



# LUND UNIVERSITY

## Mineraliska tillsatsmedel i cement

Fagerlund, Göran

*Published in:*  
Bygg & teknik

2010

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*  
Fagerlund, G. (2010). Mineraliska tillsatsmedel i cement. *Bygg & teknik*, 23-29.

*Total number of authors:*  
1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:  
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# Mineraliska tillsatsmaterial i cement

En alltmer vanlig metod att minska energiförbrukning och koldioxidutsläpp vid cementtillverkning är att blanda ut cementklinkern som produceras i cementugn med någon typ av mer eller mindre reaktivt restmaterial (tillsatsmaterial). Vanliga restmaterial är:

- Mald granulerad masugnsslagg, ett restmaterial från tillverkning av tackjärn i masugn
- Flygaska, ett restmaterial från koleldning i värmekraftverk
- Silikastoft ett restmaterial från tillverkning av metallisk kisel eller kiseljärn

Dessutom finns sedan ett antal år ett ökande intresse av att mala in större mängd kalksten i cement. Kalksten måste anses vara ett i stort sett icke-reaktivt material.

Artikeln beskriver kortfattat egenskaper hos olika tillsatsmaterial. Inverkan på beständigheten hos betong diskuteras. Det visas att tillsatsmaterial använda i cement kan medföra beständighetsproblem, vilket man inte tar hänsyn till i dagens betongregler.

## Tillsatsmaterial i betong och i cement

Artikeln behandlar enbart tillsatsmaterial inblandade i *cement*. Enligt nuvarande betongstandard får flygaska, slagg och silikastoft även blandas in direkt i *betong*. Detta användningssätt behandlas inte. Följande märklighet i detta sammanhang vilken sammanhänger med restmaterialet inverkan på betongens beständighet kan dock poängteras.

När tillsatsmaterial blandas in i *betong* tillförs det en *effektivitetsfaktor* vilken reglerar hur stor mängd portlandcement de anses ersätta vid beräkning av betongens vattenbindemedeltal, vilket är avgörande för betongens beständighet. Flygas-

ka tillförs enligt gällande betongstandard normalt en effektivitetsfaktor av 0,4, vilket innebär att 100 kg flygaska endast anses motsvara 40 kg portlandcement. För slagg är faktorn 0,6, medan den är 2 för silikastoft. Kalkmjöl anses ha effektivitetsfaktor noll, vilket är rimligt eftersom materialet förmodligen är icke-reaktivt. Dessa effektivitetsfaktorer tycks baseras på tillsatsmaterialens förmåga att skapa hållfasthet hos betong. De baseras, vad man kan förstå, inte på materialens förmåga att skapa beständighet.

När dessa material däremot blandas in i *cement* är effektivitetsfaktorn 1 för alla material, det vill säga även för kalkmjöl. Kalkmjöl, flygaska och slagg gynnas alltså kraftigt vid inblandning i cement medan silikastoft missgynnas. Motivet till denna ologiska skillnad i synsätt på tillsatsmaterialen är oklar och har aldrig dokumenterats med forskningsresultat.

## Portlandcement

Det traditionella cementet i svensk betong har under lång tid varit portlandcement. Först under senare år har portlandcementet fått vika för andra cementtyper. Portlandcement tillverkas i cementugn genom sammansintring vid hög temperatur av kalksten och kisel- järn- och aluminiumhaltiga mineral, till exempel lera. Vid sintringen bildas olika kalciumhaltiga kemiska föreningar varav de viktigaste är två kalciumsilikater:

- di-kalciumsilikat ( $2CaO \cdot SiO_2$ ). Benämns vanligen  $C_2S$
- tri-kalciumsilikat ( $3CaO \cdot SiO_2$ ). Benämns vanligen  $C_3S$

Dessutom bildas mindre mängder aluminium- och järnhaltiga föreningar. Det är dock främst kalciumsilikaterna som ger betongens dess hållfasthet, täthet och beständighet.

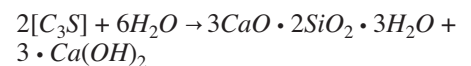
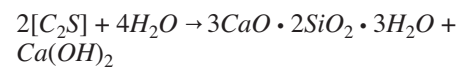
Vid malning av cementklinkern som bildas i cementugnen har man alltid tillåtit att en mindre mängd gips mals in. Gipsen behövs för att styra cementets bindning. Tillåten gipsinblandning uttryckt som  $SO_3$  var 2,5 procent ända fram till år 1960 när mängden ökade till 3,5 procent. Från 1982 tilläts 4,0 procent.

Under lång tid har man även tillåtit att små mängder inert material, normalt kalkstensmjöl, mals in i portlandcement. Dessa så kallade ”för särskilda ändamål gjorda tillsatser” var ursprungligen högst tre procent men ökades år 1982 till maximalt fem procent. Orsaken till inmalning av kalksten är troligen främst att man därmed kan minska behovet av bränd cementklinker

och därmed förbilliga cementproduktionen. Så små mängder som tre till fem procent har dessutom inte ansetts vara negativa när det gäller betongens beständighet, vilket möjligen kan diskuteras. Det kan nämnas att det viktigaste svenska cementet för avancerade anläggningskonstruktioner, ”Anläggningscementet”, saknade inmald kalksten fram till förra året. Därefter har även detta framgångsrika cement försetts med inmald kalksten.

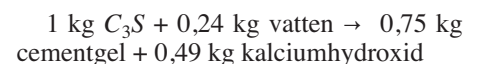
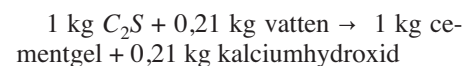
Den minsta mängden bränd cementklinker i portlandcement har alltså varierat mellan cirka 92 procent under perioden fram till 1982 och cirka 88 procent därefter. Den verkliga mängden klinker har dock varit något högre i vissa cementtyper, till exempel anläggningscementet och snabbcementet.

När portlandcement blandas med vatten sker olika kemiska reaktioner. Den viktigaste är den som sker mellan kalciumsilikater och vatten. Reaktionsprodukterna är så kallade *cementgel* och *kalciumhydroxid*:



Cemengelen ( $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ ) är en extremt finkornig massa med cirka 28 volymprocent porositet. Partikelstorleken är enbart cirka 30 Å och porstorleken cirka 15 Å. Det är denna struktur som motiverar namnet ”gel” (fast gel). Det är cementgelen som ger betongens dess hållfasthet, täthet och beständighet.

Som framgår av formlerna skapar  $C_3S$  större mängd kalciumhydroxid ( $Ca(OH)_2$ ) än  $C_2S$ . Det innebär att 1 kg  $C_3S$  skapar mindre mängd cementgel än 1 kg  $C_2S$ . Översiktligt gäller följande viktförhållanden:



Eftersom kalciumhydroxiden inte har någon avgörande lastbärande eller täthetsskapande funktion skulle det alltså teoretiskt sett vara fördelaktigt att ha så stor andel  $C_2S$  som möjligt i cementet. Det är emellertid omöjligt av praktiska skäl att ha hög mängd  $C_2S$  eftersom detta mineral reagerar mycket långsamt. Därför har moderna portlandcement betydligt större andel  $C_3S$ . För svensk portlandcementklinker är viktförhållandet  $C_3S/C_2S$

Artikelförfattare är  
**Göran Fagerlund**,  
Avdelningen  
byggnadsmaterial,  
Lunds tekniska  
högskola (LTH).



cirka 0,6/0,2, det vill säga det är cirka tre gånger så mycket  $C_3S$ . För normal svensk portlandcementklinker utvecklas cirka 0,3 kg kalciumhydroxid av 1 kg cement som reagerat fullständigt.

Även om inte kalciumhydroxiden har någon betydelse för betongens hållfasthet har den avgörande betydelse för möjligheten att använda mineraliska tillsatsmaterial, som flygaska, slagg och silikastoft eftersom den reagerar med dessa material.

De aluminium- och järnhaltiga föreningarna i portlandcement, cirka tjugo viktprocent av cementklinkern, har ingen större betydelse för betongens hållfasthet. Däremot påverkar de betongens beständighet. Påverkan beror på mängden av föreningarna och kan vara såväl positiv (till exempel binder kloridjoner) som negativ (till exempel ger hög värmeutveckling, sänker sulfatresistensen).

När portlandcement hårdnar utvecklas värme, vilket är en positiv egenskap vintertid eftersom den möjliggör betonggjutning i kallt väder, men som är negativt när det gäller risken för sprickbildning som kan uppstå när betongen svalnar under de första dyggen efter gjutning. Värmeutvecklingen kan minskas genom att cementets kemiska sammansättning modifieras (högre andel  $C_2S$ , mindre andel aluminatföreningar, lägre alkalihalt) och/eller genom att cementet mals mindre fint.

Som framgår av beskrivningen ovan är inte alla portlandcement identiska. Det finns stora variationsmöjligheter till exempel när det gäller hållfasthetsutveckling, kemisk resistens och värmeutveckling. Vad som är lika är emellertid den grundläggande struktur som utvecklas, nämligen en stor mängd finporös, tät cementgel och en avsevärd mängd kalciumhydroxid.

## Koldioxidutsläpp vid cementtillverkning

Cementbränning sker vid mycket hög temperatur och är energikrävande. Oftast eldas ugnen med olika typer av fossila bränslen. Trenden är dock att en allt större andel av bränslet utgörs av olika typer av brännbara avfall såsom färg- och lösningsmedelsrester, gummidäck etcetera. Oavsett typ av bränsle ger förbränningen utsläpp av koldioxid.

Dessutom utvecklas avsevärda koldioxidmängder när kalkstenen "kalcineras" i ugnen, det vill säga bryts ned till kalciumoxid:



1 kg kalksten skapar 0,44 kg koldioxid. För att bränna 1 ton normal cementklinker åtgår cirka 1,2 ton kalksten, det vill säga koldioxidproduktionen enbart av kalcineringen är cirka 520 kg per ton klinker, vilket motsvarar cirka 460 kg per ton cement när detta innehåller fem procent kalkstensmjöl. Detta är ett utsläpp som

Tabell 1: Klassificering av olika tillsatsmaterial

|  |   |
|--|---|
| <b>Hydrauliskt</b><br>Reagerar spontant med vatten                   | <b>Portlandcement</b><br>Spec yta 300–500 m <sup>2</sup> /g<br>Kristallint<br>CaO/SiO <sub>2</sub> ≈ 3<br>SiO <sub>2</sub> ≈ 20 %   |
| <b>Latent hydrauliskt</b><br>Måste aktiveras, till exempel av cement | <b>Granulerad masugnsslagg</b><br>Spec yta 300–500 m <sup>2</sup> /g<br>Glasigt<br>CaO/SiO <sub>2</sub> ≈ 1<br>SiO <sub>2</sub> ≈ 35 à 40 %   |
| <b>Puzzolanskt</b><br>Kalk, till exempel från cement måste tillföras | <b>Flygaska</b><br>Spec yta 300–500 m <sup>2</sup> /g<br>Glasigt<br>CaO/SiO <sub>2</sub> ≈ 0<br>SiO <sub>2</sub> ≈ 50 à 60 %<br><b>Silikastoft</b><br>Spec. yta cirka 20 000 m <sup>2</sup> /g<br>Glasigt<br>CaO/SiO <sub>2</sub> ≈ 0<br>SiO <sub>2</sub> ≈ 85 à 95 % |
| <b>Icke-reaktivt</b>   | <b>Kalkstensmjöl</b><br>Spec yta >300 m <sup>2</sup> /g<br>Kristallint<br>SiO <sub>2</sub> = 0 %  |

inte kan undvikas. Däremot kan utsläppet från bränslet möjligen kunna reduceras något genom effektivare brännprocess. Totalt utsänds cirka 800 kg koldioxid per ton cement, Gillberg (1999).

## Reaktivitet hos mineraliska tillsatsmaterial

Som nämnts, är en metod att minska energiförbrukning och koldioxidutsläpp vid cementtillverkning att dryga ut cementet med någon typ av tillsatsmaterial i samband med cementmalningen.

Tillsatsmaterialen kan indelas efter sin reaktivitet. Denna beror på tre faktorer:

1. *Kalciumhalten*. Ju högre kalciumhalt, desto högre reaktivitet. (Gäller inte kalkstensmjöl eftersom detta är kristallint och

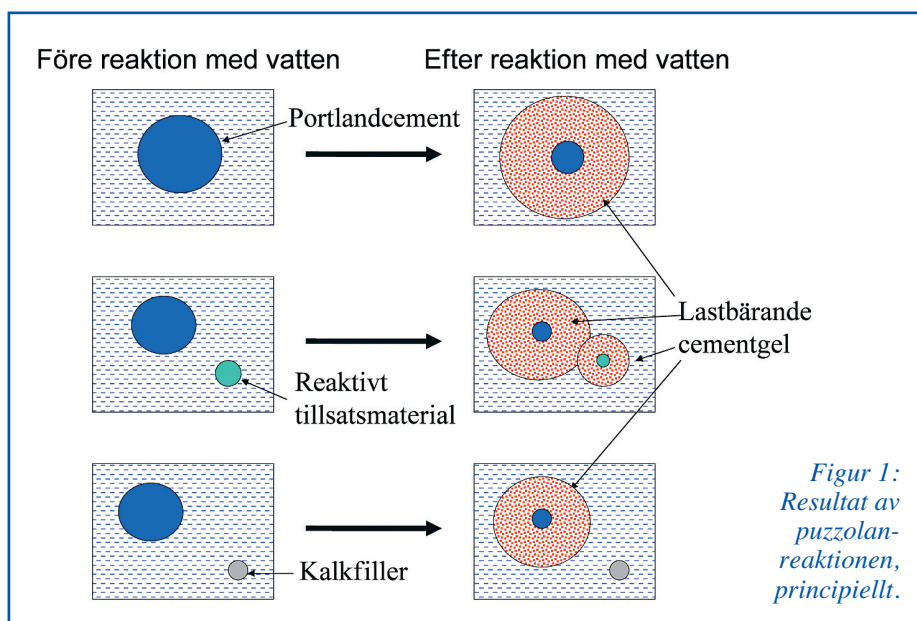
saknar reaktivitet)

2. *Finheten*. Ju finare desto högre reaktivitet

3. *Glashalten*, ju högre glashalt desto högre reaktivitet

Inget tillsatsmaterial reagerar spontant utan kräver att det aktiveras av portlandklinkern. Ett schema över egenskaper hos portlandcement och olika tillsatsmaterial ges i tabell 1.

Slagg och puzzolaner, vilka i sig själva saknar spontan reaktivitet, reagerar när de är inblandade i cementet med den kalciumhydroxid som avspjälkats av portlandcementet. Detta innebär att "inaktiv" kalciumhydroxid konverteras till cementgel. Principen visas i figur 1. Reaktionen kan förenklat skrivas:



Figur 1: Resultat av puzzolanreaktionen, principiellt.



Reaktion 1: portlandcement + vatten → cementgel + kalciumhydroxid

Reaktion 2: kalciumhydroxid + SiO<sub>2</sub> från restmaterial → cementgel

Den totala mängden cementgel kan trots att kalciumhydroxid konverteras till gel, bli mindre än vad den blivit om enbart portlandcement använts, vilket kan visas med följande förenklade exempel, som gäller för en blandning av cement och vatten ("cementpasta") med 80 procent hydratationsgrad hos portlandcementet (det vill säga 80 procent av portlandcementet har reagerat).

● **Rent portlandcement:**

Volymen cementgel är  $0,57 \cdot PC$  (liter), där PC är vikten portlandcement i blandningen (kg). Utgångspunkten är att 1 kg cementgel har volymen 0,71 liter, se formler i Fagerlund (1994).

● **Cement med 25 viktprocent flygaska räknat på portlandandelen. SiO<sub>2</sub>-halten 50 procent. Reaktionsgraden hos askan antas vara 40 procent:**

Volymen cementgel från portlandcementet är  $0,75 \cdot 0,57 \cdot PC = 0,43 \cdot PC$ .

Volymen cementgel från puzzolanreaktionen är cirka  $0,10 \cdot PC$ .

Totala mängden cementgel är  $0,53 \cdot PC$ , det vill säga *gelvolymen har minskat med cirka sju procent*.

Användning av det mera reaktiva restmaterialet *silikastoft* medför ofta en viss ökning av *gelvolymen*. Samma cementpasta som ovan antas:

● **Cement med tio procent silikastoft (max tillåtet). SiO<sub>2</sub>-halt 90 procent. Reaktionsgrad hos silikastoftet 90 procent:**

Volymen cementgel från portlandcementet är  $0,90 \cdot 0,57 \cdot PC = 0,51 \cdot PC$ .

Volymen cementgel från puzzolanreaktionen är cirka  $0,16 \cdot PC$ .

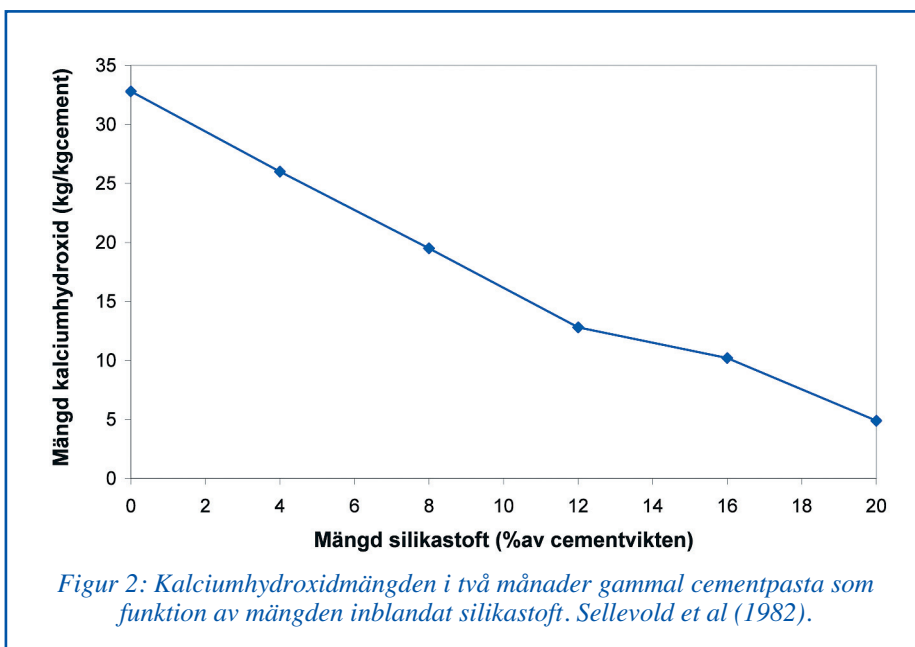
Totala mängden cementgel är  $0,67 \cdot PC$ , det vill säga *gelvolymen har ökat med cirka sju procent*.

När portlandklinker ersatts med inert kalkmjöl kan man anta att mängden cementgel reduceras i samma proportion som andelen kalkmjöl, det vill säga tjuugo procent inblandning ger tjuugo procent minskning av mängden cementgel, vilket bör få starkt negativ effekt på betongens beständighet, se nedan.

Puzzolanreaktionen medför alltså att mängden kalciumhydroxid minskar. Exempel på att detta sker visas i figur 2. Vid tjuugo procent inblandning har i stort sett all kalciumhydroxid försvunnit. Den maximala inblandningen tio procent medför i stort sett en halvering av mängden kalciumhydroxid.

På motsvarande sätt ger även inblandning av flygaska en minskning av mängden kalciumhydroxid.

Exempel på att även masugnsslagg minskar mängden kalciumhydroxid visas i tabell 2. I ett slaggcement med 65 procent slag återstår bara cirka tjuugo procent av den ursprungliga mängden.



Figur 2: Kalciumhydroxidmängden i två månader gammal cementpasta som funktion av mängden inblandat silikastoft. Sellevold et al (1982).

Portlandcement innehåller alltid en mindre mängd alkalioxid; Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O. Dessa komponenter reagerar snabbt med puzzolaner, vilket medför en sänkning av betongens pH-värde. Exempel på denna effekt hos betong med silikastoft visas i figur 3. Samma effekt har observerats hos betong med slag, Bijen (1989).

Såväl minskningen av mängden kalciumhydroxid som sänkningen av pH-värdet minskar skyddet mot armeringskorrosion. Förmågan till självläkning av defekter minskar dessutom. Om mängden cementgel dessutom minskar, vilket särskilt är fallet när kalksten malts in i cementet,

sker en ytterligare minskning av betongens täthet och beständighet.

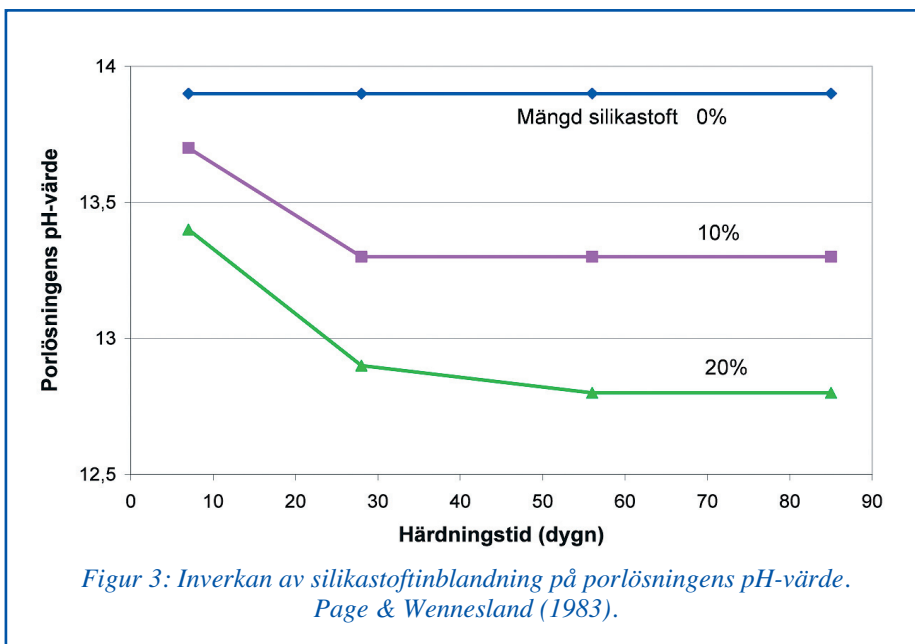
**Mineraliska tillsatsmaterial i cement – tiden fram till 1994**

Ända fram till 1994 reglerades cement av statliga cementbestämmelser. Flera typer av tillsatsmaterial har under olika perioder varit tillåtna som tillsats i cement. En kortfattad genomgång av vad som gällde fram till 1994 ska ges. För närmare information hänvisas till Fagerlund (2010).

*Masugnsslagg.* Det har under lång tid varit tillåtet att dryga ut portlandcementet med mald granulerad masugnsslagg.

Tabell 2: Inverkan av halten masugnsslagg på betongens kalciumhydroxidhalt. Peterson & Warris (1981).

| Cementets slagghalt, % | Relativ Ca(OH) <sub>2</sub> -halt vid 28 dygns ålder |
|------------------------|--|
| 0                      | 100 %  |
| 30                     | 59 %   |
| 65                     | 21 %   |



Figur 3: Inverkan av silikastoftinblandning på porlösningens pH-värde. Page & Wennesland (1983).

- 1960 till 1982 tilläts ett slaggcement med 25 till 60 procent slagg. Under flera år tillverkade Cementa ett slaggcement i Köping. Det gick under namnet *Vulkan-cement*. Slagghalten varierades under året men var aldrig särskilt hög. Cementet användes bland annat i vattenkraftanläggningar i Mellansverige. Erfarenheterna var goda.

- 1982 till 1994 infördes två typer av slaggcement i cementbestämmelserna:

- "Modifierat portlandcement" (M) med max 35 procent slagg.

- "Blandcement" (B) med max 80 procent slagg.

Detta ledde till att Cementa under ett antal år på 1980-talet producerade det så kallade *Massivcementet* med 65 procent slagg, vilket var avsett att användas i grövre konstruktioner som ersättning för det tidigare producerade LH-cementet från Limhamn. Cementet togs ur produktion efter några år på grund av att det uppstod stora problem med temperatursprickbildning hos konstruktionerna, trots att cementets värmeutveckling var låg. Det ersattes av Anläggningscementet som är ett rent portlandcement.

*Flygaska.* 1982 tilläts för första gången inblandning av flygaska i cement. Maximalt tillåten inblandning av aska var 35 procent. Detta ledde till att Cementa under några år på 1980-talet tillverkade ett flygaskacement i Skövdefabriken. Askhalten var cirka 23 procent. Askan kom från elektrofilter vid Västerås koldade värmekraftverk. Cementet som marknadsfördes under namnet Std M hade ungefär samma hållfasthetsprofil som vanligt portlandcement och var tänkt att användas på samma sätt som detta. Tyvärr visade det sig att frostbeständigheten ofta var otillräcklig. Produktionen lades ned efter cirka sju år.

*Silikastoft.* Inblandning av silikastoft i cement var aldrig tillåten.

*Kalksten.* Som nämnts har cementbestämmelserna under lång tid tillåtit inblandning av tre till fem procent kalksten.

Under krigsåren på 1940-talet och en tid därefter, när det var brist på bränsle, tilläts temporärt tillverkning av ett så kallat "E-cement" som innehöll inblandad kalk. Mängden kalkmjöl reglerades inte. Däremot var hållfasthetskravet lägre än för det normala portlandcementet. När bränsletillgången blivit tillfredsställande förbjöds E-cementet (1949).

### Mineraliska tillsatsmaterial i cement enligt nuvarande regler

1994 ersattes de svenska cementbestämmelserna av den europeiska cementstandarden (den gången en "försöksstandard") med tillhörande svenska anpassningsdokument. Detta medförde att ett antal för Sverige nya cementtyper innehållande tillsatsmaterial fick användas. Cementstandarden fastställdes slutligen år 2001 varvid ytterligare några cementtyper blev godkända.

Totalt är nu elva cementtyper godkända. Samtliga dessa cement påstås vara "beprövade i Sverige", vilket knappast överensstämmer med verkligheten. Enbart fem typer har tidigare använts i Sverige; portlandcement, slaggcement med upp till 65 procent slagg och flygaskacement med cirka tjugo procent aska. När det gäller slaggcement med hög slagghalt och flygaskacement är erfarenheterna, som nämnts, knappast tillfredsställande.

Flertalet av dessa cementtyper, även sådana med hög andel kalkfiller, är numera enligt gällande betongstandard godkända att användas även i aggressiv miljö. Följande cementtyper godtas för användning i Sverige.

*Masugnsslagg.* Fyra slaggcementtyper godkänns: CEM II/A-S med max tjugo procent slagg, CEM II/B-S med max 35 procent slagg, CEM III/A med max 65 procent slagg och CEM III/B med max 80 procent slagg.

*Flygaska.* Två flygaskacement godkänns: CEM II/A-V med max tjugo procent flygaska, CEM II/B-V med max 35 procent flygaska.

*Silikastoft.* Ett silikastoftcement godkänns: CEM II/A-D med max tio procent silikastoft.

*Kalksten.* För första gången (bortsett från E-cementet under kriget) godtas ett cement med kalkstensinmalning: CEM II/A-LL med max tjugo procent kalksten.

*Blandningar av alla typer av restmaterial.* Man tillåter två så kallade "kompositcement" som får innehålla blandningar av portlandcement med flera olika restmaterial: CEM II/A-M med max tjugo procent inblandning, CEM II/B-M med max 35 procent inblandning.

### Inverkan av tillsatsmaterial i cement på betongens beständighet

Cementets egenskaper är helt avgörande för betongens egenskaper. För många egenskaper finns det goda provningsme-

toder som gör att man kan kompensera för eventuella negativa effekter av tillsatsmaterial. Typexemplet är tryckhållfasthet där man kan proportionera betongen, till exempel välja cementhalt, så att önskad kubhållfasthet uppnås. Det samma gäller den färiska betongens egenskaper där goda mätmetoder finns.

Andra egenskaper är mer komplexa, vilket gör det svårt att bedöma inverkan av cementtypen. Detta gäller i hög grad beständighetsegenskaperna. Ofta saknas etablerade provningsmetoder. Man är ofta hänvisad till teoretiska bedömningar baserade på kunskap om olika nedbrytningsmekanismer. Dessutom kan labprovningar och fältobservationer utnyttjas. De allvarligaste beständighetsproblemen för svensk betong är:

- Frostangrepp

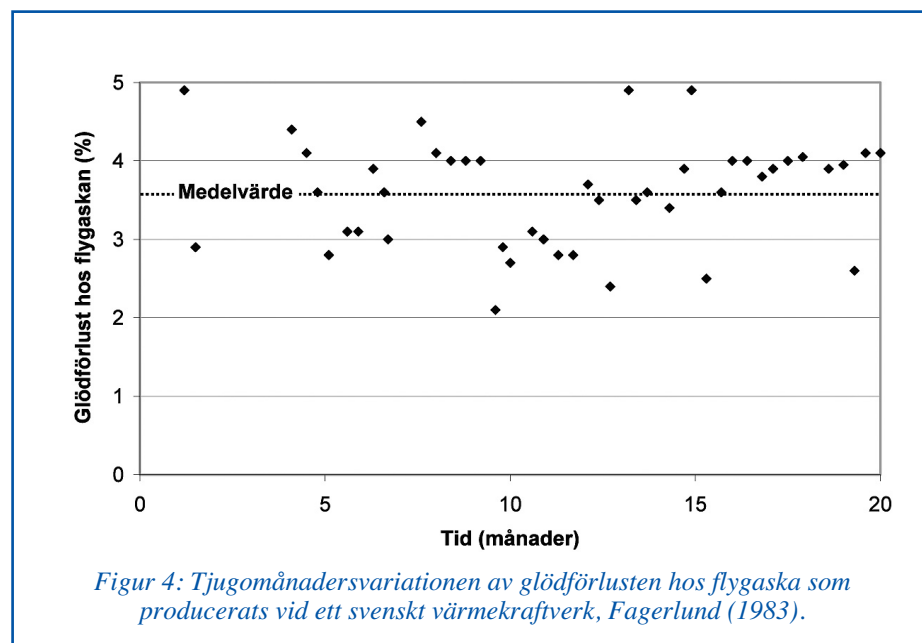
- Armeringskorrosion.

#### Frostangrepp

När det gäller risk för frostangrepp finns idag en provningsmetod (SS 13 72 44) som gör att betong med olämpligt cement vanligtvis kommer att underkännas. Det finns dock vissa negativa effekter av restmaterial som inte avslöjas vid provningen.

- *Slagginblandning* kan visa sig fungera väl vid frysprovningen. I verkligheten, under lång tids exponering, sker en karbonatisering av betongytan. Det karbonatiserade ytskiktet har låg frostbeständighet, vilket medför att ytan skalas av mycket kraftigare än vad som avslöjas vid provningen, som alltså är missvisande, *Utgenannt* (2004).

- *Flygaska* innehåller alltid en viss mängd oförbränt restkol. Även små variationer i halten restkol kan medföra stor variation i betongens lufthalt och därmed svårstyrd variation i frostbeständigheten. Det kan nämnas att flygaska inte tilläts i Öresundsbron av detta skäl. Exempel på variationen under ett och ett halvt år i den så kallade glödförlusten hos kolaskan från ett svenskt värmekraftverk visas i *figur 4*.



Figur 4: Tjugomånadersvariationen av glödförlusten hos flygaska som producerats vid ett svenskt värmekraftverk, Fagerlund (1983).

● *Silikastoft* har vid frysförsök visat sig medföra en kraftig minskning av frostbeständigheten vid ökande antal fryscyklar på ett sätt som inte gäller för betong med portlandcement, *Petersson* (1986). I dag försöker man kompensera för denna effekt genom att fördubbla provningstiden. Orsaken till silikastoftets negativa inverkan har inte klarlagts. Möjligen beror den på att luftporerna, som är till för att skydda betongen, vattenfylles successivt.

### Armeringskorrosion

Det finns två orsaker till armeringskorrosion:

- Karbonatisering av betongens ytskikt
- Kloridjoninträning till armeringen.

Hur lång livslängden blir för en given betong avgörs av täcksiktets tjocklek. Detta regleras av täcksiktstandard, SS 13 70 10. Livslängden ökar kraftigt med ökad täcksiktstjocklek. *I dagens betongregler godtas cement med alla typer av restmaterial i flertalet miljötyper utan att kravet på täcksikt eller kravet på högsta vattencementtal ändras.* Detta innebär alltså att cement, även när de innehåller kalkmjöl, flygaska, slagg och silikastoft, antas vara likvärdiga med avseende på korrosion och vara likvärdiga med portlandcement. Detta är inte rimligt, vilket visas nedan.

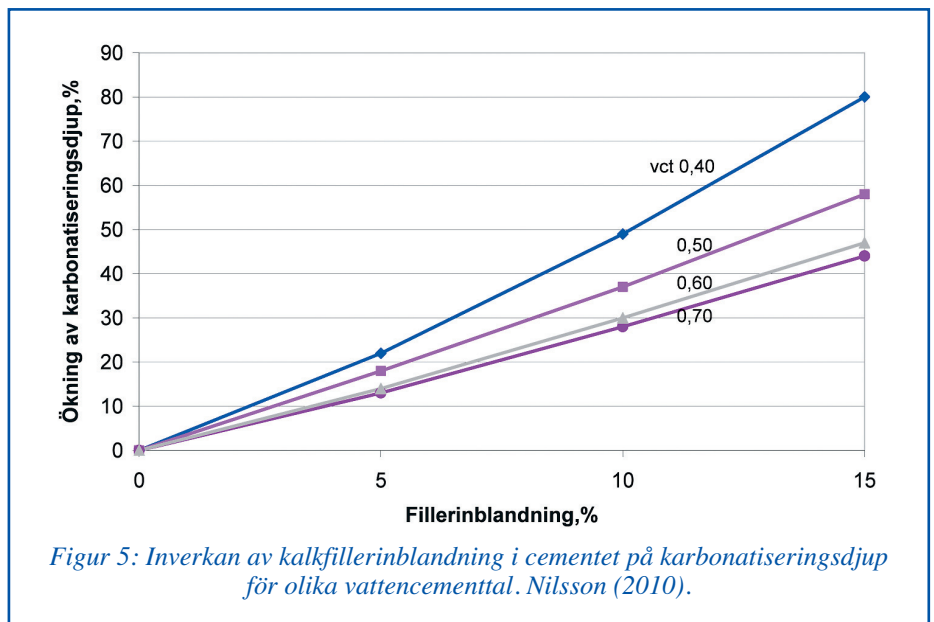
*Karbonatisering*, det vill säga reaktion mellan betong och luftens koldioxid, bestäms av två huvudfaktorer hos betongen:

- Betongens täthet mot koldioxidinträning, det vill säga dess gaspermeabilitet i aktuell miljö. Ju högre täthet desto långsammare karbonatisering och desto högre livslängd.

- Mängden kalk som kan karbonatisera, främst kalciumhydroxid. Ju mera kalk desto långsammare karbonatisering.

Båda faktorerna påverkas av restmaterial i cementet. Reaktiva restmaterial som *silikastoft, slagg och flygaska* minskar mängden kalciumhydroxid, vilket i princip medför att karbonatiseringen går snabbare. Å andra sidan är det möjligt att permeabiliteten minskar. Nettoresultatet kan bli att karboniseringshastigheten är i stort sett oförändrad. Detta har emellertid aldrig klarlagts på ett tillfredsställande sätt. Effekten måste till stor del bero på det använda tillsatsmaterialens egenskaper. Alla slaggar och alla flygaskor är inte identiska.

När det gäller *kalkinmalning* i cement är effekten på korrosionsskyddet troligen starkt negativ. Mängden karboniseringsbar kalk minskar i direkt proportion till mängden kalkmjöl. Permeabiliteten ökar kraftigt. En teoretisk analys i *Nilsson* (2010) visar att vid femton procent kalkinblandning ökar karboniseringsdjupet hos normal utomhusbetong (vattencementtal 0,50) efter viss exponeringstid med upp till 60 procent, se *figur 5*. Det innebär till exempel att om livslängden fram till start av korrosion är 100 år för



Figur 5: Inverkan av kalkfillerinblandning i cementet på karboniseringsdjup för olika vattencementtal. Nilsson (2010).

ett visst portlandcement och ett visst täcksikt blir den enbart 40 år när cementet innehåller femton procent kalksten. Ingen hänsyn tas till detta i dagens regler.

*Korrosion orsakad av kloridjoner* startar när halten kloridjoner vid armeringsjärnets yta överstiger ett kritiskt värde. Avgörande för livslängden är därför:

- Hastigheten med vilken kloridjoner tränger in, det vill säga *kloridpermeabiliteten*.

- Kloridkoncentrationen som krävs för att korrosion ska starta, det vill säga *tröskelvärde*.

Båda dessa faktorer påverkas av reaktiva tillsatsmaterial. Ofta finner man vid experiment att till exempel slagg eller silikastoft gör betongen tätare mot kloridtransport, vilket är en positiv faktor. Å andra sidan minskar de tröskelvärde, vilket är en negativ faktor. En bedömning av tröskelvärde för olika bindemedel baserad på vissa fältmätningar visas i *tabell 3*. Som synes minskar tröskelvärde rätt kraftigt även vid låg inblandning av tillsatsmaterial. Orsaken är troligen att pH-värdet hos porvattnet sänks på grund av puzzolanreaktionen, se till exempel *figur 3*.

En viss minskning av tröskelvärde får ofta större negativ effekt än den positiva effekt som fås av en procentuellt sett lika hög minskning av diffusionskonstanten.

När cementet innehåller *kalkfiller*, vilket till exempel är fallet i det svenska *Byggcementet*, blir den negativa effekten på livslängden mycket stor, vilket man inte tar hänsyn till i dagens betongstandard. Anta att det krävda högsta vattencementtalet (vct) enligt betongstandard är  $vct_{krav}$ . Det verkliga vattencementtalet hos betong med kalkfillercement blir då:

$$vct_{kalkfiller} = \frac{vct_{krav}}{1 - KF}$$

Där  $KF$  är andelen filler i cementet. Ekvationen utgår från det rimliga antagandet att kalkfillret inte ger något bidrag till betongens täthet och inte påverkar tröskelvärde.

Maximalt tillåten mängd kalkfiller i cement är tjugo procent. Då gäller följande relation mellan kravvärde och verkligt vct för fillercement.

- $vct_{krav} = 0,40$ :  $vct_{kalkfiller} = 0,50$
- $vct_{krav} = 0,50$ :  $vct_{kalkfiller} = 0,63$ .

Tabell 3: Tröskelvärden uttryckta i viktprocent totalklorid (syralöslig klorid) av cementvikten. Svenska Betongföreningen (1998).

| Miljötyp               | Bindemedelstyp          |                   |                   |                   |
|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                        | Portlandcement CEM I    | 8 % silikastoft   | 15 % flygaska     | 15 % masugnsslagg |
| Cyklisk fuktbelastning | 0,7 (variation 0,6-2,2) | 0,4 (var 0,3-1,5) | 0,5               | 0,5               |
| Konstant hög Fuktnivå  | 1,5 (var 1,5-2,2)       | 0,8 (var 0,8-1,9) | 1,0 (var 0,9-1,4) | 1,0 (var 0,8-2,0) |
| Marin miljö            | 0,8 (var 0,6-2,2)       | 0,5 (var 0,5-1,0) | 0,6 (var 0,4-0,8) | 0,6 (var 0,5-1,2) |
| Tösaltningmiljö        | 0,6 (var 0,4-1,0)       | 0,3               | 0,4               | 0,4               |



Betong med vct 0,50 respektive 0,63 har naturligtvis inte lika hög livslängd som en betong med vct 0,40 respektive 0,50. *Det är alltså uppenbart att nuvarande regler måste ändras när det gäller användning av cement med kalkfyller i aggressiv miljö. Detta framgår även tydligt av figur 4.*

## Slutord

Trots oklarheten kring restmaterialens påverkan på betongens beständighet anser nuvarande regler att alla cement är likvärdiga och ge samma livslängd vid samma vattencementtal och samma täcksikt. Som visats ovan är detta ett orimligt antagande. Man bör därför snarast möjligt göra en översyn av betongstandarden och täcksiktsstandarden så att olämpliga cementtyper tas bort från vissa *miljötyper* (exponeringsklasser). Om man önskar behålla alla nuvarande cementtyper och samtidigt kräva samma täcksikt för alla cementtyper, vilket är rimligt av praktiska skäl, bör man rimligen kräva olika högsta vattencementtal för olika cementtyper. På så sätt kan man ta hänsyn till cementens olikheter.

Det måste noteras att huvuddelen av all cement används för vanliga inomhuskonstruktioner för vilka beständighetsproblem inte förekommer. Då kan naturligtvis cement med tillsatsmaterial användas utan problem, förutsatt att de uppfyller

andra krav, till exempel krav på reaktionshastighet, hållfasthet, gjutbarhet, frihet från emissioner etcetera. ■

## Referenser

Bijen, J. (1989): *Can we construct durable marine structures with neat concrete and can we repair durably?* Durability of Concrete in Marine Environments. Delft University and Intron.

Fagerlund, Göran (1983): *Betong med flygaska*. Ingår i "Kiselstoff och flygaska". Cement och Betonginstitutet, Kursverksamheten.

Fagerlund, Göran (1994): *Struktur och strukturutveckling*. Kapitel 10 i Betonghandbok Material. Svensk Byggtjänst och Cementa AB.

Fagerlund, Göran (2010): *Betongkonstruktioners beständighet. En genomgång av officiella svenska regler 1926–2010*. Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-3153.

Gillberg, Björn (1999): *Betongen i kretsloppssamhället*. Ingår i "Betong och Miljö". Svensk Byggtjänst.

Nilsson, Lars-Olof (2010): *Täckskiktskrav i exponeringsklasserna XC3 och XC4 för betong med låga vattencementtal*. Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7205.

Page, C.L., Vennesland, Øisten (1983): *Pore solution composition and chloride*

*binding capacity of silica fume pastes*. Materials and Structures, Vol 16, No 19.

Peterson, Olof, Warris, Birger (1981): *Reaction between blast-furnace slag and lime*. Cementa, CM Rapport T 81018.

Petersson, Per-Erik (1986): *The influence of silica fume on the salt scaling resistance of concrete*. Statens Provningsanstalt. Building Technology, Technical Report, SP-report 1986:32.

Sellekvold, Erik, et al. (1982): *Silica fume cement paste – hydration and pore structure*. Ingår i "Condensed silica fume in concrete". Inst. Byggningsmateriallære, NTH. Trondheim.

Svenska Betongföreningen (1998): *Beständiga betongkonstruktioner*. Betongrapport nr 1. Utgåva 2.

Utgenannt, Peter (2004): *The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete*. Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-1021.

---