobil och fast betongfabrik eftersom det finns stora "supermobila" fabriker som kan beställas, byggas, och etableras på fem till sex månader. Sådana betongfabriker har samma produktionskapacitet och kvalitet som fasta betongfabriker (givet tredje parts certifiering) vilket innebär att det inte är någon skillnad på betongen som produceras (enligt två personer). Tre personer kommenterade att om betong blandas utan kontroller med t.ex. modell Carmix så kan kvaliteten inte garanteras, och är generellt sett lägre (större spridning i kvalitet, dvs vct och homogenitet).

En person svarade att de supermobila kan vara lönsam vid en betongvolym på 5 000 m³. Vid större och längre projekt behöver den normalt vara 15 000 m³/år eller högre för att bli lönsamt.

Enligt SBMs hemsida är kapaciteten på 100 till 170 m³/h för de supermobila fabrikena (SBM 2019). En person svarade att praktiskt brukar en sådan fabrik producera cirka 50-70 m³ betong per timme beroende på kvalitet. För en frystestad självkompakterande betong är kapaciteten på cirka 40-50 m³/h, för en frystestad 50 m³/h. för en vanlig betong med luftporbildare cirka 60 m³/h, och för en normal betong utan luft cirka 70 m³/h. Vid användning av Carmix är produktionskapaciteten varierande. Enligt Carmix hemsida har de fordon med blandarvolym mellan 1 och 5.5 m³ (Carmix 2019).

4.2.2 Bindemedel med/utan tillsatsmaterial

Generellt.

Vid inblandning av tillsatsmaterial, vilka för- och nackdelar finns det vid med blandning?
(2 svar)

Skiljer sig kvaliteten i den slutgiltiga betongen beroende på när tillsatsmaterialet tillsätts?
(4 svar)

Tillsatsmaterialet mals tillsammans med cementet vid bindemedlets tillverkning.
(3 svar)

Tillsatsmaterialet tillsätts i blandaren och homogeniseras innan vatten tillsätts.
(2 svar)

Tillsatsmaterialet tillsätts i betongbilen vid byggarbetsplatsen.
(4 svar)

Två personer kommenterade att i cementfabriken finns flera frihetsgrader att anpassa klinkerns och tillsatsmaterialets egenskaper till varandra. Där finns bland annat möjlighet att mala ihop tillsatsmaterialet med OPCn, eller mala respektive delmaterial separat för att optimeras för varandra. En person kommenterade att det dock kan finnas goda förutsättningar för kontinuerliga kvalitetskontroller både i cementfabriker och i supermobila betongfabriker vid byggsplatsen. Enligt nuvarande regler är effektivitetsfaktorn 1 för alla tillsatsmaterial om de tillsätts till OPCn (för cementfabrikerna), men mindre än 1 om de tillsätts i blandaren (t.ex. vid torr homogenisering i de supermobila betongfabrikerna).

Fyra personer svarade överensstämmande om att då tillsatsmaterialet tillsätts i betongbilen (efter att vattnet tillsats) vid byggarbetsplatsen kan normalt inte den föreskrivna kvaliteten uppnås i praktiken. Detta på grund av att betongen inte blir

homogen och materialegenskaper kan variera och resultera i lokala skador. En föreslog att inblandning av mineraliska tillsatsmaterial direkt i betongblandaren (efter att vattnet har tillsats) borde förbjudas.

Två faktorer att ta hänsyn till i praktiken när det kommer till att producera betong som innehåller tillsatsmaterial är att det kräver en ökad silokapacitet och logistiken för den extra frakten för råmaterialet.

4.2.3 Ballast

Generellt.

Vilka begränsningar finns i dagens fasta betongfabriker vad gäller stenstorlek (stenmax)?
(3 svar)

Vad skulle krävas för att modifiera en betongfabrik till större stenmax (50-100 mm)? Vilka betongkvantiteter måste säljas för att det ska "gå runt"?
(2 svar)

Går det att specialbygga en mobil betongfabrik för att tillmötesgå önskemål på större stenmax (50-100 mm)? Vilka ekonomiska aspekter behöver det tas hänsyn till?
(3 svar)

Kan användning av olika stenmax ha inverkan på kvaliteten av betongen?
(4 svar)

Har alternativ ballast såsom krossad betong eller inert slagg använts i Sverige?
(3 svar)

Tre personer kommenterade att dagens fabriker är byggda för 32 mm sten, men det är framförallt betongpumpningen som innebär begränsning av stenmax. Två svarade att måste tas hänsyn till ökat slitage, drift under håll, och att det kräver en extra ficka om större fraktion också ska användas. En person svarade att idag har supermobila fabriker normalt sett fyra fack med fraktionerna 0-4, 0-8, 8-16, och 16-32. Fyra personer svarade att stenmax har en stor inverkan på betongkvaliteten genom förändrad bindemedelsmängd, och arbetbarhet (konsistens) hos betongen. Två personer kommenterade att det krävs tester för att ett betongrecept ska fungera. En person svarade att praktiskt i dagsläget innebär även flera stenstorlekar en ökad risk för kontaminering som kan resultera i pumpstopp och att överytan blir sämre på grund av separation.

För att gå över till ett större stenmax finns två grundläggande problem. Två personer svarade att det mycket större krafter vid hantering av större stenar, därmed skulle alla maskiner behöva anpassas. "Anpassas" i detta fallet innebär troligtvis att bygga nya som klarar större krafter på t.ex. rotorblad m.m. På grund av att detta inte blir någon standardlösning för "vanlig" betong med mindre stenmax, vilket innebär en större kostnad. En person svarade att det andra grundläggande problemet är att den enda stenen som produceras idag med så stor stenmax är den till tågbeddarna. Denna sten är dock flisig för att ha en bärighet för tågen, men för betong så har flisigheten troligtvis en negativ inverkan med hänsyn till konsistensen och arbetbarheten.

En person svarade att om ett enskilt projekt skulle kräva en volym över 5 000 m³ skulle det troligtvis gå runt med att göra en delvis modifierad mobil betongfabrik som klarar en större stenmax (50 till 100 mm). En annan person nämnde att ett

svenskt projekt har varit framgångsrikt utomlands genom att använda "roller compacted concrete" (RCC) med stenmax 100 mm.

Tre personer svarade att alternativ ballast såsom krossad betong och inert slagg har använts i Sverige, en person kommenterade att det dock har varit till hussidan där livslängdsperspektiven är kortare. Tre personer skrev att det innebär en osäkerhet/risk med beständighet p.g.a. att det är svårt med spårbarhet (kvalitetssäkring) på återvunnet material. En person svarade att den krossade betongen som produceras ryms även inom vägbyggnad vilket innebär att den inte behöver bli ny betong.

4.2.4 Tillsatsmedel

Generellt.

Finns det skillnader i hur stabila luftporsystem som kan erhållas i betong med rent portlandcement jämfört med bindemedel där en del av cementklinkern ersatts med tillsatsmaterial?

(4 svar)

Finns det idag väl fungerande tillsatsmedelskombinationer (t.ex. flyt, luftporbildare och retarderare) som fungerar bra tillsammans för betong med portlandcement?

(5 svar)

Finns det idag väl fungerande tillsatsmedelskombinationer (t.ex. flyt, luftporbildare och retarderare) som fungerar bra tillsammans för betong med olika slags tillsatsmaterial?

(5 svar)

Om det inte finns väl fungerande kombinationer av tillsatsmedel för betong med tillsatsmaterial i dagsläget – kommer det att kunna utvecklas eller behöver det provas fram vid varje tillfälle?

(3 svar)

Fem personer instämmer om att stabila luftporsystem kan erhållas med såväl OPC som med de CEM II bindemedel som används idag. Tre av dessa personer nämner att det kan kräva andra doseringar. Vidare instämmer de fem personerna om att det finns inga problem i dagsläget med att skapa väl fungerande tillsatsmedelskombinationer med (t.ex. flyt, luftporbildare och retarderare) för betong som innehåller vanlig CEM I eller en bindemedelskombinationer som innehåller tillsatsmaterial. Fyra svarade att det behöver bara göras testmixar före gjutningstillfället som säkerställer att betongreceptet har önskade egenskaper och uppfyller ställda kvalitetskrav.

En person svarade att vid gjutningar av grova konstruktioner går det att med hjälp av retarder och gjutteknik undvika tidig sprickbildning även med höga bindemedelshalter. Vid gjutning av Öresundstunneln göts hela segment på en gång vilket delvis möjliggjordes genom att justera mängden retarderare under gjuttiden, och delvis genom konstruktionens form. Till en början används en högre dosering retarderare och sedan minskar den efter hand. Detta bidrar till att betongen håller en jämn temperatur i hela konstruktionen och de inbyggda spänningar motverkas genom segmentets fysiska form. Ytsprickor, som beror på skillnad mellan temperaturen på ytan och inne i sektionen, undviks med hjälp av isolering.

4.2.5 Transport

Generellt.

Vad finns för begränsningar för hur lång transporten kan vara från en fast betongfabrik?
(2 svar)

Hur mycket retarderande tillsatsmedel kan tillsättas utan att påverka slutgiltiga betongkvaliteten hos betong med portlandcement?
(1 svar)

Hur ser motsvarande begränsningar ut för betong med tillsatsmaterial?
(1 svar)

Hur konkurrenskraftiga är mobila betongfabriker då man sparar in på transportkostnader?
(2 svar)

Två personer svarade att vid långa transporter (> 10 mil) blir gjutningarna mer svårstyrda, då bör mobila betongfabriker användas för att minska risker som kan innebära att gjutningen blir dålig. En skrev att mängden retarderande tillsatsmedel som kan tillsättas utan att påverka slutgiltig betongkvalitet beror på hur ytan hålls färsk och hur skarvarna vibreras ihop. Två instämmer om att det är ingen skillnad mellan om bindemedel med eller utan tillsatsmaterial används.

En person svarade att frågan om hur betongproduktionen optimeras är komplex. Ur klimatsynpunkt vore det bästa alternativet troligtvis att bättre med en optimering av flexibla supermobila betongfabriker.

4.3 GJUTNING

Nedan ges en sammanfattning av hur experterna svarade på frågorna som handlade om gjutning av betong med olika bindemedel, ballast och sparsten, reparationer, och arbetskraft.

4.3.1 Bindemedel

Generellt.

Vad finns för praktiska för- och nackdelar då man gjuter med betong med tillsatsmaterial? (risk för blödning vid vibrering, risk för olika typer av separation, risk för gjutsår, etc.)
(5 svar)

Hur stor erfarenhet finns det i Sverige från gjutning av betong med tillsatsmaterial?
(6 svar)

Krävs det särskild utbildning av utförande personal för att gjuta betong med tillsatsmaterial?
(7 svar)

Fem personer svarade att generellt är det ingen skillnad mellan gjutningar med och utan tillsatsmaterial då betongsammansättningen valts noggrant. Vidare är de överens om att blödning och separation är till stor del en proportioneringsfråga som inte är några problem så länge provning av receptet genomförts och säkerställt en jämn godkänd kvalitet. En kommenterar att vid större andel tillsatsmaterial kan betongens tillstyvnadstid förlängas särskilt i kombination med flytmedel och kall väderlek. Under denna tid är betongen känsligare för uttorkning, nedkylning och kan blöda under längre tid varför det blir viktigare med korrekta härdningsåtgärder. Fyra svarade att betong med tillsatsmaterial

bidrar normalt till en lägre värmeutveckling vilket kan vara en fördel vid gjutning av grova konstruktioner.

Tre personer svarade att det finns erfarenhet från gjutning med de CEM II/A bindemedel som finns på den svenska marknaden. Tre andra kommenterade att erfarenheten är begränsad eller obefintlig med bindemedel med hög ersättning (>30 %).

När det kommer till att gjuta med tillsatsmaterial, svarar en person, att det är bra om det finns en tydlig arbetsbeskrivning för varje specifikt tillfälle (t.ex. med särskilda härdningsåtgärder vid kall väderlek). En kommenterade att det räcker med att den som ansvarar för gjutningarna har Klass I kurs. En annan skrev att ett startmöte med personalen. Sex personer svarade att det är viktigt att betongreceptets kvalitet säkerställts genom testmixar innan gjutningen.

4.3.2 Ballast/Sparsten

Generellt.

Hur mycket erfarenheter och kunskap finns om "sparsten" i Sverige? Sparsten är sten med diameter 250-500 mm som läggs in i betongmassan i särskilt grova konstruktioner allt eftersom gjutningen fortskrider.

(4 svar)

Finns det idag möjligheter att lägga in sparsten vid gjutning av grova konstruktioner för att reducera betongens värmeutveckling?

(5 svar)

Om inte, vilka praktiska hinder/risker finns?

(3 svar)

En person svarade att sparsten (stora stenar med ca 250 till 500 mm i diameter) har använts som regel i början av 1900-talet i Sverige och många av anläggningar som står kvar idag är gjutna med sparsten. Nu är det dock väldigt sällan denna metod används och erfarenheten från att använda den är väldigt låg. Fortum har dock gjort försök i bland annat Långströmmen för att återuppta metoden. Där har även ballast med stenmax på upp till 50 mm pumpats framgångsrikt.

Tre personer nämner att det är teoretiskt möjligt att pumpa vanlig betong med stenmax 32 från lastbilar, och mellan pumpningarna från lastbilarna placera in sparsten. Det förutsätter dock att det är grova gjutningar där sparstenen får plats mellan armeringsjärnen. Så länge god arbetsmiljö säkerställs och samtliga lyft av sparsten görs med hjälp av maskiner går det troligtvis att använda denna gamla metoden. En kommenterar att det är tveksamt om det finns maskiner som passar för detta arbetet, och att det blir orimligt dyrt om det behövs special-tillverkas sådana maskiner.

Skanska har arbetat med en gammal metod där man gör så kallad "prepaktbetong" (injekteringsbetong). Detta innebär att ballast läggs ut i en form och packas så att det blir ett fast stenskelett, därefter pumpas fint bruk in för att fylla hålrummen. Detta är dock inte någon metod som sparar på OPC-halten på grund av att pastan som man trycker in måste vara lättflytande (stenmax i pastan ska vara cirka 10 gånger mindre än stenarna). Men det skulle kunna vara en metod för gjutning av skibord där det kräver en hög hållfasthet och slitstark yta.

4.3.3 Reparation

Hur mycket erfarenheter finns från reparationer av CEM I betong med betong som innehåller tillsatsmaterial i Sverige?

(2 svar)

Hur fungerar det att reparera en CEM I betong med slagg- eller flygaskebetong? (innebär skillnaderna i materialegenskaper något problem?)

(2 svar)

Finns det väl fungerande lagningsbruk med tillsatsmaterial för mindre reparationer?

(2 svar)

Reparation är i sig väldigt komplext, men två personer svarade att bindemedlet inte har någon betydelse så länge det valts på ett noggrant sätt så att det har önskade materialegenskaper.

4.3.4 Arbetskraft

Hur ser tillgången på arbetskraft ut i Sverige idag?

(3 svar)

Finns det exempel på projekt som har misslyckats till följd av bristande kompetens hos den utförande personalen?

(3 svar)

Hur ser tillgången på kompetent arbetskraft ut framöver (om tex 10 och 25 år)?

(3 svar)

Tre svarade att idag bedöms arbetskraften för betonggjutning vara otillräcklig. En kommenterade att på grund av att det byggs väldigt lite vattenkraft i Sverige så kommer kompetensen troligtvis minska. En svarade att framåt kommer det troligtvis vara fortsatt brist, det finns utbildning men den är för liten. En kommenterade att praktiskt så är det viktigt att beställare kräver klass I kompetens på arbetsledning samt vid betongtillverkning klass I betong där varje enskild uppställning ska besiktas av tredje-parts certifiering typ VUC. Tre svarade att vid gjutningar med inhyrd betongunderentreprenör, samt mindre betongtillverkare som inte är certifierade, är det särskilt viktigt att uppställning besiktas av tredje-parts certifiering annars är det stor risk för att misslyckas.

5 Pågående forskning och utveckling

Nedan ges en sammanfattning av hur experternas kommentarer angående pågående forskning och utveckling. Det ges även korta sammanfattningar av projekt som handlar om relevanta frågeställningar för vattenkraftsindustrin som finansieras av svenska byggbranschens utvecklingsfond.

5.1 SVAR FRÅN INVTERVJUER

Vad arbetar anläggningsindustrin med för utvecklings- och forskningsprojekt (gällande betong och framtida bindemedel) för tillfället och vilka framtida behov finns?
(4 svar)

Finns det frågeställningar som bedöms vara unika för anläggningsindustrin?
(4 svar)

Har anläggningsindustrin och vattenkraftsindustrin gemensamma frågeställningar för framtida forskning och utveckling?
(5 svar)

Vad arbetar högskolor med för forskningsprojekt (gällande betong och framtida bindemedel) för tillfället och vilka framtida behov finns?
(3 svar)

Vilka frågeställningar anser Du vara kopplade till vattenkraftsindustrin för framtida forskning och utveckling?
(2 svar)

Fyra svarade att högskolor och institut arbetar bland annat med forskningsprojekt som rör dagens bindemedel (flygaska, slagg) och framtida bindemedel som kalcinerade leror och bioaskor. Forskningen spänner från hydratations- och mikrostrukturstudier till beständighetsfrågor. Målet är att studera materialegenskaper och knyta till skademekanismer för att kunna göra redskap som hjälper till med beständighetsfrågor. Alltså, hur väl ett betongrecept med ett visst bindemedel klarar en viss typ av exponeringsmiljö.

En svarade att när det kommer till beständighetsfrågan om armeringskorrosion så gäller för tillfället samma täckskiktstjocklekar oberoende av bindemedel. Då samma tjocklek av täckskikt inte ger samma livslängd innan armeringskorrosion börjar beroende på bindemedel så bör detta ses över, men intresset är lågt eller obefintligt.

Tre svarade att det finns lite eller inget som skiljer mellan forskning för anläggningsindustrin och kraftindustrin. Damm utsätts inte på samma sätt för tösalter, och därmed saltfrostmekanismen, men generellt finns inga frågeställningar som är unika för anläggningsindustrin. Anläggningsindustrin och kraftindustrin har samma behov av kunskap. Två skrev att det är viktigt för båda att ha med frågeställningar som berör beständigheten och beprövade lösningar.

Två kommenterade att huvuddelen av all nödvändig kunskap finns och bör sammanställas än en gång eftersom folk i branschen har en tendens att glömma, eller i värsta fall, vara ointresserade av tillgänglig kunskap. En svarade att Sverige har mycket att hämta från de omfattande erfarenheter från Nederländerna, Belgien, Frankrike, och England som har använt betong som innehåller höga

fraktioner av flygaska och slagg i väldigt stor utsträckning under en väldigt lång tid.

En skrev att för att agera nu och inte vänta på CCS tekniken så arbetar Danmark nu med ett förslag för att främja projekt som ska resultera i minimalt koldioxidutsläpp genom böter för höga koldioxidutsläpp. Detta är alltså ett politiskt beslut om att styra branschen mot att minimera materialanvändningen och därmed minska den antropogena klimatpåverkan.

5.2 SBUF PROJEKT

SBUF finansierar för tillfället fem pågående projekt med stark anknytning till bro och anläggningssidan, samt byggmaterialet betong. Dessa kan även knytas till vattenkraftbyggnader genom gemensamma problemställningar (SBUF 2019).

Sjävläkning i betong med nya miljövänliga betongkvaliteter handlar ett projekt om. Målet är kunskapsuppbyggnad om nya smarta materialval och att befintliga normkrav nyanseras för sjävläkning. Då sjävläkning är centralt för dammar med ensidigt vattentryck har vattenkraftsindustrin med största sannolikhet mycket information att hämta från detta projekt för att höja kunskapsnivån om sjävläkning av miljövänliga bindemedel (SBUF 2019).

Grundläggande kunskap om vatten i betong, från molekylära strukturer till makroegenskaper, handlar ett projekt om. Detta ska bidra med ny kunskap om vattnets tillstånd i betong med olika tillsatsmaterial och därigenom möjliggöra utveckling av verktyg till praktisk tillämpning i byggproduktion. Då dammar har ett ensidigt vattentryck är frågan om vatten i betong en central del för vattenkraftverk. Det är även troligt att det kommer bli vanligare att använda tillsatsmaterial i betongdamm. Därmed är det en stor sannolikhet att viss information från detta doktorandprojektet kommer kunna användas för att höja kompetensnivån hos experter som jobbar med betongdamm (SBUF 2019).

Ett projekt handlar om utveckling av metoder för sprickbegränsning av hårdnande betong, d.v.s. tidig sprickbildning som främst beror på temperaturbetingad rörelse. Målet är att vidareutveckla den svenska sprickmodellen för att öka noggrannhet och flexibilitet. Därigenom kan det bli enklare att motivera användande av bindemedel med tillsatsmaterial som enligt beräkningar visats ge låg risk för tidig sprickbildning. Detta är viktigt för alla typer av grova betongkonstruktioner, varför mycket information från detta projekt kommer öka kompetensen hos betongexperter inom vattenkraften (SBUF 2019).

Härdning av nya bindemedel i kallt väder handlar ett projekt om. För att prova nya bindemedel görs mätningar av hållfasthetstillväxten enligt standard i 20 °C. Resultaten från dessa visar att hållfasthetstillväxterna skiljer sig från OPC. Målet med detta projektet är att bidra med data om hur dessa nya bindemedel är beroende av temperaturen då de får härda i låga temperaturer. Eftersom det är vanligt förekommande med gjutningar i kallt väder för vattenkraftverk så är denna kunskap väldigt viktig att känna till vid användning av bindemedel med tillsatsmaterial (SBUF 2019).

Ett projekt handlar om slitbetong på brobaneplasser där undersökning av nya betongblandningar ska göras, samt kartlägga optimala gjut- och härdningsmetoder. Från detta projekt finns det troligtvis någon information som skulle kunna överföras och kopplas till vilka recept som troligtvis kan vara aktuella för skibord. För båda dessa konstruktioner kan det uppstå stora skjuvkrafter på betongytan. Vattenlasten på skibord skulle kunna jämföras med en lastbil som bromsar på slitbetong. Båda dessa konstruktioner har behov av slitlager som kan behövas bytas ut, men målet är att slitlagret ska ha så lång livstid som möjligt (SBUF 2019).

6 Diskussion

Litteraturstudien och informationen från intervjuerna ger en stark indikation på vilka problem som väntas för framtidens betong till vattenkraftsbyggnader. Nedan diskuteras de kunskapsluckor som identifierats.

Sverige har tidigare frekvent under 1900 talet använt bindemedel med tillsatsmaterial i vattenkraftsbyggnader. Men efter misslyckandet av massivcementet (65 % slagg) och tillkomsten 1983 av det högkvalitativa Anläggningscementet har användningen av tillsatsmaterial i princip upphört (för vattenkraftsbyggnader). Men med de högt ställda klimatmålen krävs en omställning och därmed kommer kravet på att minska klimatpåverkan genom att minimera koldioxidutsläppen genom användning av tillsatsmaterial och/eller minimering av OPC-förbrukningen. Det gäller dock givetvis fortfarande att hänsyn måste tas till beständigheten för att konstruktionerna ska få en lång livslängd. En lång livslängd med så få reparationer som möjligt ger en mer effektiv konstruktion både ur miljömässig och ekonomisk synvinkel.

6.1 KUNSKAPSLUCKOR HOS FÄRSKA BETONGENS EGENSKAPER

För de färska egenskaperna säger en del referenser i litteraturstudien att det finns ökade risker för separation vid kombinationen av tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Men enligt intervjuerna med betongleverantörer är detta inte något problem i praktiken eftersom tillsatsmedlen testas av betongtillverkarna innan leverans. Därmed finns det en viss meningsskiljaktighet mellan litteraturstudien och praktiken. Detta motiverar en studie av tillsatsmedelskombinationer tillsammans med olika tillsatsmaterial där tester genomförs på de kombinationer som anses fungera i praktiken.

6.2 KUNSKAPSLUCKOR HOS HÄRDNADE BETONGENS EGENSKAPER

De gemensamma kunskapsluckorna för den härdnade betongens egenskaper från litteraturstudien och intervjuer med experter är följande:

- Vilka bindemedel kommer att finnas tillgängliga i framtiden som går att använda i betong till vattenkraftsbyggnader?

Detta är osäkert då det inte är säkert vilka tillsatsmaterial som kommer att finnas tillgängliga och i vilka kvantiteter. Med dagens utveckling kommer tillgången på flygaska klass F från kolkraftverk troligtvis minska. Det finns dock askor från t.ex. värmekraftverk som förbränner flis, sopor, m.m. Men för att använda denna aska behöver innehållet och variationerna av innehållet vara kända. Sedan måste betongen testas med olika fraktioner för att säkerställa att beständigheten för givna exponeringsmiljöer för att den ska kunna börja användas.

Tillgången på slagg kommer troligtvis också att minska på grund av att stålproduktionen kommit över puckeln där det finns så mycket stål som kan återvinnas vilket gör att nyproduktionen av stål går ner. Stålproduktionen kommer också ställa om med nya produktionsmetoder, vilket innebär att den framtida

slaggprodukten troligtvis kommer förändras från den som används vid betongtillverkning idag.

Det krävs mer kunskap om alkaliaktiverade bindemedel och kalcinerade leror. Om det visar sig att beständigheten är lägre men tillgången är god kan det finnas möjlighet att använda dessa typer i konstruktioner utsatta för väldigt mild exponeringsmiljö. Då bör det styras mot att CEM III och bindemedel såsom kalcinerade leror ska användas i konstruktioner utsatta för mild exponeringsmiljö. Bindemedel som CEM II med högre beständighet reserveras då åt konstruktioner som är utsatta för tuffare exponeringsmiljö (t.ex. vattenkraftsbyggnader och broar).

- Hur minimeras risken för tidig sprickbildning i grova betongkonstruktioner som innehåller tillsatsmaterial?

Det finnas en brist på kunskap kring risk för tidig sprickbildning i grova betongkonstruktioner med tillsatsmaterial. För att utöka kunskapen kring detta är ett förslag att utgå från metoden som Hösthagen använt på LTU, där fukt- och temperaturbetingad rörelse tillsammans med hållfasthetsutvecklingen och utvecklingen av elasticitetsmodulen loggas. För att minimera risk för tidig sprickbildning måste det säkerställas att betongens draghållfasthet är tillräckligt hög i förhållande till de dragspänningar som bildas från avsvälning och uttorkning. Detta är även beroende av elasticitetsmodulen. Testserien bör alltså utökas till de CEM II bindemedel som finns på den svenska marknaden idag, samt eventuella framtida bindemedelskombinationer med tillsatsmaterial.

- Hur väl klarar framtida bindemedel med tillsatsmaterial exponeringsmiljön som vattenkraftverk ska klara av?

Det finns begränsat med rapporter som redovisar mätningar för hur väl bindemedel med tillsatsmaterial klarar urlakning, erosion, och nötning, samt vilken självläkningsförmåga de har. Det finns inga studier som visar hur beständiga bindemedel med tillsatsmaterial är då dessa mekanismer tillsammans med frost kombineras, vilket är en normal exponeringsmiljö för vattenkraftbyggnader.

- Hur kan materialanvändning optimeras och samtidigt klara beständighetskrav för att möta miljömässiga och ekonomiska krav?

Det tycks inte finnas några studier som gjorts på senare tid med dagens tillsatsmedel för hur bindemedelshalten i betong minimeras på bästa sätt i grova konstruktioner. Det bör undersökas huruvida dagens maskiner skulle kunna möjliggöra en arbetsmiljösäker metod för användande av grövre ballast och sparsten. Då det används på ett korrekt sätt skulle det kunna bidra till en mer miljövänlig betong (lägre bindemedelshalt) och en minskad risk för sprickor till följd av tidig värmeutveckling från hydratationen.

- Hur klarar sig vattenkraftverk som är byggda under 1900-talet med tillsatsmaterial?

Under 1900-talet är det väldigt många vattenkraftverk som är byggda med tillsatsmaterial i Sverige och utomlands. Genom att studera dessa och göra en stor sammanfattning av hur väl de har klarat sig fram tills nu skulle det kunna bidra till

en enorm kompetenshöjning. Det skulle kunna svara på vilka material som är mest effektiva, och vilka arbetsmetoder under produktionen som gett bäst resultat. Genom att studera åtgärder som genomförts på anläggningarna skulle det kunna svara på vilka reparationsmetoder som varit de mest effektiva. Denna kunskap skulle kunna resultera i ett att ge vägledning till bindemedel som innehåller tillsatsmaterial, och arbetsmetoder genom att se vad som gett bäst resultat historiskt sett.

6.3 SAMMANSTÄLLNING FRÅGOR FÖR FORTSATT FORSKNING

- Hur stor är risken för tidiga sprickor vid gjutning av grova konstruktioner, och hur varierar risken beroende på hur stor andel flygaska eller slagg som betongen innehåller?
 - × Hur stor blir värmeutvecklingen i betong olika andelar flygaska eller slagg?
 - × Hur stora blir de fukt- och temperaturbetingade rörelserna i betong med olika andelar flygaska eller slagg?
 - × Hur blir hållfasthetsutvecklingen i betong med olika andelar flygaska eller slagg?
 - × Hur blir utvecklingen av elasticitetsmodulen i betong med olika andelar flygaska eller slagg?
- Hur väl klarar framtida bindemedel med tillsatsmaterial samverkande skademekanismer som vattenkraftverk ska klara av?
 - × Hur resistent är betong med olika andelar flygaska eller slagg mot kombinationen av urlakning, erosion och frost?
 - × Vilka självläkningsegenskaper har betong med olika andelar flygaska eller slagg?
- Optimering av olika betongrecept beroende på lokal exponeringsmiljö som respektive konstruktionsdel utsätts för. Bindemedel och betongrecept som ger hög beständighet används lokalt där konstruktionen kräver det. Bindemedel, och betongrecept, med tillsatsmaterial och minimerad mängd OPC, som ger låg beständighet, används i konstruktionsdelar med mild exponeringsmiljö.
- Hur kan byggnationer styras mot att optimera betongrecept i konstruktionsdelar med hänsyn till exponeringsmiljöer?
 - × Hur kan byggnationer styras mot att använda bindemedel med en minimal andel OPC-halt och en större mängd tillsatsmaterial i delar av konstruktionen som har mild exponeringsmiljö?
 - × Hur kan byggnationer styras mot att använda mer miljövänliga betongrecept med en minimal mängd OPC-halt i konstruktionsdelarna som är utsatta för den tuffaste exponeringsmiljön? (Exempelvis genom användning av CEM II/A som är godkänt och kan användas i de tuffaste exponeringsmiljöerna)
- Optimering av dammkonstruktioner med hänsyn till materialanvändning. Förslagsvis med utgångspunkt från att använda tillsatsmedel och sparsten, samt optimering av kornfraktionsfördelning av ballasten. Med optimerad materialanvändning erhålls den mest effektiva konstruktionen i både miljömässigt och ekonomiskt perspektiv.

- Hur kan materialanvändning optimeras och samtidigt klara beständighetskrav för att möta miljömässiga och ekonomiska krav?
 - × Går det att använda sparsten (t.ex. den sten som produceras för att används till järnvägar) med hjälp moderna maskiner?
- Hur klarar sig vattenkraftverk som är byggda under 1900-talet med betong som innehåller tillsatsmaterial?
 - × Vilka bindemedel, med tillsatsmaterial, som använts i betongdammar har en bevisad god beständighet?

7 Slutsatser

Följande utvecklingsbehov har identifierats för att förbättra vattenkraftens förmåga och hjälpa vattenkraften att möta kommande utmaningar.

- Studier av samverkande mekanismer för att undersöka tidig sprickbildning i betong med tillsatsmaterial. Förslagsvis med metoden som används av Hösthagen (2017). Fukt- och temperaturbetingad rörelse tillsammans med hållfasthetsutvecklingen och utvecklingen av elasticitetsmodulen. Målet vore att studera hur rörelser, hållfasthet och E-modul beror av bindemedelshalten samt ersättningsandelen för olika tillsatsmaterial. Därmed erhålls sprickrisken i förhållande till ersättningsandelen.
- Studier av samverkande skademekanismer som är specifika för vattenkraftbyggnader hos betong med tillsatsmaterial. Förslagsvis med metoden som användes av Rosenqvist m.fl. (2017). Framförallt urlakning tillsammans med nötning och frost. Målet vore att se beroendet på bindemedelshalten samt ersättningsandelen för olika tillsatsmaterial.
- Studera möjligheten att på ett produktionseffektivt sätt kunna optimera olika betongrecept beroende på lokal exponeringsmiljö som respektive konstruktionsdel utsätts för. Bindemedel och betongrecept som ger hög beständighet används lokalt där konstruktionen kräver det. Bindemedel, och betongrecept, med tillsatsmaterial och minimerad mängd OPC, som ger lägre beständighet, används i konstruktionsdelar med mild exponeringsmiljö.
- Optimering av dammkonstruktioner med hänsyn till materialanvändning. Förslagsvis med utgångspunkt från att använda tillsatsmedel och sparsten, samt optimering av kornfraktionsfördelning av ballasten. Med optimerad materialanvändning erhålls den mest effektiva konstruktionen i både miljömässigt och ekonomiskt perspektiv.
- Kunskapsinhämtning genom omfattande undersökning av befintliga vattenkraftverk där betong med tillsatsmaterial använts. Förslagsvis genom att i ett första steg utgå från befintliga FDU-rapporter och andra studier för dammar för att kartlägga vilka bindemedelskombinationer som visat sig vara beständiga i verkligheten. Om möjligt även produktionsmetoder som visat sig resultera i de mest beständiga anläggningarna. Kan i ett uppföljningsprojekt kompletteras med att fördjupade studier av valda anläggningar.

8 Referenser

- Andrew R. M. (2018) *Global CO₂ emissions from cement production 1928-2017*. CICERO Center for international climate research, Oslo, Norway.
- Antoni M. (2013). *Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone*. PhD thesis, Schweiz
- Benaicha M., Belcaid A., Alaoui A. H., Jalbaud O., Burtschell Y. (2019). *Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete*. Structural concrete. 2019;20:1702-1709. <https://doi.org/10.1002/suco.201900150>
- Betonghandbok Material (2017). *Betonghandbok Material delmaterial samt färsk och hårdnande betong*. Tredje reviderade utgåvan, Svensk byggtjänst.
- Carmix (2019). Information från Carmix hemsida: <http://www.carmix.com/en/product-category/products/>, 2019-11-26.
- Chen, C.H. & Yan, W.-C., (2013). *Mitigating of alkali-silica reaction in mortar with limestone addition and carbonation*. Third International conference on sustainable Materials and Technologies, Kyoto, Japan.
- Drouet E. (2010). *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires - prise en compte des transferts hydriques*. PhD thesis, ENS Cachan.
- Dunstan E. R. (1987). *Sulfate resistance of fly ash concretes: The R-value*. Proceedings of the Katharine and Bryant Mather International conference on concrete durability, ACI SP-100, 2027-2040.
- Ekström T. (2001). *Leaching of concrete : Experiments and modelling*. Division of building materials, LTH, Lund University.
- Ekström T. (2003). *Leaching of concrete : the leaching process and its effect*. Division of building materials, LTH, Lund University.
- Ekström T. (2019). Diskussion med Tomas 2019-12-12.
- Emborg M (1985). *Thermal stresses in concrete structures at early ages*. PhD thesis, Luleå university of technology.
- Fagerlund G. (1989). *Vattenbyggnadsbetong*. Cementa, Sverige.
- Fagerlund G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet : en översikt (3e upplagan)*, Cementa, Sverige.
- Fagerlund G. & Hassanzadeh M. (2012) *Självläkning av sprickor i betong*. Bygg & teknik nr.2, 66-71.

- Ferraris C. F., Stutzman P. E., Snyder K. A. (2006). *Sulfate resistance of concrete: A new approach*. R&D serial no. 2486. Portland cement association, Skokie, Illinois, USA, 93 pages.
- Hossack A., Thomas M.D.A., Moffatt E. (2020) *Field Performance of Portland Limestone Cement Concretes Exposed to Cold-Temperature Sulphate Solutions*. In: Menéndez E., Baroghel-Bouny V. (eds) *External Sulphate Attack – Field Aspects and Lab Tests*. RILEM Bookseries, vol 21. Springer, Cham
- Hösthagen A. (2017). *Thermal crack risk estimation and material properties of young concrete*. Licentiate thesis, Luleå University of Technology.
- Johari M. A. M. (2011). *Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete*. Construction and building materials 25, p. 2639-2648.
- Jonasson J.-E. (1994). *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*. PhD thesis, Luleå university of technology, Sweden.
- Kaasgaard M., Pade C., Nielsen E. P. (2012). *Influence of curing temperature on development of compressive strength and resistance to chloride ingress of concrete with different binder systems*. Concrete expert centre, DTU, Denmark.
- Kelham S. (2003). *Advanced concrete technology – Acid, soft water and sulfate attack*.
- Kleivan E. Kummeneje G., Lyngra A. (1994). *Concrete in hydropower structures*. Hydropower development nr.11, Norway.
- Larson M. (2003). *Thermal crack estimation in early age concrete – Models and methods for practical application*. PhD thesis, Luleå university of technology, Sweden.
- Lehne J. & Preston F. (2018). *Making concrete change – Innovation in low-carbon cement and concrete*. Chatham house report, The royal institute of international affairs.
- Li Q. & Zhang Q. (2019). *Experimental study on the compressive strength and shrinkage of concrete containing fly ash and ground granulated blastfurnace slag*. Structural concrete. 2019;20:1551-1560. <https://doi.org/10.1002/suco.201800295>
- Lothenbach B., Scrivener K. L., Hooton R.D. (2011). *Supplementary cementitious materials*. Cement and concrete research 41, p. 1244-1256.
- Malm R. (2019). *Erfarenheter från gjutning av grova betongkonstruktioner*. Rapport 2019:558, Betongtekniskt program vattenkraft, Energiforsk, Sverige.
- Neville A. M. (2011). *Properties of concrete*. 5th edition, United Kingdom.
- Nilsson L.-O. (2003). *Advanced concrete technology - Durability concept; pore structure and transport processes*.
- Nordström E. & Hassanzadeh M. (2018). *Inblandning av flygaska i vattenbyggnadsbetong*. Rapport 2018:479, Betongtekniskt program vattenkraft, Energiforsk, Sverige.

- Nynäs H. (2013). *Damner som kulturminnen*. NVE rapport nr 64.
- RIDAS (2019). *Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*. Energiföretagen, Stockholm, Sverige.
- Rajczakowska M. (2019). *Self-healing concrete*. Luleå university of technology.
- Rosenqvist M., Pham L.-W., Terzic A., Fridh K., Hassanzadeh M. (2017). *Effects of interactions between leaching, frost action and abrasion on the surface deterioration of concrete*. Construction and building materials 149, p. 849-860.
- Rosenqvist M. (2018). *Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*. Rapport 2018:481, Betongtekniskt program vattenkraft, Energiforsk, Sverige.
- Saha A. K. (2018). *Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*. Sustainable environment research 28, p. 25-31.
- SBM (2019). Information från SBMs hemsida: <https://www.sbm-mp.at/en/products/supermobile-concrete-mixing-plants/euromix.html>, 2019-11-26.
- SBUF (2019). Information från svenska byggbranschens utvecklingsfonds hemsida : https://www.sbuf.se/search/?q=&hPP=10&idx=SBUF&p=0&dFR%5BStatus%5D%5B0%5D=P%5C3%A5g%5C3%A5ende&dFR%5BType%5D%5B0%5D=Projekt&fR%5BCategories.Name%5D%5B0%5D=Byggmaterial&is_v=1, 2019-11-22.
- Scrivener K. L. (2014). *Options for the future of cement*. The Indian concrete journal vol. 88, issue 7, p. 11-21.
- Scrivener K. L., John V. M., Gartner E. M. (2016). *Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry*. United nations environment program.
- Sims, I. & Poole, A.B (eds.) (2017): *Alkali-Aggregate reaction in Concrete – A World Review*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp 767. Chapter 1 (Poole A.B.): Introduction, Chemistry and mechanisms.
- Snoeck D., Pel L., De Belie N. (2020) *Kinetics of SAPs During Hardening, Drying and Healing in Cementitious Materials Studied by NMR*. In: Boshoff W., Combrinck R., Mechtcherine V., Wyrzykowski M. (eds) 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete. SAP 2019. RILEM Bookseries, vol 24. Springer, Cham
- SS 134203 (2014). *Cement – Sammansättning och fordringar för ordinära cement med låg alkalihalt (LA)*. Svensk Standard, SIS.
- SS 137002 (2001). *Standardiserad föreskriven betong*. Svensk Standard, SIS.
- SS 137003 (2015). *Betong – Användning av EN 206 i Sverige*. Svensk Standard, SIS.

SS-EN 197-1 (2011). *Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*. Svensk Standard, SIS.

SS-EN 206 (2013). *Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse*. Svensk Standard, SIS.

State water (2009). *Keepit dam brochure*. Hämtad 2019-12-11 från följande adress:
https://web.archive.org/web/20120320053009/http://statewater.com.au/_Documents/Dam%20brochures/Keepit%20Dam%20Brochure.pdf

Strand M. J. (2018). *Experimental study of de-icing salt-frost scaling in concrete with low-calcium fly ash or slag: Influence of drying and carbonation, and air content*. PhD Thesis, Faculty of engineering, LTH at Lund University.

Sundqvist D. & Lif J. (2012). *Utvärdering av SikaAer solid luftporbildare i betong*. TVBM-5086, LTH, Lunds universitet.

TC 37-DRC (1986). *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*. RILEM, Hansen T. C.

TC 225-SAP (2012). *Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction*. State of the art report, RILEM, Eds. Mechtcherine V., Reinhardt H.-W.

TC 238-SCM (2018). *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials*. State of the art report, RILEM, Eds. De Belie N., Soutsos M., Gruyaert E.

Tickalsky P. J. & Carrasquillo R. L. (1992). *Influence of fly ash on the sulfate resistance of concrete*. ACI Material Journal 89(1), 69-75.

Tunstall L. E. (2016). *A study of surfactant interaction in cement-based systems and the role of the surfactant in frost protection*. PhD thesis, Princeton University, USA.

USACE (2019). U.S. Army Corps of Engineers, information taken 2019-12-11 from
<https://www.sas.usace.army.mil/About/Divisions-and-Offices/Operations-Division/Hartwell-Dam-and-Lake/Introduction/>

Wadsö L. (2017). *Building material science*. Byggnadsmaterial, Lunds Universitet, Sverige.

WBCSD (2016). *Getting the numbers right*. World business council for sustainable development, <https://www.wbcdcement.org/GNR-2016/>.

Westman G. (1999). *Concrete creep and thermal stresses*. PhD thesis, Luleå university of technology, Sweden.

Wilks S. (2009). Photo of Clatworthy Reservoir dam construction plaque. Hämtad 2019-12-11 från <https://www.geograph.org.uk/photo/1919845>

Willhelmsson B., Kollberg C., Larsson J., Eriksson J., Eriksson M. (2018). *CemZero – A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity*. Vattenfall, Cements, Sweden.

Zhao H., Ding J., Huang Y., Tang Y., Xu W., Huang D. (2019). *Experimental analysis on the relationship between pore structure and capillary water absorption characteristics of cement-based materials*. Structural concrete. 2019;20:1750-1762.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900184>

Yang H., Liu J., Zhou Q., Ji H. (2019). *The re-swelling behavior of superabsorbent polymers (SAPs) in hardened cement paste with an artificial crack*. Materials and Structures (2019) 52: 103. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1394-1>

Özbay E., Erdemir M., Durmus H. I. (2016). *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - a review*. Construction and building materials 105, p. 423-434.

BETONG FÖR VATTENKRAFTS- BYGGNAD

Det finns många oklarheter kring framtidens betong i vattenkraftsbyggnader eftersom dessa konstruktioner utsätts för en tuff exponering och ska ha en lång livslängd.

För att minska koldioxidutsläppen från cementproduktion kommer användningen av bindemedel som innehåller tillsatsmaterial att öka. Restprodukter som flygaska från kolkraftverk och slagg från stålindustrin används redan i dag i stor utsträckning.

Här presenteras en litteraturstudie av egenskaper som önskas hos vattenbyggnadsbetong och vilka bindemedel med tillsatsmaterial som är relevanta för de kriterier som ställts upp. Rapporten innehåller också en sammanställning av intervjuer med experter på området. Resultaten tyder på att man i konstruktioner som utsätts för en tuff exponering troligtvis kommer att använda betong av traditionell portlandcement, eller portlandcement med upp till 20 procent tillsatsmaterial.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk