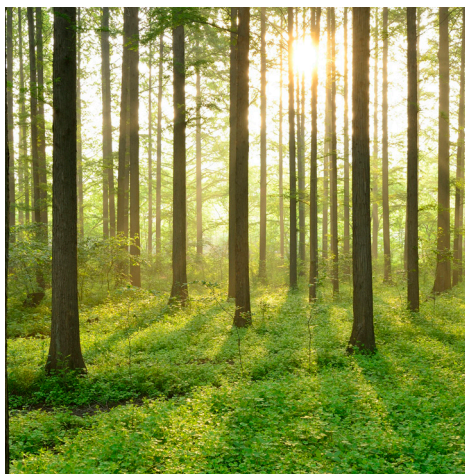


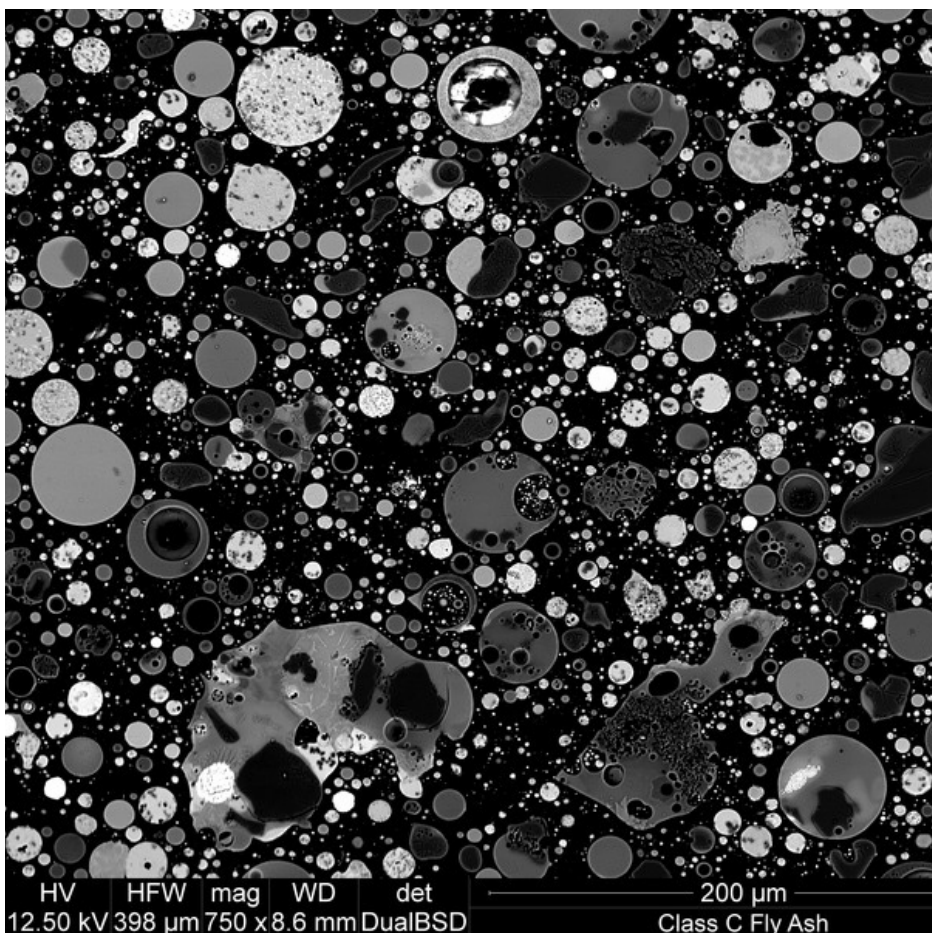
INBLANDNING AV FLYGASKA I VATTENBYGGNADSBETONG

RAPPORT 2018:479



 VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Inblandning av flygaska i vattenbyggnadsbetong

ERIK NORDSTRÖM
MANOUCHEHR HASSANZADEH

Förord

Vid gjutning av grova vattenkraftskonstruktioner är låg värmeutveckling i samband med betongens hårdnande en viktig parameter för att minska risken för tidig sprickbildning. Inblandning av flygaska i betongen skulle kunna bidra till en lägre värmeutveckling, och samtidigt ge en positiv miljöeffekt i form av minskat CO₂-bidrag. Detta används redan idag av den norska vattenkraftindustrin, och diskuteras inom stora svenska betongintressenter.

Detta projekt ingår i Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft, och har utförts av Erik Nordström, seniorkonsult på Sweco samt adjungerad professor vid KTH och Manouchehr Hassanzadeh, seniorkonsult på Sweco samt adjungerad professor vid LTH. Syftet med denna förstudie är att identifiera hur inblandning av flygaska i vattenbyggnadsbetong skulle fungera under svenska förhållanden och vilka frågeställningar som fortsatt behöver utredas.

Intressenterna i Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft är 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.

Sammanfattning

Internationellt är användningen av flygaskor från kolpulverförbränning vanligen förekommande vid betongtillverkning. I Norge har det använts en längre tid inom vattenbyggnad av temperatursprickrisk- och miljöskäl medan det i Finland är ovanligt p.g.a. kvalitetsvariationer på finsk flygaska. Svenska flygaskor, som vanligen kommer från bränslemixer med hög andel bibränslen, är inte lämpade för användning i konstruktionsbetong. I föreliggande rapport redovisas en genomgång av potentiella för- och nackdelar med användning av flygaska i vattenbyggnadsbetong vid svenska förhållanden.

Användningen av tillsatsmaterial har förkommit till och från under de senaste hundra årens svenska betongutveckling. Senast på 80-talet fanns kolflygaska tillgängligt via inhemsk produktion och Cementa saluförde ett flygaskacement som inte kom till någon större användning bl.a. eftersom, det fortfarande tillgängliga, anläggningscementet började produceras ungefär samtidigt. Varierande restkolhalter med negativ inverkan på luftporsystemet som krävs för frostbeständighet är en annan orsak.

Vattenbyggnadskonstruktioner är ofta mycket grova och exponeringsmiljöerna till viss del annorlunda jämfört med traditionella anläggningskonstruktioner av betong. Goda färskas egenskaper för möjliggörande av högvärdiga gjutresultat och egenskaper i hårdnat tillstånd som ger mycket långa livslängder utan framtida beständighetsproblem är typiska generella krav.

Flygaska kan användas på olika sätt vid betongtillverkning och en av huvudprinciperna är att ersätta delar av cementklinkern vid tillverkningen av cement vilket ger ett s.k. blandcement. Den andra principen är att tillsätta flygaska vid själva betongtillverkningen antingen i tillägg till cementet eller som ersättning av delar av cementet.

Det är allmänt känt att flygaska genom sin runda kornform kan ha gynnsamma effekter på arbetbarheten och vid ersättning av cement under vissa förhållande också ge en reduktion av mängden utvecklad värme vilket kan sänka risken för temperaturrelaterad sprickbildning. Under gynnsamma förhållanden kan positiva effekter på beständigheten genom bl.a. ökad täthet erhållas samtidigt som inverkan på de kemiska reaktionerna också ändrar betongens egenskaper vilket ändrar förutsättningarna för god beständighet i relation till vilken mängd flygaska som används. De tidigare kända problemen med risk för sämre frostbeständighet ett annat exempel på inverkan.

Den specifika flygaskans egenskaper tillsammans med principen för cementersättning, klimatförhållanden m.m. kan påverka betongens slutgiltiga egenskaper och beständighet. Det gör också att det är svårt att uttala sig entydigt om vilka för- och nackdelar som användning av flygaska i vattenbyggnadsbetong kan ge. Därför föreslås vidare klarlägganden och utredningar före en mer omfattande användning av flygaska som cementersättning kan rekommenderas.

Summary

The use of flyash from combustion of pulverized coal is common internationally. In Norway it has been common practice for long within hydropower structures due to thermal cracking and environmental reasons whereas it in Finland is quite uncommon due to variability in quality of Finnish flyash. Swedish flyashes, commonly from combustion of fuel mixes with a high amount of bio-fuels, are not suitable for use in structural concrete. In the present report a summary of the potential pros and cons with use of flyash in concrete for hydropower structures under Swedish conditions are presented.

The use of additions has been common off and on during the latest century of Swedish concrete development. In the 1980s Swedish flyash from combustion of pulverized coal was available and the cement producer Cementa marketed a flyash cement that was not widely used since the Swedish, still today available, "anläggningscement" also was released approximately at the same time. The flyash cement was suffering from variations in the loss of ignition that had a negative impact on the air void system essential for good freeze-thaw durability.

Hydropower structures commonly have very large dimensions and the exposure environments are partly different from traditional civil structure concrete. High demands on fresh properties to ensure high quality concreting and final properties that give very long service life without durability problems are typical.

Flyash can be used in different ways in concrete production and the main principles are either via replacement of the cement clinker during the production of cement or in the process of concrete mixing as addition or replacement of parts of the cement.

It is well known that flyash can have a positive impact on the workability as a result of the spherical shape of the particles and if used as cement replacement under certain circumstances also give a reduction of the heat development which will lower the risk for thermally related cracking. Under advantageous conditions positive effects on durability can be achieved from lower permeability at the same time as the chemical reactions change the prerequisites for high durability in relation to the amount of flyash used. The previously known problems with an increased risk for lower freeze-thaw durability is another example of its impact.

The properties of the specific flyash used together with the used principle for cement replacement, climatic conditions etc. etc. can affect the final properties and durability of the concrete. This also makes it difficult to unambiguously establish the pros and cons with use of flyash in hydropower concrete structures. This is also why further work with clarifying and investigating the impact on relevant properties is suggested before a more extensive use of flyash can be generally recommended.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte	8
2	Krav specifika för vattenbyggnadsbetong	9
2.1	Konstruktioner och exponeringsmiljöer	9
2.2	Färsk betong	9
2.3	Hårdnad betong	10
3	Tillsatsmaterial	11
3.1	Historik	11
3.2	Typer av tillsatsmaterial	11
3.3	Flygaska	12
3.3.1	Ursprung och typer av flygaskor	12
3.3.2	Användningssätt	13
3.3.3	Flygaskans karaktäristika	13
3.4	Normerad användning av tillsatsmaterial	13
3.4.1	Standarder för blandcement	14
3.4.2	Riktlinjer	14
4	Påverkan på betongens egenskaper	16
4.1	Hydratation och strukturutveckling	16
4.1.1	Cementkemins nomenklatur och förkortningar	16
4.1.2	Kemisk sammansättning av portlandcement	16
4.1.3	Portlandcementreaktioner	17
4.1.4	Reaktioner av portlandcement innehållande puzzolana tillsatsmaterial	20
4.1.5	Reaktionskinetik	25
4.2	Betongs egenskapsutveckling	28
4.3	Färska egenskaper	29
4.3.1	Gjutbarhet	29
4.3.2	Tillstyvnadstiden	30
4.3.3	Hårdning	30
4.4	Unga betongens egenskaper	30
4.4.1	Hydratationsgrad	30
4.4.2	Cementets temperaturkänslighet	33
4.4.3	Mognadsålder och ekvivalent härdningstid	34
4.4.4	Värmeutveckling	35
4.4.5	Hållfasthetsutveckling	38

4.5	Hårdnade egenskaper	39
4.5.1	Mekaniska egenskaper	39
4.5.2	Temperaturrelaterad sprickrisk vid avsvaning	41
4.5.3	Beständighetsaspekter	42
5	Erfarenheter från användning	43
5.1	Sverige	43
5.2	Norge	44
5.3	Finland	46
5.4	Övrigt internationellt	47
6	Utrednings och utvecklingsbehov	49
7	Referenser	50

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Branschens allmänna inställning till användning av restmaterial bör vägas in vid bedömning av användningspotentialen för askor i betongrelaterade tillämpningar. Bland en del fabriksbetongtillverkare finns en skepsis mot användning av flygaskor och restmaterial. En trendväxling kan dock skönjas där intresset för alternativ ökar och ett ökat miljömedvetande också leder till en "askvänligare" inställning. Den svenska betongindustrin har en uppbyggd infrastruktur som ger begränsningar av t.ex. silokapacitet vid betongfabrikerna vilket kan försvåra introduktionen av ytterligare ett bindemedel/tillsatsmaterial. Inte i något fall får säkerhet och beständighet äventyras, men där det är möjligt kan askor användas och också ge en bättre totalekonomi genom minskad cementförbrukning. Att ha i åtanke är att cementet står för en betydande del av den miljöbelastning som betong ger, främst i form av stora CO₂-utsläpp vid cementklinkertillverkning. En potentiell fördel för kraftindustrin i samband med grövre gjutningar är möjligheten att sänka kostnaderna för sprickreducerande åtgärder genom kylning vid användning av flygaska för att reducera cementmängden.

De svenska bränslemixer och panntyper som finns tillgängliga för användning i betongsammanhang skiljer sig en del mot de flygaskor som vanligen används i betong. Främst har flygaskor från kolpulverförbränning kommit till användning och är också det som brukar avses om inget annat anges i t.ex. standards. Svenska flygaskor, som vanligen kommer från bränslemixer med hög andel biobränslen, är vanligen mycket kalkrikare, främst i de anläggningar där svavelrening genom kalktillsats används (torvbränslen t.ex.). Hur reaktiva dessa askor är styrs främst av hur stor andel fri kalk som finns tillgänglig. I anläggningar med rent trä i bränslet sker vanligen ingen kalktillsats. Alkalihalter och kloridhalter är vanligen högre än de "traditionella" asktyperna med ingen eller lite inblandning av biobränslen i bränslemixen. Bl.a. därför har det i tidigare studier av t.ex. Nordström & al. (2003) visats att användningen av de svenska energiaskorna i konstruktionsbetong inte är möjligt i de flesta fallen. Det finns inte heller några svenska askor som kan godkännas enligt EU-standarden SS-EN 450-1:2012 (2012). Effekten av detta blir att rena kolpulverflygaskor från förbränning av stenkol måste importeras från utlandet alternativt introduceras genom användning av färdiga blandcement som innehåller flygaska.

I föreliggande rapport redovisas en genomgång av potentiella för- och nackdelar med användning av flygaska i betong. Särskilt fokuseras på användningen i vattenbyggnadsbetong.

1.2 SYFTE

Undersökningen syftar till att klarställa vilka hot, möjligheter, styrkor och svagheter som användningen av flygaska i vattenbyggnadsbetong ger. Syftet är också att identifiera ev. ytterligare behov av forskning som behöver genomföras före en användning i större skala kan introduceras på den svenska marknaden.

2 Krav specifika för vattenbyggnadsbetong

Generellt avviker inte kraven för vattenbyggnadsbetong så mycket jämfört med traditionell anläggningsbetong för t.ex. brokonstruktioner. Ett par aspekter skiljer dock med avseende på konstruktionsutformning och exponeringsmiljö för vissa delar. I föreliggande avsnitt så redovisas några av de saker som i någon mån är specifika för vattenbyggnadsbetong.

2.1 KONSTRUKTIONER OCH EXPONERINGSMILJÖER

Vanligtvis finns de stora volymerna betong i själva dammkroppen och dess utskovspartier samt som del av de fundament som ska fixera vattenkraftsaggregatens olika delar eller utgöra del av inre vattenvägarna till eller från de genererande delarna. Utöver de miljökrav som Europainormerna ställer krav på i form av t.ex. frostbeständighet och motstånd mot korrosionsangrepp finns inom vattenbyggnad också kraven på god vattentäthet, urlakningsmotstånd och styrka i betongytor mot nötning.

Exponeringsmiljöerna kan variera från t.ex. dämmande konstruktion med höga vattentryck och risk för genomfrysning av en frontplatta till bottnen i en energiomvandlarbassäng med höga vattenhastigheter och erosionsrisk. I andra änden kan t.ex. mycket grova konstruktioner i generatorkammaren med torra utrymmen och hög temperatur finnas på ena sidan och kallt vatten i en betongspiral på andra sidan vilket kan ge stora gradienter och spänningar i konstruktionerna.

De mer vattenkraftsspecifika förutsättningarna för betongkonstruktionerna ger speciella krav på såväl den färska som den hårdnade betongen. I avsnitt 4.2 och 4.3 redovisas några av de parametrar som är viktiga.

2.2 FÄRSK BETONG

Många av konstruktionerna inom vattenbyggnad har stora dimensioner, ofta gjutna mot berg, och därigenom en förhöjd risk för temperaturrelaterade problem. Problemen kan uppstå i form av försenad ettringitbildning (med försämrad hållfasthet och sprickbildning) om den maximala temperaturen överstiger 65-70°C eller sprickbildning p.g.a. internt tvång eller av tvånget mot underlag/angränsande konstruktioner. Denna risk kan minskas bl.a. genom att hålla en låg gjuttemperatur på den färska betongen och begränsa mängden bindemedel.

Inom vattenbyggnad finns en generell strävan mot att använda så grov ballast som möjligt för att minska andelen cementpasta i betongen. Mindre cementpasta per volymenhet ger lägre värmeutveckling och en minskad risk för temperaturrelaterad sprickbildning. Grövre ballast ställer också högre krav på en cementpasta som har goda reologiska egenskaper för att minska risken för sten- och bruksseparation som kan ge upphov till gjutskador och försämrad livslängd på konstruktionen.

Eftersom gjutningarna ofta utgörs av stora volymer med begränsad access p.g.a. armering och ev. kylrör/kylslangar så måste betongens reologiska egenskaper även skapa goda förutsättningar för att vibrera betongen så att den fyller ut formar, omsluter armering och ger minimalt med eftersättningar som annars kan ge sprickor.

2.3 HÅRDNAD BETONG

Den hårdnade betongen ska vanligtvis ha mycket god vattentäthet vilket uppnås med ett tillräckligt lågt vattenbindemedelstal, god komprimering utan eftersättningar, sprickfrihet och hög noggrannhet vid anslutning av nya gjutetapper mot befintliga konstruktioner/gjutetapper samt kring ingjutningsgods och dilatationsfogar. Om nyss nämnda kriterier är uppfyllda finns också goda förutsättningar för att betongen ska vara vattentät och beständig på lång sikt mot t.ex. urlakning av betongens kalciumhydroxid. Urlakning uppstår vanligtvis i sprickor eller i sämre partier (t.ex. vid gjutskador) där vatten kan leta sig igenom konstruktionen och transportera bort den i porlösningen fria kalciumhydroxiden. Vid små flöden av vatten kan kalciumhydroxiden fällas ut i sprickmyningen och skapa s.k. självläkning. Vid större flöden erhålls dock en urlakning vilken ytterligare försämrar tätheten och sänker betongens hållfasthet.

Vanligtvis erfordras i dämmande konstruktioner inte särskilt höga hållfasthetsnivåer, men materialets fulla potential förväntas kunna utnyttjas utan sprickbildning och andra gjutskador. I vattenvägar ställs också höga krav på nötningsbeständighet vilket uppnås med fullgod kvalitet på gjutningar, lågt vattenbindemedelstal och hög stenhalt i betongen.

Utomhuskonstruktionerna utsätts för frostbelastning och i kombination med hög fukt-/vattenbelastning så finns en stor risk för frostsador på vattenbyggnadsbetongen om betongens vattenmättnadsgrad överskrider samtidigt som den utsätts för minusgrader. Då erhålls en skada direkt. För att undvika detta måste betongen ha en stabilt finfördelat luftporsystem som skapas genom tillsats av luftporbildande medel. Luftporsystemet skapar nödvändigt expansionsutrymme i betongen för att klara nedfrysningen.

Betong i dammar och vattenkraftverk behöver vara kemiskt beständiga inte bara ur urlakningssynpunkt. Det får inte heller finnas någon risk för reaktioner mellan cementpastan och ballasten i betongen. T.ex. måste risken för alkalisilikareaktioner beaktas mellan den alkaliska cementpastan och ballast innehållande bergarter med hårt omvandlad / amorf kvarts. Reaktionen sker under upptagande av vatten vilket ger expansion och kan leda till allvarlig sprickbildning och nedsättning av framförallt betongens draghållfasthet. Undvikande av reaktiv ballast är den primära åtgärden, men även användningen av en cementpasta med så lågt alkaliinnehåll som möjligt är också en åtgärd.

3 Tillsatsmaterial

3.1 HISTORIK

Dagens användning av bindemedelssystem baserade på kalcium-silikat eller aluminium-hydrat i byggindustrin har sina rötter i den grekiska antiken. Då utvecklades kompetenta icke-organiska bindemedel bestående av kalk och finmalda reaktiva silikatmaterial (älv. aluminatinnehåll). Lämningar på den grekiska ön Kreta från den Minoiska eran (2000-1500 f.Kr) ger bevis för att man använt en kombination av släckt kalk och tillsats av finmald lerskärv. Syftet var att skapa starkare och mer beständiga kalkbruk för vattentätthet i bad, cisterner och akvedukter enl. Spence & Cook (1983).

Under antiken och romarrikets storhetstid utvecklades användningen av puzzolaner vidare fram till 1800-talets mitt då det brittiska portlandcementet succesivt tog över. I mitten av 1900-talet började åter användningen av puzzolaner öka främst som ersättning av portlandcement. Eftersom cementproduktion är energikrävande var det i första hand av kostnadsskäl som man ersatte delar av cementet med det mycket billigare naturmaterialen eller biprodukterna. T.ex. anger Lindvall (2011) att US Bureau of Reclamation vid uppförandet av Hungry Horse dammen i slutet på 1940-talet använde flygaska som ett bindemedel. Enligt Stene (1995) ersattes ca. 35% av portlandcementet med flygaska i projektet.

I Sverige har det under 1900-talet i olika perioder funnits olika cement med inblandning av tillsatsmaterial. T.ex. fanns på 1930-talet pansarcementet som bestod av en mix av Limhamn standardcement och 20-25% kaolinlera. Under 30- och 40-talet förekom inblandning av kiselgur som fillermaterial. Filler är ett finkornigt material (<0,125 mm) som används för att förbättra arbetbarhet och homogenitet på den hårdnade betongen. Efter andra världskriget tillverkades E-cement som hade inblandning av olika tillsatser (kalksten, sand, masugnsslagg eller tegel). Senare fanns det s.k. vulkacementet som hade 30-40% masugnsslagg och hos Vattenfall användes trass på 50- och 60-talet som filler och tillsatsmaterial med puzzolana effekter. När det vanligaste dammbyggnads cementet LH slutade tillverkas i slutet på 70-talet kom massivcementet (65% slag) och standardcement M som hade inblandning av flygaska (ca. 20%) som båda fanns i början på 80-talet. Idag är kostnadsskälet till användning av puzzolaner och andra tillsatsmaterial fortfarande en aspekt, men än mer accentuerat är incitamentet att minska utsläppen av växthusgaser som är starkt kopplade till cementproduktionen.

3.2 TYPER AV TILLSATSMATERIAL

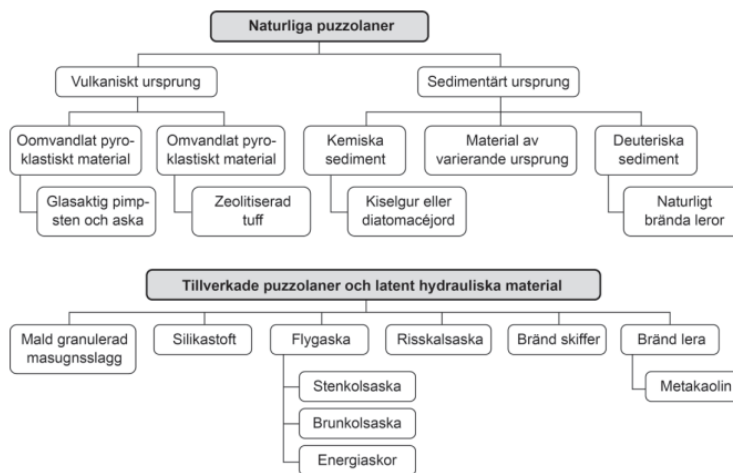
Vanligtvis klassificeras bindemedel till betong in i kategorierna:

- Hydrauliska material (t.ex. portlandcement)
- Latent hydrauliska material (t.ex. masugnsslagg)
- Puzzolana material (t.ex. silikastoft, flygaska och vulkanisk aska)

Där de två senare kategoriseras som tillsatsmaterial. Definitionen av ett tillsatsmaterial ges i SS-EN 206 som ett finfördelat mineraliskt material som

används i betong. Syftet kan vara att förbättra vissa egenskaper eller att erhålla speciella egenskaper. I SS-EN 206 behandlas två typer av oorganiska tillsatsmaterial:

- Typ I - Nära inerta (t.ex. kalkstensfiller och pigment)
- Typ II - Reaktiva (puzzolana eller latent hydrauliska)



Figur 1: Klassificering av naturliga och artificiella puzzolaner och latent hydrauliska material. Löfgren, I. (2017).

3.3 FLYGASKA

3.3.1 Ursprung och typer av flygaskor

I många länder är det praxis att använda framförallt flygaskor från kolpulverförbränning vid betongtillverkning. Flera europeiska länder har detta som normalfallet och även i t.ex. USA och Australien anses detta vara helt accepterat. Att ha i åtanke är dock att man inom betongområdet vanligen talar om flygaskor från kolpulverförbränning av stenkol när man diskuterar flygaska och t.ex. inte brunkol. Begreppet sameldning (med biobränslen) i t.ex. flera andra europeiska länder (Tyskland, Danmark, Österrike) innebär en bränsemix om 90-95% kol och 5-10% biobränsle. I Sverige är förhållandena snarast det omvända.

Olika bränsemixer, olika förbränningstekniker, olika tillsatser och olika utrustningar för askuttag ger energiaskorna olika karaktäristika. Svenska flygaskor är t.ex. vanligen mycket kalkrikare, främst i de anläggningar där svavelrening genom kalktillsats används (torvbränslen t.ex.). Hur reaktiva dessa askor är styrs främst av hur stor del fri kalk som finns tillgänglig. I anläggningar med rent trä sker vanligen ingen kalktillsats. Alkalihalter och kloridhalter kan också vara högre än de "traditionella" asktyperna. De vanligast förekommande flygaskorna från svenska pannor går inte att godkänna enligt det nuvarande regelverket SS-EN 450-1 (2012) p.g.a. den höga inblandningen av biobränslen.

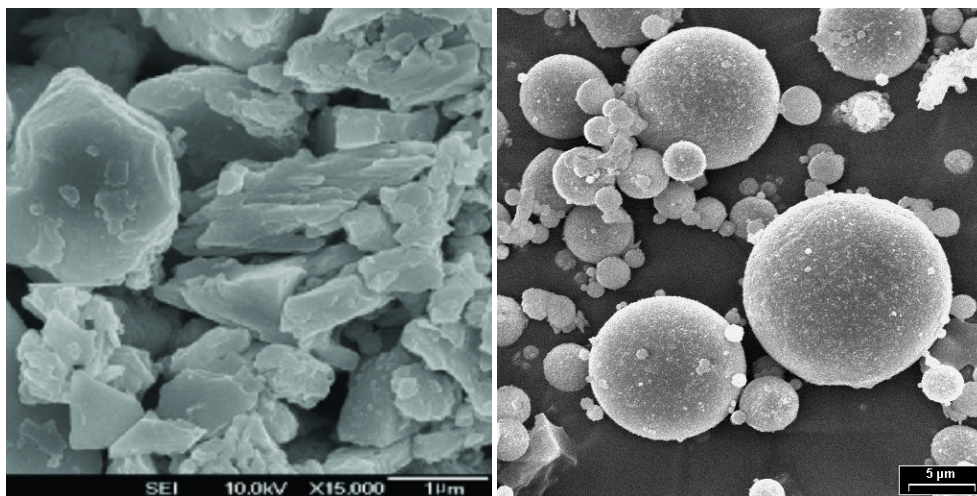
3.3.2 Användningsätt

Tillsatsmaterial kan i huvudsak användas på två olika sätt i betongsammanhang:

- *Ersättning* av del av cementklinker vid tillverkning av cement och på så sätt erhålls ett s.k. blandcement.
- *Tillsats* vid tillverkning av betong utöver det använda cementet eller som delvis ersättning av cementmängden.

3.3.3 Flygaskans karaktäristika

När det gäller askors effekt i betong vid utbyte av cement mot aska beskrivs dess effekt kortfattat i t.ex. Betonghandboken – Material (1994). Askan från pulvereldade kolkraftverk avskiljs i filter. Flygaskan innehåller aluminium- och kisel föreningar, som har puzzolana egenskaper, vilket innebär att de reagerar med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som bildas vid cementets reaktion med vatten och ger en betydande hållfasthet. Flygaskans egenskaper varierar med kolsorten. Vissa krav på sammansättning och reaktivitet måste uppfyllas för att askan skall få användas som cementsättning. Flygaska kan vara kiselrik eller kalkrik. Den förstnämnda har puzzolana egenskaper och den senare kan dessutom ha hydrauliska egenskaper. Se fördjupad beskrivning i avsnitt 4.1. I Figur 2 visas foton från svepelektronmikroskop över kornformen hos cement och stenkolsflygaska.



Figur 2: VÄNSTER – Cementpartiklar (Jo, 2014). HÖGER – Partiklar från stenkolsflygaska (Gårdman, 2003).

3.4 NORMERAD ANVÄNDNING AV TILLSATSMATERIAL

Flygaska som ska användas vid betong- eller cementtillverkning måste uppfylla kraven i SS-EN 450-1 (2012) och vid proportionering av betong med flygaska som del av bindemedlet ska k-värdesprincipen användas för beräkning av ett ekvivalent vattenbindemedelstal ($v_{ct_{ekv}}$). k-värdet kallas också för effektivitetsfaktor eller k-faktor. I den nationella tillämpningen (SS 137003:2015, 2015) av SS-EN 206-1:2016 (2016) som utgör materialstandarden så anges en k-faktor på 0,5 för flygaska om den tillsatta mängden flygaska inte är högre än 20% av bindemedelsmängden. Beräkningen av det ekvivalenta vattenbindemedelstalet görs enl. ekvation (1)

$$vct_{ekv} = \frac{W}{C + k \times D}$$

W = vikten vatten (kg)

C = cementmängden (kg)

k = effektivitetsfaktorn (-)

D = vikten tillsatsmaterial (kg)

Ovan nämnd effektivitetsfaktor relaterar till beständighetskrav enligt refererade normer och ska inte sammanblandas med potentiell effektivitetsfaktor (k_p) som avser bedömning av inverkan på tryckhållfastheten.

Som ett exempel på inverkan av effektivitetsfaktorsbegreppet kan jämförelsen mellan en betong med traditionellt anläggningscement (CEM I) med 340 kg cement och ett $vct=0,5$ jämföras med en betong med samma mängd anläggningscement FA (CEM II/A-V) som kan innehålla upp till 20% flygaska vilket då enligt ovan då erhåller ett ekvivalent vattenbindemedelstal, $vct_{ekv}=0,56$. Användningen av flygaskacementet ger då t.ex. att gränsvärdet för exponeringsklass XF3 (hög vattenmättnad, utan avisningsmedel) enl. SS 137003:2015 (2015) överskrids och cementmängden måste höjas alt. vattenmängden sänkas.

3.4.1 Standarder för blandcement

Ersättning av cementklinker med flygaska sker vanligtvis på två olika sätt. I de ena förfarandet blandas (späds) ett färdigt cement med flygaska för att på så sätt erhålla ett blandcement. Vid det andra förfarandet så mals cementklinkern tillsammans med flygaskan där då specifika ytan på flygaskadelen i blandcementet ökar vilket också ökar reaktiviteten. Det här är ofta otydligt i rapporterade undersökningar där jämförelser gjorts vilket gör det svårt att tolka vilken effekt själva flygaskan gett och vilken effekt som erhållits från själva tillverkningsprocessen för cement.

Cementstandarden SS-EN 197-1 (2011) definierar och specificerar 27 stycken olika ordinära cement och deras beståndsdelar. Definitionen av varje cement inkluderar de proportioner av de olika beståndsdelar som konstituerar de olika cementen, och cementen inordnas i sex hållfasthetsklasser. Definitionen inkluderar också kraven på beståndsdelarna liksom de mekaniska, fysikaliska och kemiska kraven.

I den svenska standarden SS 137003:2015 beskrivs bl.a. vilka cement som anses beprövade och accepterade i olika typer av exponeringsklasser. Då har man angett 11 olika cementtyper som kan accepteras. När det gäller flygaska är blandcement med en högsta halt 20% flygaska accepterat i alla exponeringsklasser. Blandcement med upp till 35% flygaska i alla exponeringsklasser utom XF4 (hög vattenmättnad, avisningsmedel eller havsvatten).

3.4.2 Riktlinjer

I Byggtjänsts Anläggnings-AMA (2017), som är en samling av projekterings- och utförandestandarder, finns några kompletterande krav för betong med flygaska i exponeringsklasserna XF2 (måttlig vattenmättnad, med avisningsmedel) och XF3

(hög vattenmättnad, utan avisningsmedel) där det krävs att förundersökning med frostprovning enl. SS 137244 metod A eller metod B (saltlösning/vatten) ska göras för påvisande av att kravnivån god frostbeständighet uppnås. Vidare anges att det om flygaska utgör högst 20% av den totala bindemedelmängden ska lufthalten vid den fortlöpande provningen av betongen vara minst lika hög som i den betong som godkänts i förprovningen. Dock ej under kravnivån i tabell 9 i SS 137003.

Tabell 1: Lägsta tillåten lufthalt för betong i exponeringsklasser XF2 och XF3 (SS 137003, 2015)

D_{max} mm	Lufthalt, lägsta värde %
> 16	4,0
> 8; ≤ 16	4,5
≤ 8	5,0

När det gäller riktlinjer och vägledningar inom dammbyggnad rekommenderas det i den svenska RIDAS (2011) att ställa krav på användning av rena portlandcement (CEM I).

På det internationella planet gällande dammar så är användningen av puzzolaner och särskilt flygaska mycket vanligt förekommande. Särskilt i RCC-dammar (Roller Compacted Concrete) men även i konventionellt vibrerad betong. I ICOLD-bulletin B165 (2014) anges lämpliga krav på egenskaper hos en flygaska, men också en illustration över vilka skillnader som råder i olika delar av världen. Kanske främst med avseende på acceptabelt halt oförbränt material (restkol) som har ett acceptabelt spann på 5-25 %. Där det senare värdet får betraktas som mycket högt i jämförelse med de krav som ställs inom EU enligt SS-EN 450-1 (2012) där gränsvärdet för konstruktioner som liknar svenska dammar motsvarar 5% (flygaska i kategori A).

I ICOLD bulletin B165 (2014) poängteras vikten av att förprovningar måste göras för nya mixer vid användning av puzzolaner för att klarställa eventuell påverkan på önskade egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd.

4 Påverkan på betongens egenskaper

För att förstå inverkan av flygaska på cementets hydratation och strukturutveckling samt på cementets och betongens egenskaper vid olika stadier från blandning till hårdnande och hårdnat tillstånd bör de förändringar som flygaskan orsakar hos cementets hydratationsprodukter beskrivas. De förändringar som först och främst är intressanta inom ramen av denna rapport är sådana som har direkt inverkan på betongens gjutegenskaper, bindetid, hållfasthetsutveckling och sluthållfasthet, betongens alkalitet, frostbeständighet, alkalisilikareaktioner, urlakning, diffusionsegenskaper och täthet. På grund av att portlandcement (PC) har varit det dominerade bindemedlet inom vattenkraftområdet baseras framställningen i detta kapitel, så långt som möjligt, på jämförelser mellan cementpasta/betong med enbart PC och cementpasta/betong med PC inklusive flygaska. I vissa delar utvidgas innehållet även med diskussioner kring inverkan av silikastoft.

4.1 HYDRATATION OCH STRUKTURUTVECKLING

4.1.1 Cementkemins nomenklatur och förkortningar

Kemiska formler inom cementkemi uttrycks ofta som summan av oxider (Taylor, 1990). Till exempel trikalciumsilikat (Ca_3SiO_2) skrivs även som $3CaO \cdot SiO_2$. Detta är bara ett skrivsätt och antyder inte att oxiderna förekommer som separata beståndsdelar. Kalciumoxiden (CaO) och kiseldioxiden (SiO_2) presenteras genom förkortningarna C respektive S, därför kan trikalciumsilikat presenteras som C_3S . Några inom cementkemin vanligen förekommande förkortningar ges nedan (Taylor, 1990):

Kalciumoxid $C = CaO$	Kiseldioxid $S = SiO_2$	Aluminiumoxid $A = Al_2O_3$	Järnoxid $F = Fe_2O_3$
Magnesiumoxid $M = MgO$	Kaliumoxid $K = K_2O$	Svaveltrioxid $\bar{S} = SO_3$	Natriumoxid $N = Na_2O$
Titanoxid $T = TiO_2$	Fosforpentoxid $P = P_2O_5$	Vatten/Hydrat $H = H_2O$	Koldioxid $\bar{C} = CO_2$

De viktigaste klinkermineralerna är:

Trikalciumsilikat:	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	Alit
Dikalciumsilikat:	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	Belit
Trikalciumaluminat:	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	Aluminat
Tetrakalciumaluminatferrit:	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	Ferrit

4.1.2 Kemisk sammansättning av portlandcement

Tabell 2 visar kemisk sammansättning och beräknade klinkermineral för olika cementtyper (Johansson, 2017). Summan av cementens beståndsdelar i Tabell 2 är inte 100 %, vilket beror på att cement kan innehålla andra beståndsdelar än de som framgår av tabellen, bl.a. några av de oxider som anges ovan är inte inräknade.

Tabell 2: Kemisk sammansättning och beräknade klinkermineral för olika cementtyper (Johansson, 2017)

Cement Typ	Oxider %					Klinkermineral %			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
LH	63	25	2,5	3,7	2,5	33	47	0	11
Anl	64	22	3,5	4,7	2,0	53	23	1,4	14
Std P	63	20	4,4	2,2	3,3	59	13	8	7

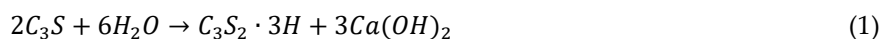
LH: Långsamt hårdnande cement, Anl: Anläggningscement, Std P: Standard PC.

4.1.3 Portlandcementreaktioner

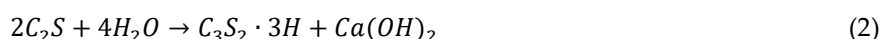
När cement blandas med vatten reagerar mineralerna med vatten och bildar nya produkter. Gips tillsätts portlandcementet för att reglera C₃A:s reaktioner, eftersom C₃A annars reagerar omedelbart och bildar kalciumaluminathydrater (CAH). Om inte dessa reaktioner stoppas binder cementet direkt eller blir grynigt (Johansson, 2017). Tillsättning av gips medför att cementreaktionen fördröjs. De viktiga cementreaktionerna kommer igång när lättlösliga föreningar, i huvudsak alkalisulfater, löser sig och vattnet blir mättat av K⁺, Na⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ och OH⁻ joner, vilket medför att kristaller av Ca(OH)₂ och ettringit faller ut (Johansson, 2017). Tre viktiga reaktioner sker mellan cementets beståndsdelar och vatten: Silikatreaktioner, Aluminatreaktioner samt ferrit reaktioner (Johansson, 2017) och (Taylor, 1990).

Silikatreaktioner

Silikatreaktionerna uppstår när C₃S och C₂S reagerar med vatten. Följande reaktioner sker, (Johansson, 2017):



och



Substansernas massandelar i reaktionen är enligt (Neville, 2008):

$$100 + 24 \rightarrow 75 + 49 \text{ (andelar enligt Ekv. 1)}$$

$$100 + 21 \rightarrow 99 + 22 \text{ (andelar enligt Ekv. 2)}$$

De produkter som bildas är kalciumsilikathydrater (C-S-H) och kalciumhydroxid (CH). C-S-H har ingen bestämd och enhetlig kemisk sammansättning (Taylor, 1990). C-S-H kan bildas med olika förhållande mellan C och S eller Ca/Si kvot. Även den i C-S-H bundna vattenmängden kan variera. Enligt Taylor, betecknar termen CSH-gel ett material som innehåller enbart CaO·SiO₂·H₂O, däremot kan C-S-H gel innehålla andra ämnen, t.ex. aluminat som tränger in vid tillsättning av puzzolana tillsatsmaterial. CaO·SiO₂·H₂O är ingen kemisk formel, utan antyder de oxider som bygger upp gelen.

Vid fullständig hydrataion bildar C-S-H ett poröst nätverk som kallas cementgel. Gelen är amorf och har en skiktad struktur med vatten mellan olika skikt. Vattenmängden mellan de fasta skikten varierar med omgivningens RH (Taylor, 1990). Vattnet är inte kemiskt bundet men det är starkt bundet till materialet. För att bestämma vattenmängden måste materialet torkas. Även torkningsmetoden

kan påverka mätresultaten. I (Taylor, 1990) redovisas en sammanställning av i litteraturen rapporterade mätningar utförda på fullständig hydratiserade C_3S pastor, som har torkats genom "D-drying". Vid D-drying torkas provbiten genom luft som har torkats med $-79\text{ }^\circ\text{C}$ is. Enligt sammanställningen varierar vatteninnehållet hos pastorna mellan 20,4 och 22,0 %, vilka korresponderar till C-S-H sammansättningar motsvarande $1,7CaO \cdot SiO_2 \cdot 1,3-1,5H_2O$.

Kvoten Ca/Si påverkar bl.a. C-S-H-gelens struktur och porlösningens pH. Därför är den en viktig parameter när det gäller cementbaserade materialens beständighet. Som framgick ovan kan kvoten Ca/Si variera. Kvoten styrs av cementets sammansättning, typ av reaktioner samt olika parametrar som påverkar hydrationsprocessen. Enligt (Taylor, 1990) kan också kvoten variera inom det hårdnade/hydratiserade materialet, d.v.s. att Ca/Si kvoten i en hydratiserad cementpasta kan variera från en punkt till en annan punkt. Även provningsmetoden kan påverka dess värde, d.v.s. att det inte råder samstämmighet mellan olika mätmetoder. Därför, de i litteraturen redovisade värdena kan vara osäkra. Taylor anser att medelvärdet av Ca/Si i ett hydratiserad C_3S pasta kan variera mellan 1,66 och 1,93.

Inom cementforskningen beskrivs C-S-H gelens struktur genom, de i naturen förekommande, mineralerna tobermorit och jennit, på grund av de likheter som man anser att det finns mellan C-S-H gelens struktur och de nämnda mineralerna. Skillnaden mellan dessa mineraler ligger i bl.a. deras Ca/Si kvot samt silikatkedjans längd. Vid given längd hos silikatkedja är jennitens Ca/Si kvot högre än tobermoritens Ca/Si kvot (Taylor, 1990). Båda mineralernas Ca/Si kvot minskar med ökad längd hos silikatkedjan.

Vid silikatreaktionerna bildas även $Ca(OH)_2$, kalciumhydroxid (CH), som har en skiktad kristallin struktur. Bindningskraften mellan de olika skikten är svag, därför CH bidrar inte nämnvärt till det hårdnande cements hållfasthet och styvhet. Dessutom, genom att göra C-S-H gelen mindre homogen medför den en sänkning av C-S-H gelens hållfasthet. Däremot är CH viktig för att upprätthålla ett högt pH ($pH \approx 12,5$) i porlösningen. CH:s struktur liknar den naturliga mineralen portlandit, därför benämns CH portlandit. I ett standard PC och anläggningscement härstammar större delen av det hårdnade cementets CH från C_3S reaktionen.

Aluminatreaktioner

Aluminatreaktionerna sker när C_3A reagerar med vatten. Reaktionerna sker i två steg. I det första steget reagerar C_3A med gips, $CaSO_4$, varav ettringit bildas. Så som beskrevs ovan tillsätts gips för att förhindra C_3A :s omedelbara reaktion med vatten, (Johansson, 2017).



Efter kort tid, ca ett dygn, sker en ny reaktion genom vilken omvandlas ettringiten till monosulfat.

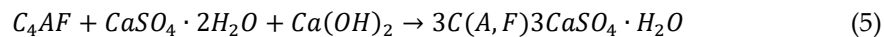


Tillgången på löslig $CaSO_4$ bestämmer vilken mineral som bildas (Johansson, 2017). I början när tillgången på $CaSO_4$ är god bildas ettringit. Allt eftersom $CaSO_4$

förbrukas och dess koncentration minskas bildas monosulfat i stället för ettringit. Vidare, reagerar den kvarvarande delen av C_3A , när all $CaSO_4$ har förbrukats, med kalciumhydroxid och bildar kalciumaluminathydrater. Kalciumaluminathydrater (C_4AH_{13} eller $C_4Al_2O_3 \cdot 13H_2O$) ingår antingen i monosulfatens struktur eller bildar separata kristaller (Taylor, 1990). Andelen SO_3 i förhållande till andelen Al_2O_3 i ett vanligt PC är ca 0,6, vilket bör leda till att enbart monosulfat ($C_3ACaSO_4 \cdot 12H_2O$) och kalciumaluminathydrat bli de slutliga produkterna, men ändå en del ettringit kvarstår.

Ferritreaktioner

Ferriten reagerar, liksom aluminaten, med gips och bildar nålformiga kristaller (Johansson, 2017). Reaktionen är enligt (Johansson, 2017) följande



Ferritreaktionerna påverkas på samma sätt som aluminatreaktionerna av $CaSO_4$ koncentrationen. När $CaSO_4$ koncentrationen sjunker, bildas $3C(A,F)CaSO_4 \cdot H_2O$ eller reagerar ferriten med kalciumhydroxid och bildar $3C(A,F)Ca(SO_4OH) \cdot H_2O$.

Sammanfattning av reaktionsprodukter

Kalciumsilikathydrat C-S-H

Det är huvudreaktionsprodukten som styr betongens hållfasthet, styvhet, krympning och krympningsegenskaper samt täthet och diffusionsegenskaper. C-S-H gelens Ca/Si kvot varierar mellan 1,66 och 1,93. Ca/Si kvoten styr C-S-H gelens struktur och porlösningens pH.

Kalciumhydroxid (portlandit)

Det kalciumhydroxiden (CH) bildas under silikatreaktionerna. Under hårdnande processen kan CH, vid låga $CaSO_4$ koncentrationer, reagera med både aluminat och ferrit och bilda nya mineraler. CH bidrar inte i någon större utsträckning till cementpastans mekaniska och fysikaliska egenskaper, men den stor inverkan på porlösningens pH. CH upprätthåller ett pH kring 12,5 som kan vara fördelaktig för att skydda betongens armering mot korrosion, skydda C-S-H gelen mot urlakning men samtidigt kan ha negativ inverkan på betongens beständighet när det gäller ASR.

AFm- och AFt-faser

AFm och AFt är två grupper av mineraler som bildas i cement. Den viktigaste mineralen bland AFm gruppen är monosulfat, se *Aluminatreaktioner*, medan den viktigaste mineralen bland AFt gruppen är ettringit, se *Aluminatreaktioner*. Som framgick ovan styrs mineralernas bildande av $CaSO_4$ koncentrationen. Låg koncentration leder till bildandet av AFm och hög koncentration leder till AFt. Bokstaven "t" (tri) i AFt indikerar att det finns tre anhydratmolekyler, $3CaSO_4$, se Ekv. (3). Bokstaven "m" (mono) i AFm indikerar att det finns en anhydratmolekyl, $CaSO_4$, se Ekv. (4). Bland AFm gruppen kan även monokarbonat nämnas ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$). Monokarbonat bildas genom att kalk, som antingen blandas vid klinkermalning eller tillsätts betongen som kalkfiller, reagera med aluminaten.

Cementgel är ett komplext material som är sammansatt av flera fasta beståndsdelar, varav de flesta, t.ex. C-S-H och AFm, är amorfa och skiktade som blandas lagervis ihop från nanometers- till mikrometersnivåer. De övriga beståndsdelar som inte har skiktade struktur, som AFt, blandas också ihop med de övriga men i någon högre nivå (mikronivå). Den relativa andelen av de olika beståndsdelarna kan i mikronivå variera mellan olika delar av materialet. Detta betyder att termen C-S-H kan enbart omfatta en eller kanske två av beståndsdelarna (reaktionsprodukterna). Under förutsättning att de nyssnämnda uppmärksammas kan termen "C-S-H gel" fortfarande anses vara lämpligt för materialet; alternativt termen "cement gel" är möjligen att föredra, (Taylor, 1990).

4.1.4 Reaktioner av portlandcement innehållande puzzolana tillsatsmaterial

Allmänt

SS-EN 197-1 definierar puzzolana material på följande sätt: *"Puzzolana material är naturliga ämnen med kisel- eller kiselaluminiumhaltig sammansättning eller en kombination av dessa. Puzzolana material hårdnar inte själva vid blandning med vatten, men finmalda och vid närvaro av vatten reagerar de vid normal omgivningstemperatur med löst kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) och bildar hållfasthetsutvecklande föreningar av kalciumsilikater och kalciumaluminater. Dessa föreningar liknar de som bildas vid hårdnande av hydrauliska material. Puzzolana material består huvudsakligen av reaktiv kiseldioxid (SiO_2) och aluminiumoxid (Al_2O_3). Resten består av järnoxid (Fe_2O_3) och andra oxider. Andelen reaktiv kalciumoxid för hårdnandet är försumbar. Andelen reaktiv kiseloxid får inte vara mindre än 25,0 % massfraktion."*

Bland puzzolana tillsatsmaterial beaktas i detta avsnitt enbart flygaska och silikastoft. Det senare beaktas enbart för jämförelse och belysning av puzzolana reaktioner.

Flygaska

SS-EN 197-1 indelar flygaskorna i två grupper:

- I. **Kiselrik flygaska (V)** är ett fint pulver av huvudsakligen sfäriska partiklar med puzzolana egenskaper. Den består huvudsakligen av reaktiv kiseldioxid (SiO_2) och aluminiumoxid (Al_2O_3). Återstoden innehåller järnoxid (Fe_2O_3) och andra föreningar.
- II. **Kalkrik flygaska (W)** är ett fint pulver som har hydrauliska och/eller puzzolana egenskaper. Den består huvudsakligen av reaktiv kalciumoxid (CaO), reaktiv kiseldioxid (SiO_2) och aluminiumoxid (Al_2O_3). Återstoden innehåller järnoxid (Fe_2O_3) och andra föreningar.

Tabell 3 presenterar huvudkraven som de olika grupperna skall uppfylla.

Tabell 3: Huvudkraven som SS-EN 197-1 ställer på kalkrik respektive kiselrik flygaska.

Ämne	Kiselrik flygaska (V) Viktsandel (%)	Kalkrik flygaska (W) Viktsandel (%)
Reaktiv kalciumoxid (CaO)	< 10	> 10
Fri kalciumoxid	< 1	-
Reaktiv kisel-dioxid	> 25	> 25
$(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3)$	> 70	

Den amerikanska (ASTM) klassindelningen är baserad på det sammanlagda innehållet av $(SiO_2) + (Al_2O_3) + (Fe_2O_3)$ under respektive över 70 %, som ungefär motsvarar högt respektive långt innehåll av CaO , (Taylor, 1990). Enbart flygaskor med lågt CaO innehåll beaktas i denna rapport.

Silikastoft

SS-EN 197-1 definierar silikastoft enligt följande: "Silikastoft kommer från reduktion av hög ren kvarts med kol i elektriska bågugnar vid produktion av kisel och järn-kisel legeringar. Det består av mycket små sfäriska partiklar innehållande minst 85 % (klass 1) massfraktion amorf kisel-dioxid. Innehållet av ren kisel (Si) bestämd enligt ISO 9286, får inte överstiga 0,4 % massfraktion.". Enligt SS-EN 13263-1 får andelen fri CaO inte överstiga 1 vikts % samt sulfatinnehållet uttryckt som SO_3 , får inte vara större än 2 vikts %.

Puzzolana reaktioner

Puzzolana reaktioner kan översiktligt beskrivas enligt nedan:

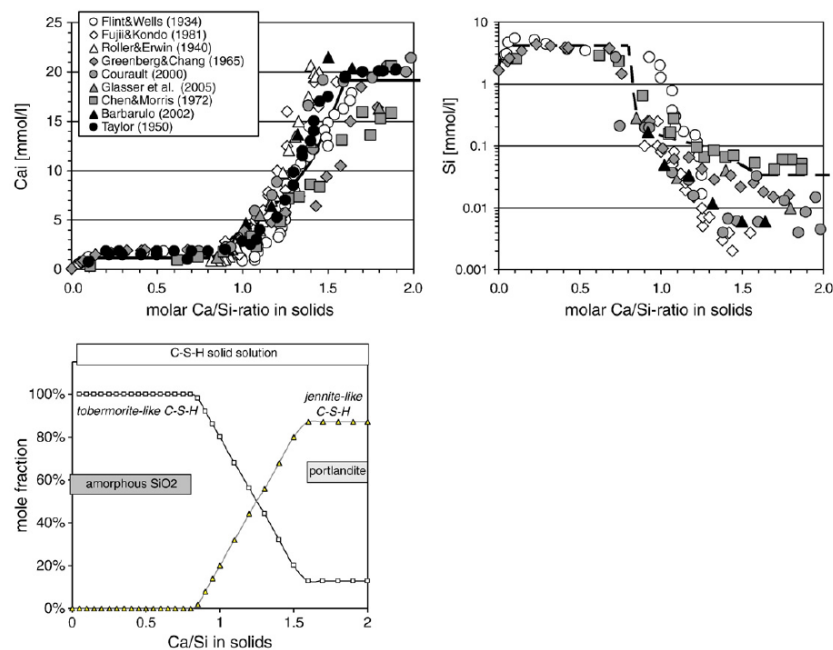
CH , som bildas under PC:s silikatreaktioner, reagerar med den SiO_2 som finns i det puzzolana tillsatsmaterialet. Resultatet blir att nya kalciumsilikathydrater bildas. Den $C-S-H$ gel som bildas under inflytandet av puzzolana reaktioner får egenskaper som skiljer sig från den $C-S-H$ gel som bildas genom PC reaktioner. Skillnaderna styrs av det puzzolana materialets innehåll av SiO_2 , Al_2O_3 och CaO . I detta sammanhang kan fyra olika puzzolana material nämnas: silikastoft, kiselrik flygaska, kalkrik flygaska och slagg. Silikastoft innehåller hög halt SiO_2 men knappast någon Al_2O_3 . Kiselrik flygaska innehåller både SiO_2 och Al_2O_3 samt mindre mängder Fe_2O_3 och CaO . Jämfört med Silikastoft och kiselrik flygaska innehåller både kalkrik flygaska och slagg betydligt mer CaO . Något förenklat uttryckt varierar förhållandet CaO/SiO_2 från ca 3 för portlandcement till 0 för silikastoft och kiselrik flygaska. För kalkrik flygaska och slagg är förhållandet CaO/SiO_2 ca 1, (Löfgren, 2017). Förhållandet CaO/SiO_2 , mängden Al_2O_3 påverkar sammansättningen och egenskaperna hos de produkter som bildas genom puzzolana reaktioner.

När silikastoft reagerar med CH , minskar mängden CH och nya $C-S-H$ gel med lägre Ca/Si kvot bildas. Med minskad Ca/Si kvot ökar bindning av Al i $C-S-H$ gelen: $C-A-S-H$ gel, (Lothenbach m.fl. 2011). De puzzolana reaktionerna medför att silikatkedjornas längd ökar. Ju lägre Ca/Si kvot desto längre blir silikatkedjorna. Al binds i de punkter där silikatkedjorna bryts för att bilda längre kedjor. Al utgör en brygga i de nya bindningspunkterna. Ca/Si kvotens storlek och sänkning av CH -

halten styrs av mängden silikastoft i förhållande till cementmängden. Under puzzolana reaktioner binds även Na och K , som är närvarande i porlösningen, i $C-S-H$ gelen. Sänkt mängd Na , K och Ca i porlösningen leder till sänkt pH . Den genom puzzolana reaktioner bildade $C-S-H$ gelen har lägre pH jämfört med motsvarande gel som bildas genom portlandcementreaktioner. De puzzolana reaktionerna medför att $C-S-H$ gelens struktur, i takt med minskande Ca/Si kvot, övergår från en jennit liknande struktur till en tobermorit liknande struktur. Vid en given kedjelängd är Tobermoritens Ca/Si kvot lägre än jennitens.

Puzzolana reaktioner som sker i närvaro av kiselrik flygaska skiljer sig till viss utsträckning från de reaktioner som sker i närvaro av silikastoft. Flygaska innehåller Al_2O_3 och mindre mängd SiO_2 , vilken påverkar reaktionerna och de strukturer som bildas. Vidare, är flygaskans partiklar betydligt större än silikastoftens partiklar vilken påverkar både reaktionshastigheten och reaktionsprodukterna.

Figur 3 visar lösligheten hos $C-S-H$ gelens slutprodukter (jennit och tobermorit) uttryckt genom molar koncentration av Ca och Si i lösningen, som funktion av Ca/Si kvot. Överst i figuren visas mättad koncentration av Ca och Si som funktion av Ca/Si kvot. Nederst i figuren visas andel av slutprodukterna av $C-S-H$ gel (jennit och tobermorit) som funktion av Ca/Si kvot. Resultaten överst i figuren visar sammanställning av mätvärden som presenteras i litteraturen, där man har undersökt lösligheten av olika $C-S-H$ gel med olika Ca/Si kvot. Resultaten har jämförts med de beräkningar som redovisas i (Lothenbach m.fl. 2011). Nederst i Figur 3 visas beräknade molar andelar av jennit-liknande och tobermorit-liknande $C-S-H$ gel i hårdnade pasta, (Lothenbach m.fl. 2011).



Figur 3: Lösligheten hos $C-S-H$ gelens slutprodukter (jennit och tobermorit) uttryckt genom molar koncentration av Ca och Si i lösningen, som funktion av Ca/Si kvot. Överst visas mättad koncentration av Ca och Si som funktion av Ca/Si . Nederst visas andel av slutkomponenterna av $C-S-H$ (jennit och tobermorit) som funktion av Ca/Si kvot (Lothenbach m.fl. 2011).

När det gäller Ca/Si kvotens inverkan kan tre områden identifieras i Figur 3:

Område I: $Ca/Si < 0,8$

Område II: $0,8 < Ca/Si < 1,7$

Område III: $Ca/Si > 1,7$

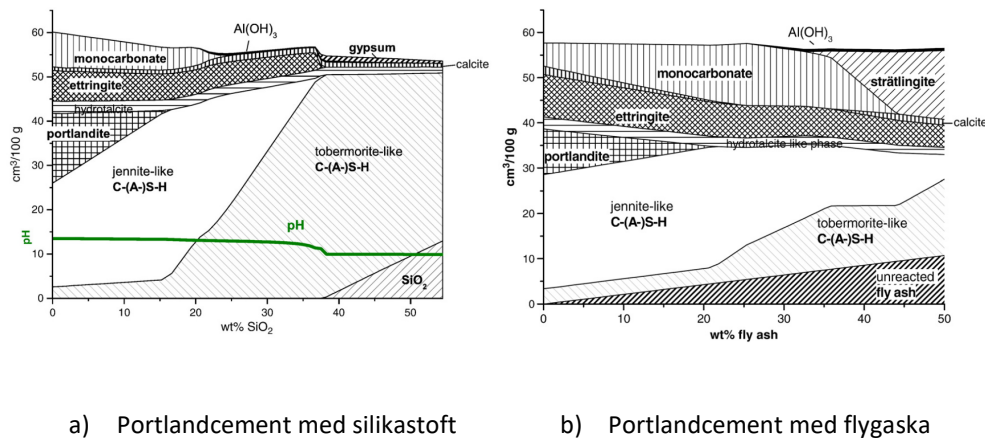
Det bör noteras att gränsvärdena är ungefärliga och baserade på uppskattning från figuren. Dessutom varierar gränserna med typ av cement och tillsatsmaterial.

Område I representerar en pasta av ett bindemedel som innehåller stor andel reaktiv SiO_2 , d.v.s. ett bindemedel som till 62 % består av portlandcement och till 38 % av silikastoft. Område III representerar ett bindemedel som består av enbart portlandcement. Område II är övergången mellan Områdena I och III som representerar bindemedel som inte har överskott av SiO_2 . De bindemedel som innehåller normala mängder silikastoft och flygaska hamnar inom Område II. De översta diagrammen i Figur 3 visar att porlösningen i en C-S-H gel med låg Ca/Si kvot innehåller lägre mängd Ca och högre mängd Si jämfört med porlösningen i en C-S-H gel med hög Ca/Si kvot. Det praktiska konsekvenserna är enligt nedan:

- Inom Område I är porlösningens pH låg och andelen Si hög, vilken leder till att mindre Si från reaktiva ballast går i lösning för att reagera med betongens alkali.
- Inom Område I är mängden Ca låg, K och Na är bundna i gelen samt porlösningens pH är låg, vilken resulterar i mindre motstånd mot armeringskorrosion och sänkt kloridtröskelvärde.
- Inom Område I är mängden Ca ($Ca(OH)_2$) är låg och risken för urlakning mindre, eftersom Ca är hårdare bunden i C-S-H gel än i $Ca(OH)_2$.
- Område III uppvisar i princip de motsatta förhållandena. Där är porlösningens pH och innehåll av Ca , K och Na högre än Område I. Risken för ASR reaktioner är högre inom Område III än inom Område I. Vidare, skyddar en cementpasta inom III armeringen bättre mot korrosion än motsvarande pasta inom Område I. Även kloridtröskelvärden för pasta inom Område III är högre jämfört med dito för pasta inom Område I.
- Risken för urlakning är större inom Område III. $Ca(OH)_2$ löses lättare i vatten än C-S-H och dess löslighet är högre i låga temperaturer jämfört med höga temperaturer. Urlakning av betongkonstruktionens ytskikt vid vattenlinjen i dammkonstruktioner minskar betongens motstånd mot frostangrepp, vilken leder till erosion av betongens yttre skikt.
- Område II är ett övergångsområde där ovannämnda egenskaperna ändras successivt.

Figur 4 visar beräknade förändringar i hydratiserat portlandcement i närvaro av silikastoft (a) och flygaska (b), vid fullständig reaktion av portlandcement, (Lothenbach m.fl. 2011). När det gäller cement som innehåller flygaska har man vid beräkningarna antagit att enbart 50 % av flygaskan reagerar under lång tid. Beräkningarna förutsätter att Al/Si kvoten (andel Al som binds i förhållande till Si) är konstant och lika med 0,05 (för silikastoft) och 0,1 (för flygaska), för både jennit- och tobermorit-liknande C-S-H gel, vilket betyder att andelen Al ökar med ökad andel C-S-H gel, d.v.s. ökad andel puzzolana reaktioner.

I Figur 4 är mängden puzzolana tillsatsmaterial anges i vikt % av bindemedlet, d.v.s. att en bestämd mängd portlandcement ersätts med samma mängd (vikt) tillsatsmaterial.



Figur 4: Beräknade förändringar i hydratiserat portlandcement i närvaro av silikastoft (a) och flygaska (b) vid fullständig reaktion mellan portlandcement och inblandade puzzolana tillsatsmaterial, (Lothenbach m.fl. 2011). Vid beräkningar förutsattes att 50 % av den tillsatta flygaskan reagerar med cementet. Flygaskan förutsattes att innehålla 4,4 % CaO , 54 % SiO_2 , 31 % Al_2O_3 samt 4,6 % Fe_2O_3 .

Som framgår av Figur 4 reagerar silikastoft med portlanditen ($Ca(OH)_2$) vilken resulterar att mängden portlandit i cementpasta minskar med ökad mängd silikastoft. Enligt modellen konsumeras all portlandit när mängden silikastoft överstiger 18 %. Fram till denna andel silikastoft minskar inte den jennit-liknande C-S-H gelens andel utan ökar något. Anledningen är att det finns tillräcklig Ca i lösning för att silikatreaktioner, liknande de som sker vid portlandcementreaktioner, skall kunna ske. Som framgår av figuren förbrukas även monokarbonat, se portlandcement-reaktionerna, som innehåller Ca . Monokarbonat löses upp p.g.a. minskat pH och minskad koncentration av Ca i porlösningen. Efter denna punkt förändras strukturen hos den befintliga C-S-H gelen. För att ytterligare mängd Si skall kunna reagera måste en del av Ca från den jennit-liknande C-S-H gelen gå i lösning för att kunna reagera med Si från det puzzolana materialet. Denna process medför att den jennit-liknande C-S-H gelen övergår till en tobermorit-liknande struktur med lägre Ca/Si kvot och längre silikatskedjor. Som framgår av Figur 4a minskar mängden jennit-liknande C-S-H gel medan mängden tobermorit-liknande gel ökar med ökad mängd SiO_2 , för SiO_2 halter över 18 %.

Enligt Figur 4a minskar pH värdet, vilket medför att ettringiten och monokarbonaten blir instabila, löses upp och binds i strukturen. Vid ca 38 % SiO_2 kvarstår enbart tobermorit-liknande C-S-H gel, gips, kalcit och hydrotalcit. pH värdet sjunker under 10. Efter denna punkt förblir all silikastoft utöver 38 % oreagerad.

Figur 4b visar puzzolan reaktionerna i närvaro av flygaska. Som framgår av figuren förbrukas all portlandit vid tillsättning av ca 23 % flygaska. Från denna punkt börjar andelen jennit-liknande C-S-H gel minska medan andelen tobermorit-liknande C-S-H gel börjar öka. Som framgår av figuren kvarstår alltid en del

oreagerad flygaska, vilken beror på att det tar lång tid innan all flygaska reagerar. pH värdet sjunker men inte lika mycket som i fallet för silikastoft. Ökad mängd flygaska leder till minskad mängd ettringit, men ökad mängd monokarbonat. Vid inblandning av mer flygaska, ca 40 %, börjar både ettringit och monokarbonat bli instabila, vilken är tecken på märkbar sänkning av *pH* värdet.

Det bör noteras att den minskning av alkalinitet som erhålls genom silikastoft inte är stabil och kan öka igen efter lång tid. Anledningen är att silikastoft inte innehåller aluminiumoxid. Flygaska som däremot innehåller aluminiumoxid uppvisar istället stabilitet när det gäller sänkning av cementpastans alkalinitet. Enligt (Lothenbach m.fl. 2011) påverkar detta långtidsexpansionen av betong orsakad av ASR. Enligt de undersökningar som citeras i (Lothenbach m.fl. 2011) fortsätter expansion p.g.a. ASR i betong som innehåller upp till 10 % silikastoft, medan betong som innehåller flygaska eller slagg bättre lyckas att bromsa expansionen. Enligt (Lothenbach m.fl. 2011) är ett blandcement som innehåller portlandcement, silikastoft och flygaska överlägset när det gäller att sänka alkaliniteten och stabilisera den under lång tid.

4.1.5 Reaktionskinetik

Puzzolana tillsatsmaterial påverkar cementreaktionerna dels genom fillereffekten och dels genom att själv reagera med olika komponenter som uppkommer p.g.a. portlandcementreaktionerna. Enligt (Lothenbach m.fl., 2011) påverkar fillerreaktionerna via två mekanismer:

1. Extra utrymme för reaktioner: Filler producerar inga hydrater och det vatten som finns tillgängligt går åt i portlandcementreaktionerna. Vattencementtalet blir högre för det cement som deltar i reaktionerna och det finns mer utrymme för reaktionerna.
2. Förbättrad kärnbildning: De extra ytor som uppstår p.g.a. inblandning av puzzolana tillsatsmaterial underlättar reaktionerna och medför att reaktionerna initieras på många ställen.

Enligt (Snellings m.fl., 2012) beror den accelererande effekten på att Ca^{+2} adsorberas till den puzzolana partiklarnas yta samt att bildning av C-S-H initieras på de puzzolana partiklarnas yta. Processen förtunnar C_3S yta och medför att lösning av C_3S kan pågå längre.

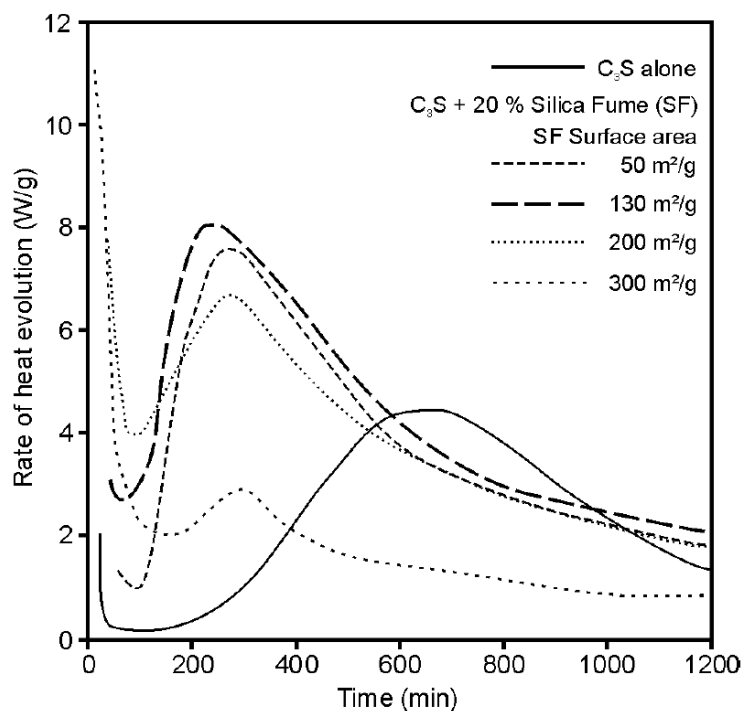
Enligt (Fagerlund, 2017): *"Inblandning av mineraliska tillsatsmaterial i portlandcement, till exempel silikastoft och flygaska men även kalkstenfiller, har i vissa fall visat sig aktivera hydratationen hos portlandklinkern i cementet"*. Fagerlund visar i ett exempel där tillsats av 40 % flygaska till rent C_3S -cement gav en kraftig ökning av hydratationen.

Puzzolana tillsatsmaterial påverkar portlandcementreaktionerna även genom att reagera med de produkter som bildas genom portlandcementets reaktioner. Genom att reagera t.ex. med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sänker de *Ca* halten och medför att mer *Ca* går i lösning för reaktioner.

Figur 5 jämför ren C_3S :s värmeutvecklingen under hydratisering med när C_3S är blandad med 20 % silikastoft. C_3S utgör 60-70 % av cementvikten. I figuren har

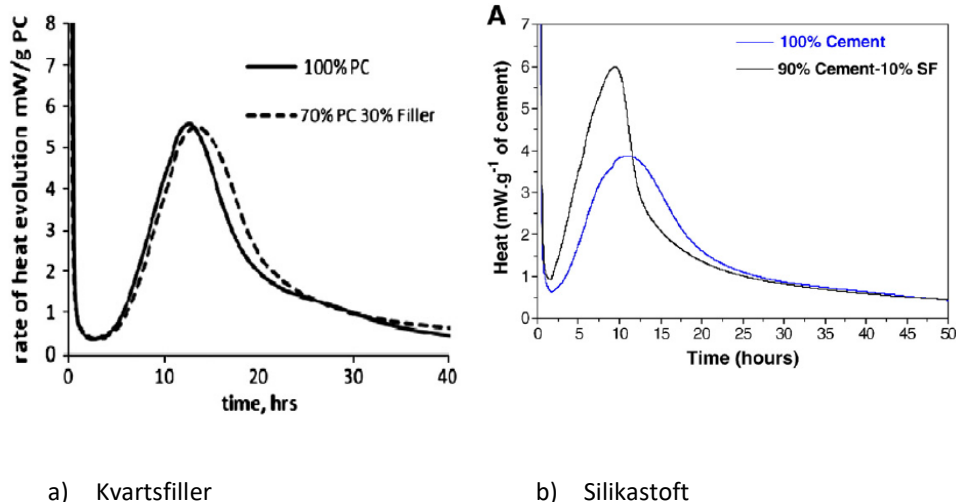
cementets värmeutveckling räknats om till C_3S :s värmeutveckling. Andelen silikastoft är 20 % av bindemedelsvikten d.v.s. 20 viktprocent cement har ersatts med motsvarande vikt silikastoft. Bland cementets komponenter reagerar C_3S snabbast av alla. I figuren jämförs effekten av silikastoftens partikelstorlek, d.v.s. specifik yta. Fyra olika specifika ytor jämförs. Den i Norden vanligaste silikastoftens specifika yta är ca 25000 m^2/kg (25 m^2/g), som är lägre än specifik ytan hos den grövsta silikastoft som användes för undersökningen, Figur 5.

Som framgår av Figur 4 ökar värmeutvecklingens hastighet och mängd med inblandning av silikastoft i samtliga fall, utom i fallet med silikastoft som har den högsta specifika ytan. Inblandning av silikastoft medför att värmeutvecklingens topp förskjuts åt vänster. Enligt (Snellings m.fl., 2012) ökar vattenbehovet när silikastoft med hög specifik yta blandas in. Brist på vatten hämmar reaktionerna. Resultaten visar tydligt inverkan av fillereffekten, eftersom silikastoft börjar reagera kemiskt långt senare.



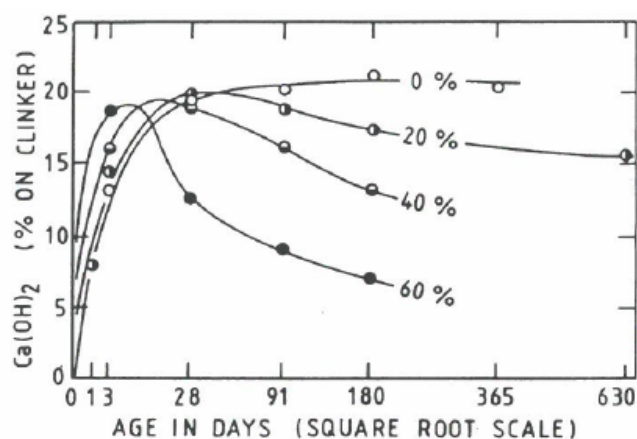
Figur 5: Inverkan av silikastoft med varierande specifik yta på värmeutveckling under hydratisering av C_3S med 20 viktprocent silikastoft, (Snellings m.fl., 2012).

I Figur 6 visas en undersökning som refereras i (Lothenbach m.fl., 2011). Som framgår av figuren har man undersökt inverkan av finmald kvartsfiller, som är ett inert material, och silikastoft på värmeutvecklingen under cementets hydratation. Värmeutvecklingen är beräknad per massenhet portlandcement. Som framgår av figuren har kvartsfiller marginell inverkan på värmeutvecklingen medan silikastoft har stor inverkan i tidigt skede. Även om silikastoft inte ingår i reaktionerna, har det en accelererande inverkan på cementreaktionerna.



Figur 6: Inverkan av kvartsfiller och silikastoft på värmeutveckling under hydratationsprocessen, (Lothenbach m.fl., 2011).

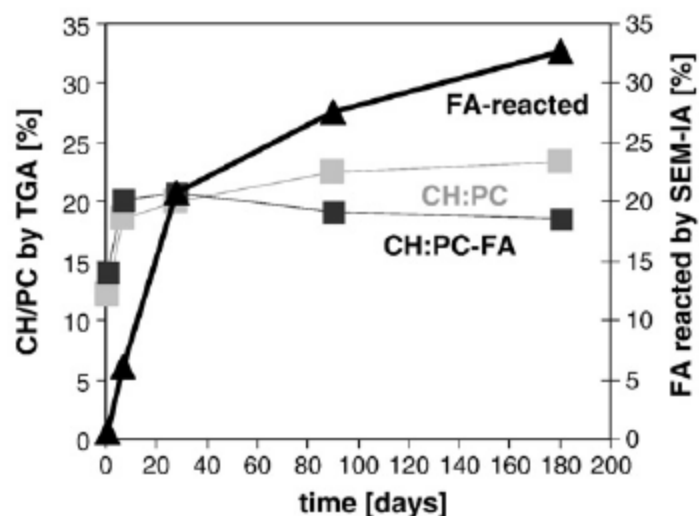
Figur 7 visar innehållet av $Ca(OH)_2$ i portlandcement-flygaska-pasta som funktion av ålder och viktsandel flygaska (Taylor 1990). Portlandcementklinkern är mald tillsammans med flygaskan. Som framgår av figuren ökar hastigheten på produktionen av $Ca(OH)_2$ med ökad mängd flygaska. Mängden av $Ca(OH)_2$ uppnår ett maximalvärde för att därefter sjunka p.g.a. puzzolana reaktioner. Vid måttlig inblandning av flygaska börjar de puzzolana reaktionerna efter 28 dygn. Inblandning av höga andelar flygaska påskyndar de puzzolana reaktionerna.



Figur 7: Innehåll av $Ca(OH)_2$ i portlandcement-flygaska pasta som funktion av ålder och viktsandel flygaska, andel av flygaska är i förhållande till portlandcementklinker, (Taylor 1990). Portlandcementklinkern är mald tillsammans med flygaskan.

Figur 8 visar innehållet av portlandit i cementpasta med portlandcement och cement bestående av 65 % portlandcement och 35 % flygaska samt flygaskans reaktionsgrad i cementpasta med 65 % portlandcement och 35 % flygaska,

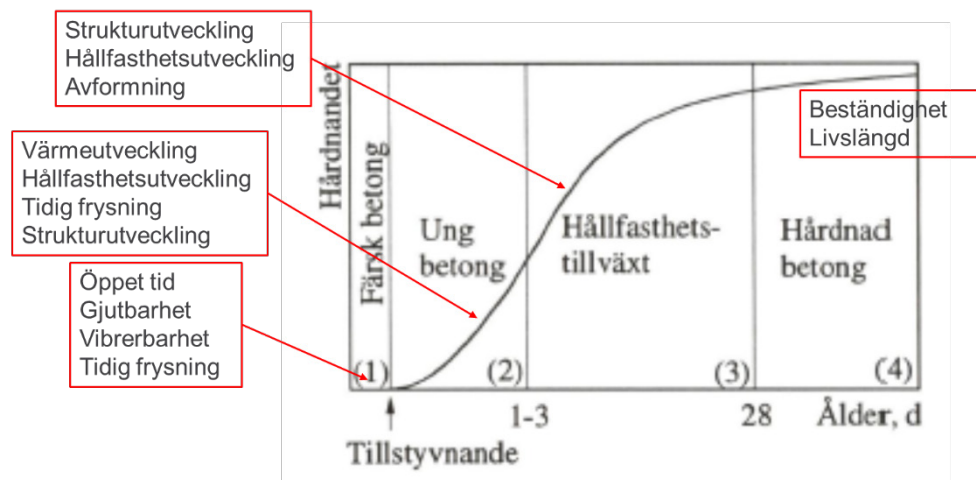
(Lothenbach m.fl., 2011). Som framgår av figuren följer kvoten CH/PC (portlandit/portlandcement) för båda cementtyperna varandra under ca 30 dagar. Därefter ökar CH/PC långsamt för cement med enbart portlandcement och minskar för blandcementet. Figuren visar även flygaskans reaktionsgrad. Det är svårt att bestämma den reagerade flygaskans mängd men figuren visar tydligt att det tar lång tid innan all flygaska har reagerat. Enligt figuren reagerar ca 60 % av flygaskan under de första 30 dygna.



Figur 8: Innehåll av portlandit (CH) i cementpasta med portlandcement och cement bestående av 65 % portlandcement och 35 % flygaska samt flygaskans reaktionsgrad i cementpasta med 65 % portlandcement och 35 % flygaska, (Lothenbach m.fl., 2011).

4.2 BETONGS EGENSKAPSUTVECKLING

När vatten tillsätts betongen startas en kemisk reaktion mellan bindemedlet och vattnet som kan pågå under lång tid, ibland flera år. Under denna tid förändras betongens egenskaper ständigt. Reaktionerna medför att betongens hållfasthet och dess motstånd mot inträngning av gaser, väskor och olika joner ökar. Hela processen kallas för "hårdnandet". Hårdnandeprocessen indelas i olika faser. Ett exempel på en sådan indelning framgår av Figur 9, (Betonghandbok Material, 1994).



Figur 9: Olika faser under betongens hårdnande. Grundfiguren är ur (Betonghandbok Material, 1994).

I det färska tillståndet, 1, sker de kemiska reaktionerna relativt långsamt. Betongens hållfasthets- och värmeutveckling är också långsam. Under detta tillstånd kan betongen transporteras, formsättas/gjutas och vibreras. Detta tillstånd avslutas vid tillstyvnadstidens slut, normalt inom 2 – 5 timmar. Tillstyvnandetiden påverkas av olika faktorer till exempel temperatur, tillsatsmedel samt mineraliska tillsatsmaterial påverkar tillstyvnandetiden.

Efter tillstyvnandet utvecklas betongens hållfasthet relativt snabbt, fas 2. Fasens längd är inte entydigt bestämd. Den anses, emellertid, vara slut när ca 50 % av cementet har hydratiserat vilken vid normala temperaturförhållanden inträffar inom 1-3 dygn efter vatteninblandningen. Betongen benämns under denna fas "ung betong".

Under fas 3 avtar tillväxthastigheten (hydratation, värmeutveckling, hållfasthet, motstånd mot inträngning av gaser, vätskor och joner) för att bli mycket långsam under fas 4. Betong under dessa faser benämns "nästan hårdnad betong" respektive "hårdnad betong". Gränsen mellan fas 3 och 4 är inte tydligt, men konventionellt sett utgör 28 dygn gränsen mellan dessa faser. Betongens tryckhållfasthet vid denna ålder och härdning vid 20 °C bestämmer betongens hållfasthetsklass.

I följande avsnitt beskrivs kortfattat hur inblandning av flygaska i betongens bindemedel påverkar betongens egenskaper vid olika faser.

4.3 FÄRSKA EGENSKAPER

4.3.1 Gjutbarhet

Vid tillsats av flygaska till betongmixen så ger framförallt den runda formen på flygaskans korn (se figur 2) en positiv effekt på arbetbarheten hos den färska betongen. Ibland kallas det för kullagereffekten. Enligt Neville (2011) så finns det också en betydande effekt av att de finaste flygaskapartiklarna är elektriskt laddade (statisk elektricitet) och p.g.a. det adsorberas på cementkornens yta och gör att cementkornen inte flockulerar lika lätt. Enligt Löfgren (2017) har effekten

också sin förklaring i att pastamängden blir större i det fall som cement ersätts med motsvarande vikt flygaska eftersom flygaskan vanligtvis har en lägre skrymdensitet (ca. 800-1200 kg/m³) än cement (1000-1500 kg/m³).

Båda dessa effekter gör att vattenbehovet minskar 5-15% vid samma konsistens jämfört med betong utan flygaska. Neville (2011) påpekar dock att restkol i flygaskan också kan ha motsatt effekt på arbetbarheten direkt och genom reducerad effekt av flyttillsatsmedel och vattenreducerare. Även effekten av luftporbildande medel påverkas av restkolet som istället adsorberas på de porösa kolpartiklarna och vanligtvis behövs en högre dosering för att uppnå önskad lufthalt i den färdiga betongen.

De positiva effekterna på arbetbarhet och stabilitet hos den färska betongen vid tillsats av flygaska gör också betongen lättare att pumpa och minskar risken för vattenseparation.

4.3.2 Tillstyvnadstiden

Flygaska i betongmixen skapar en retarderande effekt i det allra tidigaste skedet genom att sulfationer från flygaskakornens yta frigörs enligt Neville (2011) och effekten måste beaktas vid låga temperaturer då effekten förstärks. Vid högre temperaturer (20-80 °C) sker dock reaktionen snabbare än i betong med enbart portlandcement, vilket måste beaktas vid grova konstruktioner där temperaturen inne i betongen vanligtvis blir högre.

4.3.3 Härdning

Eftersom flygaskans reaktioner tar längre tid än reaktionerna i betong med rena portlandcement ställs också högre krav på att fullgod härdning fortgår under längre tid för att erhålla samma sprickfrihet och täthet som traditionell betong. Betong med flygaska t.ex. har mindre blödning (vattenavgång till ytan) vilket kan vara positivt i fråga om ytbehandling men det ökar också risken för plastiska krympsprickor vilket ger ett behov av ytterligare förbättrad härdningsinsats.

4.4 UNGA BETONGENS EGENSKAPER

4.4.1 Hydratationsgrad

Hydratationsgraden (α) anger den massandel av cement som är fullständigt hydratiserat vid en viss tidpunkt (Fagerlund, 2017).

$$\alpha = \frac{C_h}{C} \quad (6)$$

α är hydratationsgrad. C_h respektive C är mängden fullständigt hydratiserat cement respektive betongens totala mängd cement, kg/m³. Termen cement refererar här till både portlandcement och blandcement (portlandcement inklusive det puzzolana tillsatsmaterial som ingår i blandcementet).

För portlandcement kan hydratationsgraden uttryckas även enligt följande (Fagerlund, 2017).

$$\alpha \approx 4 \cdot \frac{W_n}{c} \quad (7)$$

W_n är det kemiskt bundna vattnet, kg. Det är osäkert om Ekvation (7) kan användas för blandcement, eftersom det kemiskt bundna vattnet kan variera med typ och mängd av det puzzolana tillsatsmaterialet.

Cementets reaktion med vatten är en exoterm process, d.v.s. värme utvecklas under processen. Genom att anta att utvecklad värme per massenhet reagerat cement är konstant under hela hydratationsförloppet kan hydratationsgraden även uttryckas på följande sätt, (Byfors, 1980).

$$\alpha = \frac{Q_h}{Q} \quad (8)$$

Q_h är totalt utvecklat värme fram till en viss tidpunkt, J/kg. Q är utvecklat värme vid fullständig hydratation, J/kg.

En cementpasta (som innehåller enbart portlandcement) med mycket lågt vct kan inte hydratisera fullständigt, eftersom allt tillgängligt utrymme fylls av cementgel redan innan allt cement hydratiseras. Den maximala möjliga hydratationsgraden vid olika vct framgår av följande samband, (Fagerlund, 2017):

$$\alpha_{max} = \frac{vct}{0,39} \quad \text{för } vct \leq 0,39 \quad (9a)$$

$$\alpha_{max} = 1 \quad \text{för } vct > 0,39 \quad (9b)$$

Det är möjligt att ekvation (9) inte stämmer för blandcement som innehåller puzzolana material. På grund av att betong i vattenkraftsanläggningar har vct som överstiger 0,45 har Ekvation (9a) ingen praktisk tillämpning i vattenkraftssammanhang. För vattenkraftstillämpningar kan man utgå ifrån att all cement (inklusive puzzolana tillsatsmaterial) hydratiserar efter lång tid.

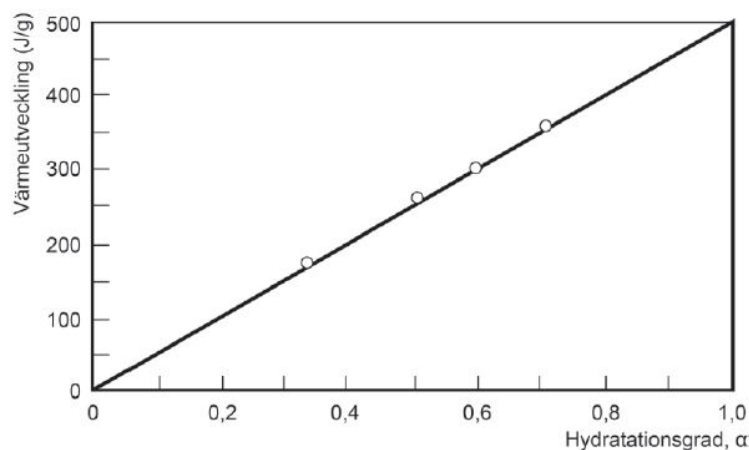
Cementets hydratation är tidsberoende. (Byfors, 1980) anger ett empiriskt samband mellan hydratationsgrad och tid:

$$\alpha = e^{-a(ln t)^{-b}} \quad (10)$$

t är tid (timmar) samt a och b är konstanter som beror på cementets kemiska sammansättning och specifika yta, vattencementtalet, temperatur- och fuktförhållandena under härdningen samt de tillsatsmedel och tillsatsmaterial som används i betongen. Ekvation (10) har en S-format likt den som framgår av Figur 9. Den intresserade läsaren hänvisas till (Fagerlund, 2017) för mer detaljer om Ekvation (10).

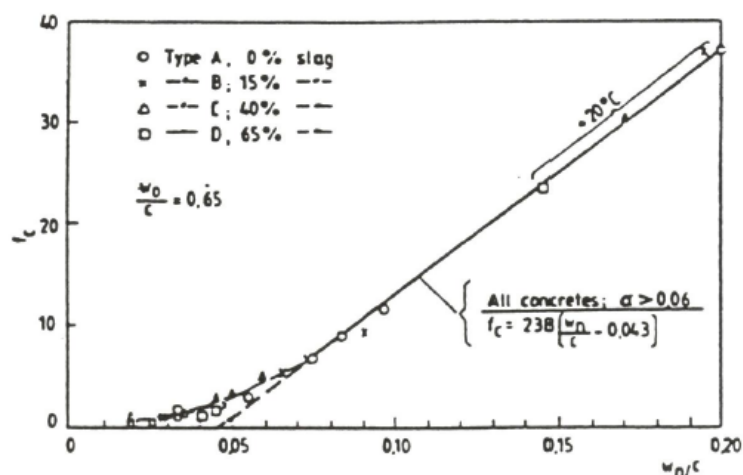
Figur 10 visar samband mellan värmeutveckling och hydratationsgrad för svenskt portlandcement. Som framgår av figuren är sambandet linjärt. Med kännedom om cementets totala värmeutveckling är det möjligt att bestämma cementets hydratationsgrad vid given temperaturutveckling, eller vice versa. Detta har stor praktisk tillämpning, eftersom det kan användas tillsammans med Ekvation (10), eller motsvarande, för mognadsgrad- och temperaturutveckling i betongkonstruktioner. Rapportens författare har ingen information om hur detta

samband påverkas av inblandning av flygaska eller andra puzzolana tillsatsmaterial.



Figur 10: Samband mellan värmeutveckling och hydratationsgrad för svenskt portlandcement, (Fagerlund, 2017) med data från (Byfors, 1980).

Figur 11 visar betongens tryckhållfasthet som funktion av den icke förångningsbara vattenandelen, vilken motsvarar $0,25 \cdot \alpha$ för portlandcement, (Fagerlund, 1987). Resultaten avser betong dels utan slagg och dels med olika slagginnehåll. Som framgår av figuren råder ett linjärt samband mellan betongens tryckhållfasthet och hydratationsgraden. Inledningsvis råder, emellertid, ett icke linjärt samband men efter en relativt låg hydratisering blir sambandet linjärt. Sambandet kan naturligtvis inte användas för att bestämma all sorts betongens tryckhållfasthet. Sambandet visar, dock, att hållfasthetsökningen är proportionellt mot hydratationsgraden, i alla fall upp till $\alpha = 0,8$.



Figur 11: Betongens tryckhållfasthet som funktion av andel icke förångningsbart vatten vid olika mängd inblandad slagg, $w_{ct}=0,65$, (Fagerlund, 1987).

4.4.2 Cementets temperaturkänslighet

Med antagandet att cementpastans hydratationsgrad är ett mått på hur långt de kemiska reaktionerna fortskridit kan de kemiska reaktionernas hastighet, vid temperaturen ϑ , likställas med derivatan av hydratationsgraden med avseende på tiden vid samma temperatur.

$$v_{\vartheta} = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\vartheta} = K_C \cdot e^{-\frac{\theta_0}{T}} \quad (11)$$

v är reaktionshastighet (1/s) vid temperatur ϑ . K_C är en koefficient som beror på cementtyp men är oberoende av temperatur. θ_0 är aktiveringstemperatur ($^{\circ}\text{C}$) enligt Arrhenius ekvation. Även θ_0 beror på cementtyp och är oberoende av temperatur. T är den absoluta temperaturen enligt Kelvin (K).

Vid praktisk användning relateras reaktionshastigheten till viss temperatur s.k. referenstemperatur (T_r), enligt nedan:

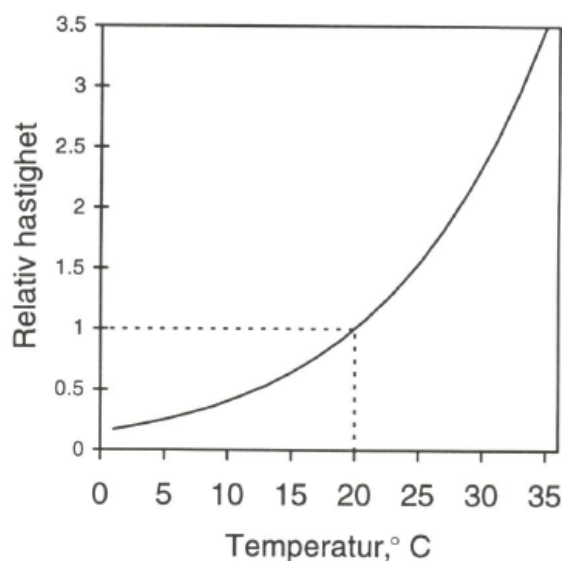
$$\frac{(d\alpha/dt)_{\vartheta}}{(d\alpha/dt)_{\vartheta_r}} = e^{\theta_0\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)} \quad (12)$$

Referens temperaturen är normalt 20°C ($T_r = 273 + 20 = 293$).

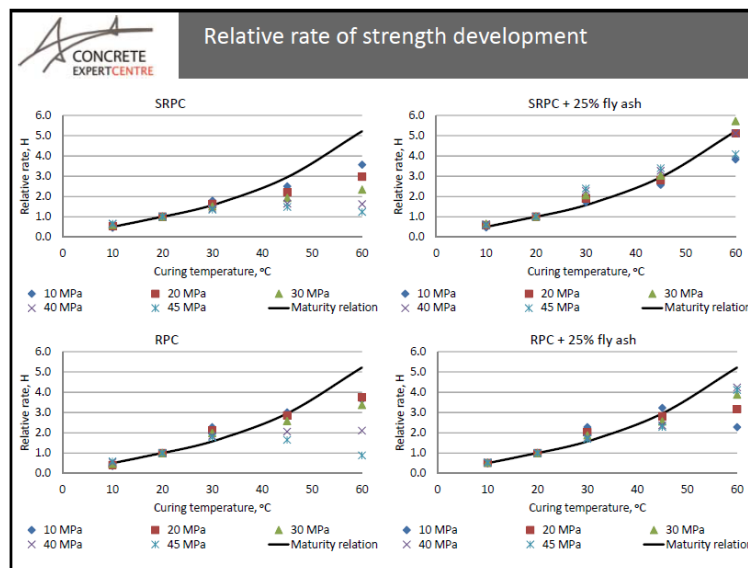
Figur 12 visar samband mellan reaktionshastighet och temperatur.

Reaktionshastigheten är relativ referenshastigheten som är 20°C .

Rapportförfattarna har inte hittat i någon systematisk sammanställning av motsvarande kurvor för cement innehållande flygaska. Figur 13 visar relativ hållfasthetsutveckling som funktion av temperatur för standard portlandcement med och utan flygaska, snabbt hårdnande portlandcement med och utan flygaska. Som framgår av figuren har härdningstemperaturen stor inverkan på hållfasthetstillväxten hos betong med flygaska. Resultaten visar att flygaska förbättrar cementets härdning vid höga temperatur, vilken kan ha fördelar när det gäller tjocka vattenkraftkonstruktioner.



Figur 12: Samband mellan temperatur och relativ reaktionshastighet (Hassanzadeh, 1998). Kurvan är beräknad med $\theta_0 = 7528^{\circ}\text{C}$ och $\vartheta_r = 20^{\circ}\text{C}$.



Figur 13: Relativ hållfasthetsutveckling (Kaasgaard m.fl., 2012). SRPC = std portlandcement, RPC = snabbt hårdnande portlandcement.

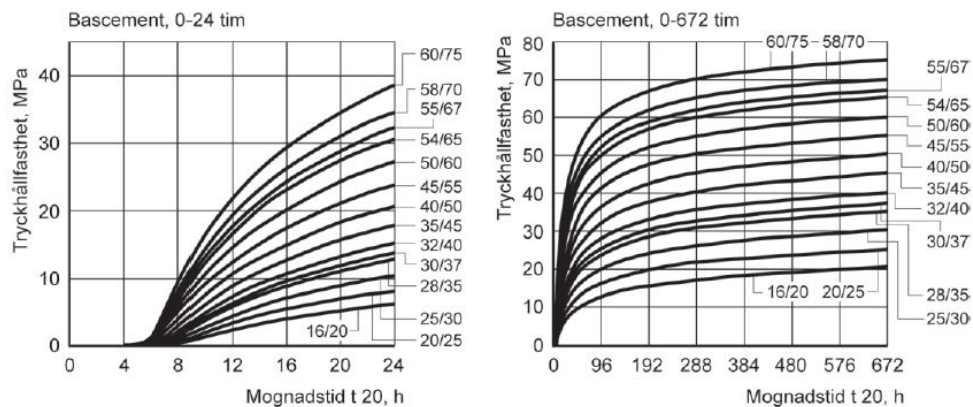
Som framgår av figuren sker vid förhöjda härdningstemperaturer reaktionen snabbare i flygskabetong än i betong med enbart portlandcement, vilket måste beaktas vid grova konstruktioner där temperaturen inne i betongen vanligtvis blir högre.

4.4.3 Mognadsålder och ekvivalent härdningstid

Det samband som visas i Figur 14 kallas även för β_T kurva (β_T = hastighetsfaktor med hänsyn till temperatur). Sambandet används för bestämning av mognadsålder (M), eller ekvivalent härdningstid (t_e), som beräknas enligt nedan:

$$M = t_e = \int_0^t \frac{(d\alpha/dt)_\theta}{(d\alpha/dt)_{\theta_r}} dt = \int_0^t \beta_T dt \quad (13)$$

Mognadsålder och ekvivalent härdningstid kan användas för bestämning av betongens aktuella tryckhållfasthet. För att kunna göra det så krävs det att det finns samband mellan dessa parametrar och betongens tryckhållfasthet, så kallad tendenskurvor, Figur 14.



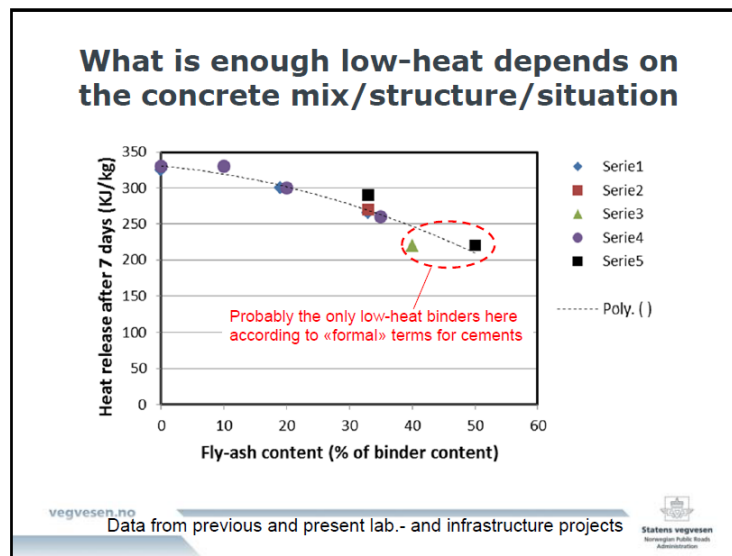
Figur 14: Tendenskurvor för hållfasthetstillväxt framtagna av cementtillverkare, (Almgren et al, 2016) ur (Jonasson, 2017).

Tendenskurvor är t.ex. nödvändiga för att kunna bestämma mognadsåldern för att undvika tidig frysning, för avformning samt kontrollera om betongen har uppnått sin 28-dygns hållfasthet. På grund av att inblandning av flygaska sänker hållfasthetstillväxten vid tidig ålder och ökar tillväxten vid högre åldern bör tendenskurvor för betong som innehåller bara portlandcement skilja sig från betong som innehåller blandcement.

4.4.4 Värmeutveckling

Den totala värmeutvecklingen beror på typ av cement och flygaska och andelen av de olika materialen. Det är svårt att ange ett exakt värde för den totala värmeutvecklingen. I CEMENTA:s produktblad för Anläggningscement FA anges att värmeutveckling vid 7 dygn är lägre än 290 kJ/kg. Motsvarande värde för Anläggningscement Degerhamn är 270 kJ/kg. För Anläggningscement Degerhamn anges även värden för 1 respektive 3 dygn som är 170 respektive 240 kJ/kg. Av värdena för Anläggning Degerhamn framgår att det mesta av värmeutvecklingen sker under de inledande tre dyggen. Detta bör även gälla för Anläggningscement FA. Med hänsyn till den accelererande effekt som flygaska kan ha, se avsnitt 4.1.5, är det möjligt att även större andel av värmeutvecklingen kan ske inom de inledande tre dyggen.

Figur 15 visar resultaten av undersökning utförd av (Bjöntegaard, 2012). Som framgår av resultaten sänker inblandning av flygaska den totala värmeutvecklingen under 7 dygn, men reduktionen är inte anmärkningsvärd när måttliga mängder flygaska blandas in. Det bör noteras att rapportförfattarna har ingen detaljinformation om försöken. Det är inte heller klart hur värmeutvecklingen varit under de inledande dyggen.

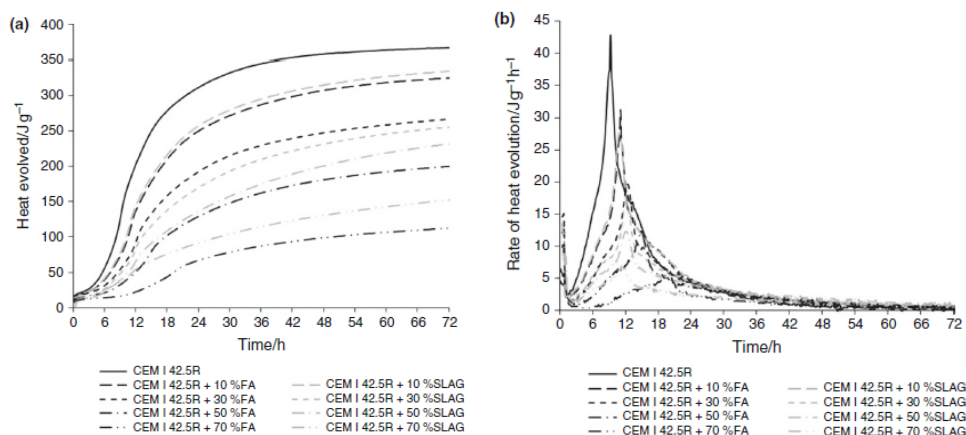


Figur 15: Inverkan av inblandning av flygaska på värmeutveckling efter 7 dygn (Bjöntegaard, 2012).

Cementtypen och typ av puzzolant tillsatsmaterial som används är avgörande. Det är viktigt att skilja mellan cement med låg värmeutveckling och vanligt cement. Den här typen av specifikationer slarvas med i litteraturen. Därför uppstår ofta motstridiga uppgifter om materialens egenskaper.

Figur 16 och Figur 17 visar resultat av undersökning utförd av (Klemczak och Batog, 2016). I undersökningen provades värmeutvecklingen hos bindemedel som bestod av portlandcement blandade med olika mängder flygaska och slagg. Portlandcementet var CEM I 42,5R som innehöll 95,7 % portlandklinker och 4,3 % kalk. Portlandklinkern bestod av 62,8 % C_3S och 14,9 % C_2S . Jämfört med det svenska Anläggningscementet som innehåller 53 % C_3S och 23 % C_2S kan det portlandcement som användes vid undersökningen betraktas som snabbt och med hög värmeutveckling. Flygaskan innehöll 53,25 % SiO_2 , 25,05 % Al_2O_3 , 6,65 % Fe_2O_3 samt 3,86% CaO . Motsvarande värden för slagg var 37,63 %, 6,84 %, 1,48 % samt 45,63%. Vattenbindemedeltal för samtliga blandningar var 0,50. Mängd flygaska och slagg som användes var 10, 30 50 och 70 %.

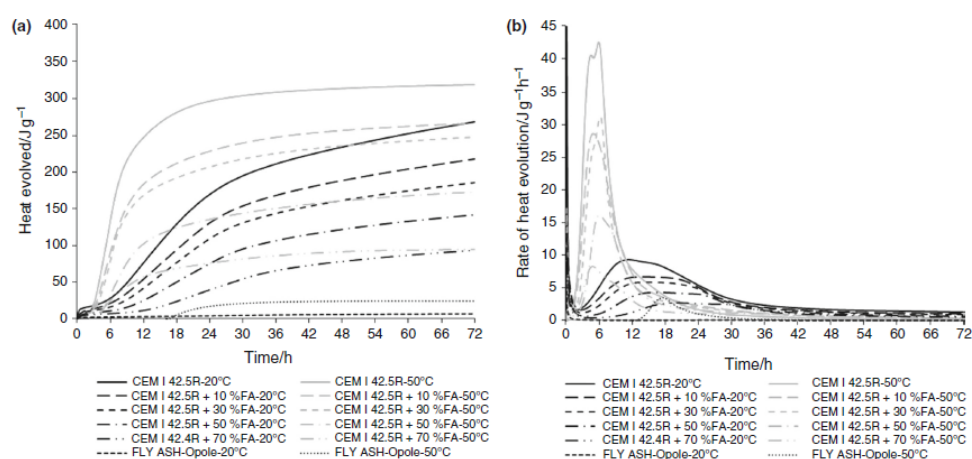
Figur 16 visar resultatet av det semi-adiabatiska provningarna. Som framgår av figuren är värmeutvecklingen hos enbart portlandcement snabbare och större än de övriga blandningarna. Den slutliga värmeutvecklingen efter tre dygn är högst hos blandning med enbart portlandcement. Den totala värmeutvecklingen och värmeutvecklingens hastighet minskar med ökad mängd tillsatsmaterial. Portlandcementets värmeutveckling är högre än det svenska Anläggningscement Degerhamn, vilken visar att det portlandcement som har använts inte är ett cement med reducerad värmeutveckling. Resultatet visar också man bör använda höga andelar flygaska/slagg för att påtagligt kunna minska cementets värmeutveckling.



Figur 16: Resultat av semi-adiabatisk provning: a) Värmeutveckling, b) Värmeutveckling per tidsenhet, för bindemedel med respektive utan flygaska och slagg (Klemczak och Batog, 2016).

Figur 17 visar resultatet av isoterma provningar vid 20 respektive 50 °C, för enbart portlandcement och portlandcement blandat med flygaska. Som framgår av figuren har temperatur stor inverkan på temperaturutvecklingen och dess hastighet. Även vid isoterma förhållanden visar portlandcementet högre och snabbare värmeutveckling än portlandcement med flygaska.

Resultaten i detta avsnitt visar att det finns många faktorer som påverkar värmeutvecklingen och dess hastighet. Det finns för närvarande inte något entydigt svar på vilket sätt inblandning av flygaska påverkar värmeutvecklingen, eftersom processen styrs av ett komplicerat samspel mellan de inblandade materialens kemiska och fysikaliska egenskaper, vatteninnehåll och temperatur.



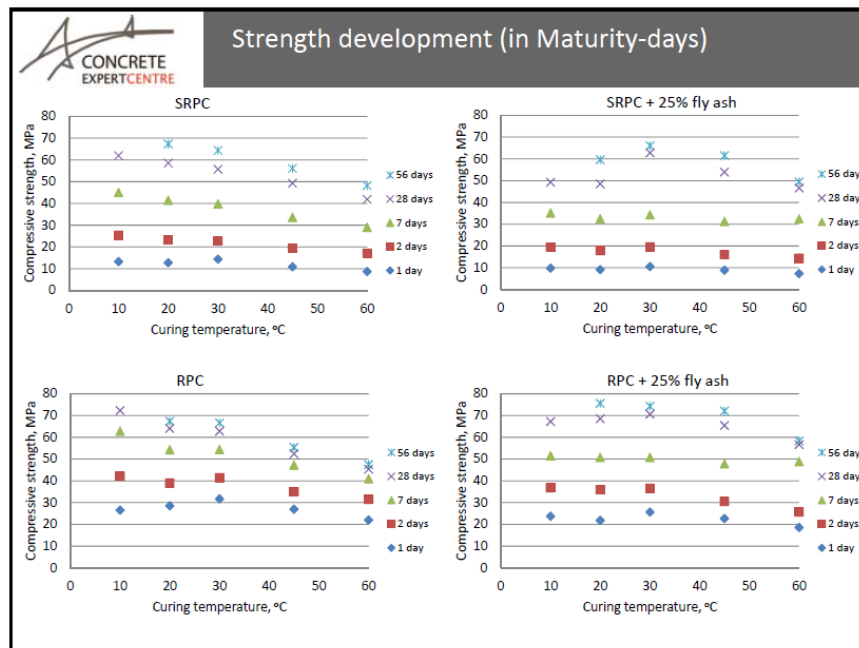
Figur 17: Resultat av isoterma provningar vid 20 och 50 °C: a) värmeutveckling, b) värmeutveckling per tidsenhet, för bindemedel med och utan flygaska (Klemczak och Batog, 2016).

4.4.5 Hållfasthetsutveckling

Betongens hållfasthetsutveckling i tidig ålder, d.v.s. 1-3 dygn efter gjutning, är viktig med avseende på skyddet mot tidig frysning och/eller tidig avformning. För att skydda betongen mot tidig frysning krävs att betongen inte tillåts frysa förrän den har uppnått 5 MPa tryckhållfasthet (Betonghandboken, 1994).

Hållfasthetsnivån har egentligen inget samband med betongens motstånd mot tidig frysning. Den föreskrivna hållfastheten motsvarar en hydratationsgrad och strukturutveckling vid vilken tillräcklig mängd av den färska betongens vatten har förbrukats samt att betongen har uppnått viss täthet att frysning av vatten inte leder till inre skador och tjällyftning. Man bör vara observant när man använder betong innehållande flygaska i kallt klimat. Reaktionerna blir långsammare för betong med flygaska. Figur 18 visar samband mellan tryckhållfasthet och temperatur för betong med olika mognadsgrad. Åldern (dagar) i figuren är beräknade mognadsgrad eller ekvivalent ålder, d.v.s. antal dagar som anges i figuren är inte den faktiska härdningstiden vid olika temperaturer utan de är omräknade till ekvivalent åldern med samband liknande det som framgår av Ekvation 13. Som framgår av figuren råder det inte stor skillnad mellan betong med och utan flygaska när det gäller uppnådd hållfasthet vid 1-2 dagars mognadsgrad. Temperaturen har inte heller någon inverkan på hållfastheten. Däremot, inverkar temperaturen på den tid som krävs för att uppnå den avsedda mognadsgraden. Resultaten visar att vid måttlig inblandning av flygaska påverkas inte sambandet mellan betongens tryckhållfasthet och dess mognadsgrad vid tidig ålder. Man kan följaktligen anta att betong med flygaska med 1 dygns mognadsgrad inte skadas på grund av tidig frysning. Det bör, dock, noteras att resultaten i Figur 18 gäller för härdning vid temperaturer över 10 grader.

Vissa konstruktioner avformas mycket tidigare än 28 dygn. Hållfasthetskraven före formen kan rivas kan t.ex. bestämmas av konstruktören. Den uppnådda tryckhållfastheten i konstruktionen bestäms genom mognadsgrad och tendenskurvor. Som framgår av Figur 18 kan samma tendenskurvor som används för betong med portlandcement, användas för betong som innehåller måttliga mängder flygaska. Men det bör noteras att betong med flygaska tenderar att ha lägre hållfasthet än betong utan flygaska. Vidare, har rapportförfattarna ingen information om hur betongens mognadsgrad har beräknats. Det är möjligt att data som presenteras i Figur 13 har använts.



Figur 18: Samband mellan tryckhållfasthet och temperatur för betong med olika mognadsgrad (Kaasgaard m.fl., 2012).

4.5 HÅRDNADE EGENSKAPER

4.5.1 Mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna utvecklas på ett annat sätt vid ersättning av cement med flygaska. I korthet pekar Löfgren (2017) på att draghållfastheten utvecklas långsammare (negativt p.g.a. att betongen lättare spricker), men att å andra sidan att E-modulen utvecklas långsammare och krypningen större (positivt eftersom betongen är eftergivlig/relaxerande mot uppbyggnad av spänningar) vilket båda delarna påverkar risken för temperaturrelaterad sprickbildning. Återigen beror effekterna av detta på såväl flygaska, andel flygaska i mixen och yttre förhållanden.

Generellt har betong med tillsats av flygaska en långsammare hållfasthetsutveckling men når ofta en högre sluthållfasthet vid tillsatser upp till 20-30%. Eftersom hållfasthetsutvecklingen är mycket temperaturberoende bör man beakta att det inom vattenbyggnad ofta förekommer mycket grova konstruktioner med relativt höga temperaturer inne i betongen. De förhöjda temperaturerna i grova konstruktioner accelererar reaktionshastigheten mer hos flygaskabetong än hos traditionell betong och möjligen genereras mer värme på kortare tid och erhålls en snabbare hållfasthetsutveckling, vilket kan påverka sprickrisken negativt

Figur 19 visar tryckhållfasthetsutveckling hos betong med olika sammansättningar. Samtliga blandningar har samma ekvivalent vattencementtal, se Tabell 4. Samtliga blandningar utom blandning 5, uppvisar ungefär samma hållfasthetsutveckling fram till ca 50 dygn. Det finns dock någon skillnad men saknar praktisk betydelse. Blandning 5 uppvisar lägre tryckhållfasthet än de

övriga. Anledningen är att betongens vattencementtal är högre än de övriga samt att betongens cementmängd är lägre än de övriga betongerna. Den totala bindemedelmängden är 426, 402, 375, 400 och 402,8 kg/m³ för blandning 1-4, 5, 6, 7 och 8. De är relativt höga bindemedelhalter jämfört med vad som är vanligt i vattenkraftskonstruktioner. Det är oklart hur hållfasthetsutvecklingen påverkas när bindemedelmängden minskas.

Tabell 4: Sammansättning hos de undersökta betongblandningarna, (Lindvall, 2011).

Blandning	1-4	5	6	7	8
% flygaska (av CEM I)	20	20	0	0	6
k	0,4	1,0	-	-	0,4
vct	0,49	0,54	0,45	0,45	0,46
v _c /e _{kv}	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cement [kg/m ³] ^{a)}	355	335	375	400	380
Flygaska [kg/m ³] ^{b)}	71,0	67,0	0,0	0,0	22,8
Ballast [kg/m ³]					
Fin (0-4 mm) ^{c)}	424,0	424,1	443,7	431,0	431,8
Fin (0-8 mm) ^{d)}	341,8	341,9	357,6	347,4	348,1
Grov (5-8 mm) ^{e)}	170,3	170,3	178,1	173,1	173,4
Grov (8-16 mm) ^{e)}	766,2	766,3	801,7	778,8	780,2
Vatten [kg/m ³]	172,5	180,9	168,8	180,0	175,1
AEA [kg/m ³] ^{f)}	1,42	1,34	0,38	0,40	0,38
VR [kg/m ³] ^{g)}	1,42	1,34	1,50	1,60	1,52

a) CEM I 42,5 N MH/SR/LA (Anl. Degerhamn).

b) Warnow Füller.

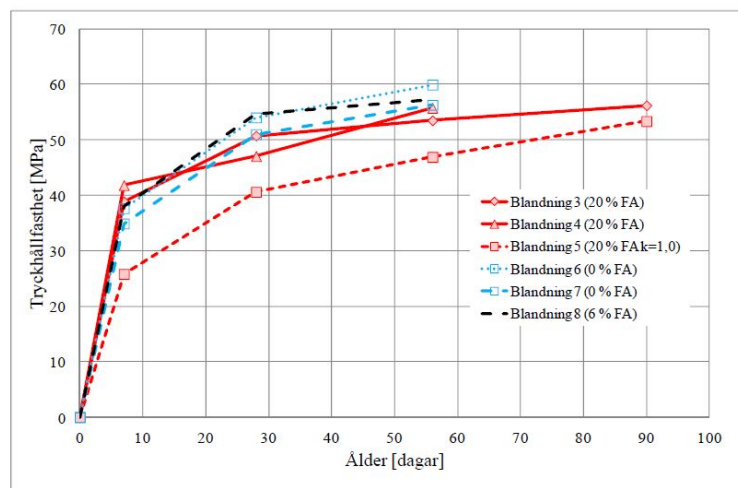
c) Sjösand.

d) Holsand.

e) Tagene kross.

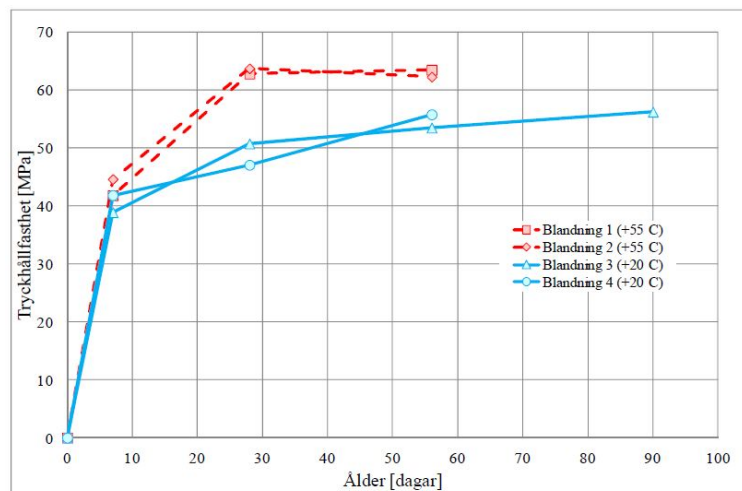
f) SIKA SikaAer-S 1:10

g) SIKA Sikament 56/50



Figur 19: Tryckhållfasthetsutveckling hos betong med olika sammansättningar (Lindvall, 2011).

Figur 20 visar inverkan av härdningstemperatur på betongens tryckhållfasthetsutveckling. Samtliga betonger i figuren har samma mängd bindemedel, flygaska och vatten. Som framgår av figuren påverkar inte temperaturen hållfastheten vid 7 dygn, men påverkar 28 dygnshållfastheten. Hållfasthetsutvecklingen ser ut att avstanna efter 28 dygn när betongen härdas vid 55 °C. Det är inte klarlagt varför temperaturen inte har någon effekt på hållfasthetsutvecklingen fram till 7 dygn.



Figur 20: Inverkan av temperatur på ryckhållfasthetsutveckling hos betong med olika sammansättningar (Lindvall, 2011).

Resultaten visar att man kan räkna med att betong med flygaska kan uppnå samma 28 dygnshållfasthet om man beaktar flygaskans effektivitetsfaktor. Om effektivitetsfaktorn inte beaktas, d.v.s. att man använder effektivitetsfaktor 1 för flygaska, bör man räkna med att betong med flygaska har lägre tryckhållfasthet jämfört med motsvarande betong med enbart portlandcement. Först efter 90 dygn kan man räkna med att betong med effektivitetsfaktor 1 uppnår samma 28 dygns hållfasthet som motsvarande betong med enbart portlandcement.

Vid dimensionering av konstruktioner beaktas betongens krypning och krympning genom anvisningar och regler som anges i normer och standards, t.ex. Eurokod. I normerna styrs formlerna och parametrarna av betongens hållfasthetsklass, d.v.s. betongens tryckhållfasthet vid 28 dygn. Det är inte klarlagt hur inblandning av flygaska påverkar betongens krypning och krympning.

4.5.2 Temperaturrelaterad sprickrisk vid avsvälning

Ofta lyfts argumentet med lägre värmeutveckling fram som positivt vid användning av flygaska som tillsatsmaterial. Här måste man dock klarställa hur man ersatt cement (1:1, enligt k-faktor för beständighet eller enligt k-faktor för hållfasthet) där alla principer ger olika mängd tillsatt flygaska. T.ex. ger ett blandcement, där en andel av portlandcementklinkern har ersatts med flygaska, en reducerad värmeutveckling bara av det faktumet att andelen cementklinker är lägre och att flygaskan inte genererar lika mycket värme/har en retarderande effekt. Vid tillsats av flygaska enligt k-faktorn för beständighet ersätts en del cement med två delar flygaska vilket ger andra förutsättningar för hur flygaskan påverkar värmeutvecklingen (högre än blandcementet). Inverkan på temperaturutvecklingen vid inblandning av flygaska beror också på vilka egenskaper den specifika flygaskan som används har och som tidigare nämnt vid blandcement hur man blandat in flygaskan (tillsats eller malning tillsammans med cementklinker).

4.5.3 Beständighetsaspekter

Som framgår av avsnitt 4.1 så ändras den härnade cementpastans kemiska egenskaper vid inblandning av flygaska. I korthet så sänks pH i betongen, alkalier binds i större omfattning, det finns högre andel kisel och en mindre mängd fri kalciumhydroxid i porlösningen. Andelen kalciumhydroxid i cementpastan minskar eftersom den reagerar med flygaskan och bildar kalciumsilikathydrat som är mindre löslig i vatten. På grund av att det finns mindre kalciumhydrat så minskar risken för urlakning. Det kalcium som finns är hårdare bundet i cementgelen. Dock ökar kalciumhydratens löslighet i vatten med minskad temperatur, vilken är en nackdel i vattenkraftmiljö. Minskad mängd kalciumhydroxid minskar risken för urlakning och risken för erosion vid vattenlinjen. Erosion i vattenlinjen orsakas av samverkan mellan urlakning och frostangrepp. Sett ur rent kemiskt perspektiv skulle dessa förändringar, i olika grad, beroende på hur stor andel flygaska som tillsatts ge följande effekter:

- + Bättre motstånd mot alkalisilikareaktioner (ASR)
- + Bättre urlakningsmotstånd
- Sämre förmåga att självläka
- Ökad risk för armeringskorrosion

Inte oväntat påverkar även andra aspekter vilken beständighet betongen får och den viktigaste är kanske vilken täthet betongen får efter hårdnandet. Täthet och beständighet påverkas bl.a. av härdningsinsatsen efter gjutning där den visar sig viktig för t.ex. vilket motstånd mot karbonatisering som den färdiga betongen med flygaska erhåller (särskilt vid doseringar över 30%). I en sammanställning av Lindvall (2011) visas att karboniseringsdjupet ökar fortare för betong med flygaska än betong med ren portlandcement vid dålig härdning. Dessutom är mängden karboniserbart material (basreserven) mindre p.g.a. den puzzolana reaktionen och därför riskerar sänkningen av pH uppstå snabbare. Detta pekar på vikten av en fullgod och förlängd härdning för betong med flygaska för att nå de omvända, d.v.s. en tätare struktur jämfört med betong med ren portlandcement.

För fullgod frostbeständighet krävs att betongen erhåller en adekvat lufthalt och ett finfördelat porsystem med en avståndsfaktor mellan luftporerna som inte är för stor. Här har som framgår av avsnitt 4.3. mängden restkol stor inverkan och måste hanteras för att uppnå önskat luftporsystem. Lindvall (2011) redovisar provningar som stärker uppfattningen om att det är luftporsystemets kvalitet som i första hand ger frostbeständigheten. Med hög kvalitet på luftporsystemet ger tillsatser av flygaska upp till ca. 25%en likvärdig frostbeständighet så länge som ersättningen sker med stöd i effektivitetsfaktorer.

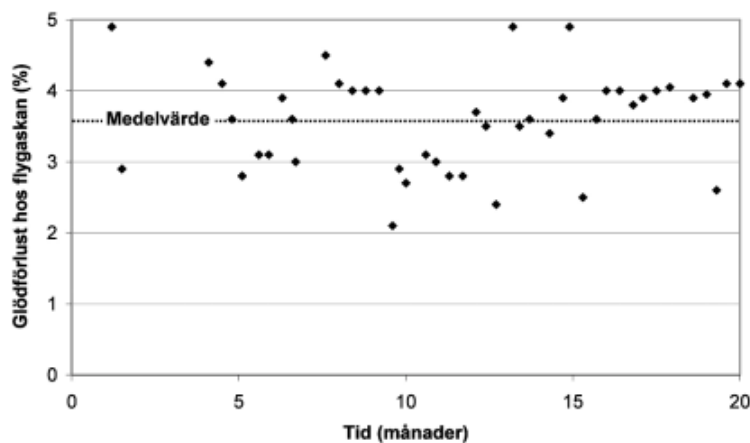
5 Erfarenheter från användning

I föreliggande avsnitt redovisas en sammanställning över några erfarenheter som finns dokumenterade från användning av flygaska för betongtillverkning av konstruktionsbetong. Särskilt fokus har lagts på långtidserfarenheter.

5.1 SVERIGE

I början på 1980-talet ändrades cementbestämmelserna och 1982 öppnades möjligheten att blanda in bl.a. flygaska i betong genom de nya cementklasserna "modifierat portlandcement, M" och "blandcement, B" enl. Fagerlund (2010). I de nya bestämmelserna tydliggjordes att det för flygaska endast var aktuellt med "reaktiv flygaska från stenkolsförbränning". Cementa började vid den här tiden producera ett modifierat portlandcement (Std M) med iblandning av 23% flygaska. Flygaskan hade sitt ursprung i värmekraftverket i Västerås (Fagerlund, 2010b). 2004 introduceras regler för hur bedömning av användbarheten av "icke beprövade cementtyper" ska göras, och där omfattande laboratorieprovningar krävs vilket Fagerlund (2010) menar t.ex. flygaskacementet inte har utsatts för. Vidare tilläts även användning av flygaskacement (CEM II/A-V) i sträng frostmiljö med salt trots att erfarenheten visar att stora lufthaltsvariationer kan uppstå p.g.a. varierande halt oförbränt material i cementet. Det i sin tur kan äventyra frostbeständigheten menar Fagerlund (2010).

Vid en nordisk workshop i Oslo 2012, under titeln "Durability aspects of fly ash and slag in concrete" hölls en mängd föredrag och däribland ett av Ljungkrantz (2012). I föredraget nämns erfarenheterna från användning av flygaskacement i början på 80-talet. Anledningen till att produktionen av flygaskacementet stoppades var problemen med luftporsystemet och frostbeständigheten. En godkänd flygaska i kategori A med avseende på maximal glödförlust/halt restkol enl. SS-EN 450-1:2012 får ha en halt av maximalt 5%. I Figur 21 nedan redovisas ett exempel på restkolhalten i en kolflygaska från den tiden.



Figur 21: Tjugomånadersvariation av glödförlust hos flygaska. Fagerlund (1983).

I början av 1980-talet placerade Cementa Research ut betongväggar med flygaskacementet Skövde Std M (24 procent flygaska) på fältprovningsplatsen Smöjen (Gotland) i regnutsatt miljö. En jämförelse mellan provkroppar innehållande Byggcement visar att karbonatiseringsdjupet är dryga 20% större för flygaskacementet efter 10 års exponering (Cementa, 2017). Totala karbonatiseringsnivån är dock begränsad.

Tyvärr har det inte gått att få fram information om några exempel på konstruktioner som tillverkades med användning av Std M-cementet. Möjligen kan det inom försvarsmakten finnas grövre konstruktioner där det provats.

5.2 NORGE

I Norge har cement med flygaska använts under flera decennier och en av förklaringarna är att man inte haft något rent portland anläggningscement med begränsad värmeutveckling. Generellt finns dock begränsat med dokumenterade erfarenheter med fokus på användningen av flygaska jämfört konstruktioner utan flygaska inom dammbyggnad. Två exempel på dammkonstruktioner som byggts med flygaskacement lite längre tillbaka är Førevassdammen (1989) och Altadammen (1987) där det för den senare inte funnits något tillgängligt material för studien.



Figur 22: Førevassdammen 2016, Norge. (<http://www.xn--nnas-poa.no/wp-content/uploads/2016/09/DSC4724-2736x1530.jpg>)

Førevassdammen består av en 95 m hög dubbelkrökt valvdamm som är ca. 180 m lång omgiven av massivdammar av betong på båda sidorna till en total dammlängd av 1200 m. I basen är dammen som tjockast ca. 15 m bred. Valvdammsdelen av anläggningen ses i Figur 22. Dammkroppen är uppbyggd av två olika betongkvaliteter med en mer högvärdig och frostbeständig ytbetong (ca.

1,5-2 m tjock) och en innerbetong av något lägre kvalitet utan krav på frostbeständighet. I Tabell 5 framgår några av egenskapsskillnaderna. Vid betongtillverkningen användes ett flygskacement med begränsad värmeutveckling. Flygskahalten i cementet var 25% och utöver det så ersattes också ca 10% av den rena cementmängden med silika (ökade efter hand). Notervärt, vilket framgår av tabellen är att man använde ett stort stenmax. (50 mm i ytbetong och 100 mm i bulkbetongen) vilket möjliggjorde användning av mycket låga cementmängder. För att minimera risken för temperaturrelaterad sprickbildning begränsades gjuttemperaturen på den färska betongen till 12°C och det blev möjligt genom inblandning av is som del av blandningsvattnet. I de inre delarna av dammen fanns också kylrör för att kyla betongen. Konsistensen på betongen var mycket styv, vilket också kan ses i Figur 23 nedan.



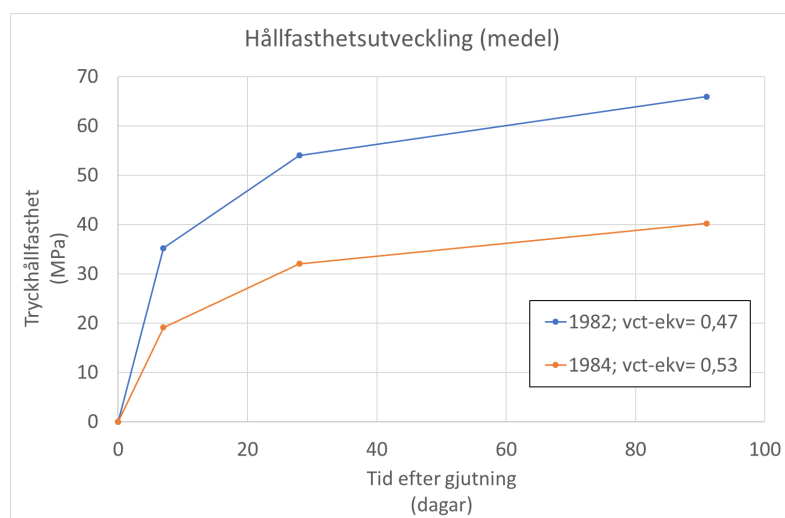
Figur 23: Førevassdammen, 1986. Norge. (www.ulla-forre.no)

Tabell 5: Krav på betongsammansättning för Førevassdammen, Norge (Tjugen, 1984).

	Ytterbetong	Innerbetong
Hållfasthetskrav vid 28 dygn (MPa)	30	25
Vattenbindemedelstal	<0,55	<0,65
Cement + Silika (kg/m ³)	<250	<200

I en statusrapport "Førrevassdammen. Status desember 1996" (1996) så ges en detaljerad beskrivning av hur arbetena skred fram under de 5 år som bygget pågick. Justeringar av cement- och silikamängd samt byte av cement (Norskt, Polskt och Svenskt) gjordes av olika skäl. Om man gör en omräkning till vilket ekvivalent vattencementtal som användes t.ex. -82 och -84 så är de 0,47 resp. 0,53 för ytterbetongen och 0,60 resp. 0,69 för innerbetongen alltså relativt stora förändringar med tiden. För innerbetongen är det också över kravnivån under -84. En av anledningarna var att det trots åtgärderna med stor stenstorlek, låg cementhalt, låg gjuttemperatur och kylrör uppstod en del sprickbildning, särskilt vid gjutning mot berg vid överfallsutskoven. Man fick också en "onödig" överhållfasthet (se Figur 24). Det noterades också att man fick en högre variationskoefficient för tryckhållfasthet vid användning av det polska cementet (22,5% under ett år) jämfört med det Norska cementet (15-20% under de tre första åren).

En del läckage uppstod under dämningssupptagningen och de uppstod främst i första gjutetappen mot berg, i horisontella gjutfogar och krympsprickor vilka injekterades med epoxi och polyuretan i takt med att läckagen upptäcktes. I Figur 22 är det tydligt att det även idag finns en del läckage i framförallt horisontella fogar.



Figur 24: Førrevassdammen, medelhållfasthetsutveckling i ytterbetong 1982 och 1984. (Førrevassdammen. Status desember 1996)

När det gäller generella erfarenheter från användning av cement med flygaska med kopplingar till risken för variationer i lufthalt har det enligt Molle (2017) utvecklats praxis och erfarenhet i att hantera och justera halten luftporbildande medel för att säkerställa god frostbeständighet.

5.3 FINLAND

I Finland verkar användningen av flygaska vara begränsad inom tyngre anläggningskonstruktioner med höga krav på långa livslängder och inom vattenbyggnad. Flygaska kan dock användas i mindre exponerade konstruktioner

som t.ex. fundament e.d. där man ibland använder en mix med 15-25% flygaska. Anledningen till den begränsade användningen för bl.a. vattenbyggnad är ojämn kvalitet på den inhemska flygaskan. Variationerna i restkol- och alkalihalter anges av Paukku (2017) som en av huvudanledningarna. Däremot är användningen av slagg betydligt vanligare i konstruktioner med höga beständighetskrav.

5.4 ÖVRIGT INTERNATIONELLT

I en artikel av Butler och Baweja (1987) redovisas en tillbakablick på några av de tidigaste konstruktionerna där flygaska använts vid betongtillverkningen. Två exempel på dammkonstruktioner från Storbritannien och USA redovisas. Clatworthy Dam var en 31,7 m hög klumpdamm som byggdes under perioden 1957 till 1960 med två typer av flygaskabetong, men med ca. 30% ersättning av cementet i båda. Det framgår inte vilket vct man hade, men ytbetongen hade en hållfasthet vid 28 dygn som motsvarade 19 MPa och bulkbetongen invändigt hade 15,5 MPa. Alltså relativt låghållfast betong. Relativt omfattande urlakning främst i anslutning till undermåliga rörelsefogar kunde ses inne i inspektionsgalleriet. Generellt menar dock Butler och Baweja (1987) att dammen uppvisar likvärdig prestanda som en damm från samma tid med traditionell betong.



Figur 25: Clatworthy Dam, UK. (<https://hiveminer.com/Tags/clatworthy%2Cphoto>)



Figur 26: Hartwell Dam, USA. (<https://hiveminer.com/Tags/savannahriver,us>)

För Hartwell Dam, USA som också är en klumpdamm byggd under perioden 1955 till 1962, men är 62 m hög, redovisar Butler och Baweja (1987) inga mätbara resultat från byggtiden utan mer övergripande erfarenheter. Högre hållfasthet än jämförbar standardmix efter ett år, lägre vattenbehov och mindre separation i färskt tillstånd är några av de positiva egenskaperna vid ersättning av cement med flygaska. Däremot rapporteras ett behov av högre tillsats av luftporbildande medel vid användning av flygaska. Vid syn efter 30 års användning rapporteras vanliga skador på dammar med den åldern, men möjligen med högre andel mönsteruppsprickning vilket sannolikt kopplar till att det högre behovet av fullgod härdning inte uppnåts. Även för denna damm ses utfällningar från sprickor och fogar i inspektionsgalleriet.

6 Utrednings och utvecklingsbehov

Under utredningens gång har det blivit tydligt att det finns många aspekter som påverkar effekten från inblandning av flygaska i betong. Skillnader i flygaskans materialegenskaper, användningssätt (blandcement/cementersättning), proportioneringsteknik/ersättningsprincip, klimatförhållanden m.m. påverkar alla flera av betongens slutgiltiga egenskaper. Det gör också att det är svårt att uttala sig entydigt om vilka för- och nackdelar som användning av flygaska i vattenbyggnadsbetong kan ge. Några av de områden som kräver vidare utredning eller klarlägganden är:

- För befintligt anläggningscement FA vore det av intresse att få tillgång till, alt. klarställa, dess temperaturkänslighet presenterat som (β_T) kurvor och tendenskurvor. Generellt bör också bättre underlag utvecklas för vilken effekt flygaskor kan ge på temperaturutvecklingen vid cementersättning enligt olika principer. Utredning av flygaskors inverkan på de tidigaste egenskaperna vid låga temperaturer och effekten av olika vanligen förekommande tillsatsmedel rekommenderas vidare. Framst flygaskor som är aktuella för svenska förhållanden bör studeras.
- Hur ska jämn restkolhalt garanteras även om man klarar kravet på maximalt 5% restkol. Det var framförallt detta som orsakade problemen på 1980-talet. Annars risk för olika typer av frostnedbrytning om inte ett väl fördelat luftporsystem går att skapa i betongen. Å ena sidan en fråga som baseras i vad som kan erhållas från leverantörer av flygaska och blandcement, och å andra sidan vilken kontrollapparat och beredskap som finns för att hantera ojämna halter vid betongtillverkning och vid mottagningskontroll på arbetsplatsen.
- Följa upp de konstruktioner som gjöts i början på 80-talet för att se hur de klarat sig ur beständighetssynpunkt (t.ex. Førrevassdammen). Det rekommenderas också att leta fram fler exempel som mer liknar den typ av betongkonstruktioner som är aktuella idag och är väldokumenterade. Uppföljning av sprickfrekvens (temperaturrelaterad), hållfasthetsutveckling, täthet, karbonatiseringsgrad, urlakningsmotstånd etc. är saker som skulle vara av intresse.
- Av miljöskäl finns en strävan mot att minska inslaget av fossila bränslen för el- och värmeproduktion till förmån för klimatvänligare alternativ. Därför bör den framtida tillgången på flygaska bedömas för att klarställa om möjligen andra alternativa tillsatsmaterial är en mer långsiktigt framkomlig väg.

7 Referenser

Anläggnings-AMA (2017). *The history of calcareous cements*. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th edition.

Blezard, R.G. (2001). *The history of calcareous cements*. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th edition.

Betonghandbok Material, Redaktionsgruppen (1994). *Ung betong*. Kap. 9, Betonghandbok Material Del I. Svensk Byggtjänst, Stockholm. www.byggtjanst.se.

Bjontegaard, Ö. (2012). *Low-heat concrete with fly-ash in massive infrastructures – Experiences from Norway on hardening phase crack sensitivity*. In presentations from a Nordic workshop on Durability aspects of fly ash and slag in concrete. Satens vegvesens rapporter Nr. 149.

Butler, Ö & Baweja. (1987). *Long-term durability of fly ash concretes in civil engineering structures*. ACI Special publication SP 100-30.

Byfors, J. (1980). *Plain concrete at early ages*. CBI FO 2:80, Stockholm.

Cementa. (2017). *Bascement – Teknisk beskrivning*. Produktblad nedladdat från www.cementa.se.

Fagerlund, G. (1983). *Betong med flygaska*. Ingår i "Kiselstoff och flygaska", Cement och Betonginstitutet, kursverksamheten.

Fagerlund, G. (1987). *Samband mellan porositet och hållfasthet hos cementbundna material*. Kompendium i Byggnadsmaterial FK (1995), Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Lund.

Fagerlund, G. (2010). *Betongkonstruktioners beständighet: En genomgång av officiella svenska regler 1926-2010*. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, rapport TVBM- 3153.

Fagerlund, G. (2010b). *Mineraliska tillsatsmaterial i cement*. Bygg & teknik, nr 7/10.

Fagerlund, G. (2017). *Struktur och strukturutveckling*. Kap. 10, Betonghandbok Material Del I. Svensk Byggtjänst, Stockholm. www.byggtjanst.se.

Førrevassdammen – Status desember 1996. Statkraft.

Gårdman, L. & al. (2003). *UCOR – Utilization of residues from biomass co-combustion in pulverized coal boilers – Final report*. Vattenfall Utveckling AB, rapport U 03:67.

Hassanzadeh, M. (1998). *Säkerhet vid Betongarbete – Utveckling av bärförmåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder*. SP Rapport 1998:08, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Byggnadsteknik.

ICOLD (2014). *Selection of materials for concrete in dams*. Committee on concrete dams, bulletin 165.

Jo, BW & al. (2014). *Effectiveness of the top-down nanotechnology in the production of ultrafine cement (~220 nm)*. Journal of nanomaterials, article ID 131627.

Johansson, S-E. (2017). *Cement*. Kap. 2, Betonghandbok Material Del I. Svensk Byggtjänst, Stockholm. www.byggtjanst.se.

Jonasson, J-E. (2017). *Tidig egenskapstillväxt och hårdnande betong*. Kap. 9.5, Betonghandbok Material Del I. Svensk Byggtjänst, Stockholm. www.byggtjanst.se.

Kaasgaard, M., Pade, C. & Nielsen, E. (2012). *Influence of curing temperature on development of compressive strength and resistance of chloride ingress of concrete with different binder systems*. In presentations from a Nordic workshop on Durability aspects of fly ash and slag in concrete. Statens vegvesens rapporter Nr. 149.

Klemczak, B., Batog, M. (2016). *Heat of hydration of low-clinker cement – Part I. Semi-adiabatic and isothermal tests at different temperatures*. J Therm Anal Calorim (2016) 123:1351-1360.

Kristiansen, B. (2017). Personlig kommunikation.

Lindvall, A. (2011). *Beständighetsaspekter hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska*. SBUF-projekt 12382.

Ljungkrantz, C. (2012). *Choice of binder in severe exposure classes – Swedish experiences and guidelines*. Nordic seminar on durability aspects of fly ash and slag in concrete, Statens vegvesen, rapport nr. 149.

Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011). *Supplementary cementitious materials*. Cement and Concrete Research 41 (2011) 1244-1256.

Löfgren, I. (2017). *Tillsatsmaterial*. Betonghandbok Material, Del 1. Kap. 6. AB Svensk Byggtjänst.

Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*. 5:e utgåvan. Pearson Education Limited.

Neville, A.M. (2008). *Properties of Concrete*. Forth Edition. Pearson Education Limited, England.

Nordström, E. & Thorsell, P-E. (2003). *Energiaskor i betongrelaterade tillämpningar – Normer, praxis och erfarenheter*. Miljöriktig användning av askor. Rapport 828.

Pauku, E. (2017). Personlig kommunikation.

Snellings, R., Mertens, G. & Elsen, J. (2012). *Supplementary Cementitious Materials*. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 74 pp. 211-278, 2012, Mineralogical Society of America.

Spence, R.J.S. & Cook, D.J. (1983). *Building Materials in Developing Countries*. Wiley and Sons. London.

SS-EN 13263-1:2005+A1:2009 (2009). *Silikastoft till betong – Del 1: Definitioner, krav samt kriterier för överensstämmelse*. Svensk Standard, SIS.

SS-EN 13263-2:2005+A1:2009 (2009). *Silikastoft till betong – Del 2: Utvärdering av överensstämmelse*. Svensk Standard, SIS.

SS 137003:2015 (2015). *Betong – Användning av EN 206 i Sverige*. Svensk Standard, SIS.

SS 137244:2005 (2005). *Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagnig vid frysning*. Svensk Standard, SIS.

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

SS-EN 450-1:2012 (2012). *Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse*. Svensk Standard, SIS.

Taylor H F W. (1990). *Cement Chemistry*. Academic Press Limited.

Tjugen, K. (1984). *The Førrevatn Dam – Double-Curved Arch Dam*. International Hydro Power Conference on Materials for dams, Monaco.

INBLANDNING AV FLYGASKA I VATTENBYGGNADSBETONG

Internationellt används inblandning av flygaskor från kolpulverförbränning vid betongtillverkning, framförallt för att sänka betongen miljöpåverkan och minska koldioxidbidraget. I Norge har flygaska använts en längre tid i vattenkraftsindustrin. Det har dels handlat om att det innebär positiva miljöeffekter, dels för att askan bidrar till en lägre temperaturutveckling och därmed en minskad risk för sprickor.

Rapporten redovisar de potentiella för- och nackdelarna med att använda flygaska i vattenbyggnadsbetong i svenska förhållanden. Resultaten visar att egenskaperna hos den specifika flygaskan tillsammans med principen för cementersättning, klimatförhållanden med mera, kan påverka betongens slutgiltiga egenskaper och beständighet. Det är därför svårt att entydigt ange vilka för- och nackdelar som användning av flygaska i vattenbyggnadsbetong kan ge.

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