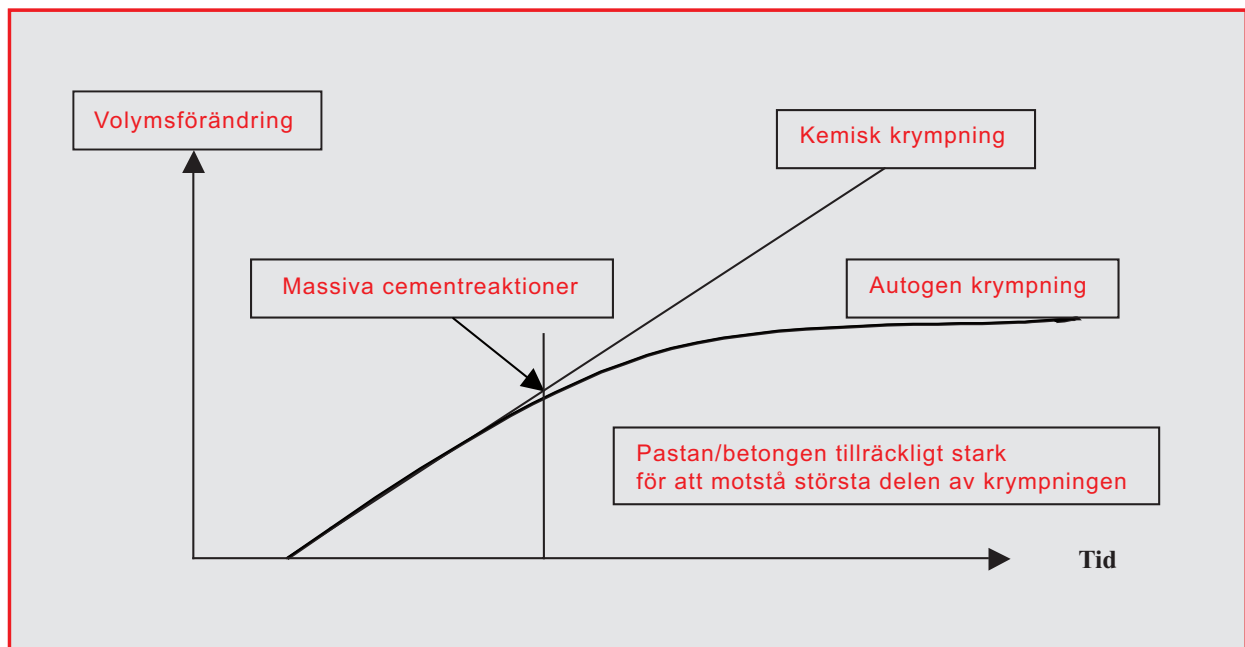


SPRUTBETONGS KRYMPNING - MODIFIERING AV BETONGSAMMANSÄTTNING



Björn Lagerblad
Leif Fjällberg
Mikael Westerholm

Sprutbetongs krympning – modifiering av betongsammansättning

Shrinkage of shotcrete - modification of concrete mix

Björn Lagerblad, Betongbyggnad-KTH

Leif Fjällberg, Cement och Betong Institutet

Mikael Westerholm, Cement och Betong Institutet

SveBeFo rapport 86

Stockholm 2007

ISSN 1104 – 1773

ISRN SVEBEFO-R—86—SE

FÖRORD

Erfarenheter från Södra Länken och andra tunnelprojekt har visat på ett behov av bättre kontroll över krympeegenskaper hos sprutbetong, främst för att undvika sprickbildning i samband med dräner för vatten- och frostsäkring. En förstudie har visat att vanligen använda tillsatsmedel kan ha ogynnsam inverkan på dessa egenskaper. Mot den bakgrunden har två delprojekt genomförts med syfte att förstå de grundläggande mekanismerna för krympning hos sprutbetong och undersöka möjligheter att minska krympningen med bibehållen sprutbarhet, samt att prova fiberinblandning som kan bidra till att fördela krympningen på flera fina sprickor och därmed undvika korrosion på stålfibrer.

Föreliggande rapport redovisar undersökningen av sprutbetongens krympning och möjligheter att modifiera dess sammansättning. Det har skett genom en litteraturgenomgång och laboratorieprovningar för att bättre förstå mekanismerna och försök att med hjälp av minskad mängd pasta och med tillsats av krympreducerare begränsa krympningen. Björn Lagerblad, CBI/KTH har varit ansvarig för kapitlet om det kemiska systemet, krympmekanismer speciellt autogen krympning, och mikrostruktur, samt haft det övergripande ansvaret för rapporten. Leif Fjällberg, CBI, har svarat för kapitlet om cementhydratation och uttorkningskrympning av pastaprover, och Mikael Westerholm, CBI, har svarat för kapitlet om sprutbetongs reologiska egenskaper och cementreducering.

Delprojektet om fiberinblandning redovisas separat i SveBeFo rapport 87 "Sprutbetongs krympning - fiberinblandning för bättre sprickfördelning", författad av Anders Ansell och Jonas Holmgren, KTH.

Projektet har genomförts gemensamt av KTH Bygghälsa, avdelningen för betongbyggnad och Cement och Betong Institutet på uppdrag av Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) och med Banverket, SKB och SBUF som huvudfinansiärer. Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Tommy Ellison, Besab, Staffan Hjertström, Cementa, Bo Malmberg, WSP, Erik Nordström, Vattenfall, Arvid Taube, Banverket, Kjell Windelhed och Lars Österlund, Vägverket, samt undertecknad.

Stockholm i oktober 2007

Tomas Franzén

Sammanfattning

Sprutbetong är i grunden en vanlig betong men dess applikation gör att den får andra egenskaper. Den blandas med en tillstyvnadsaccelerator i munstycket vilket förändrar det kemiska systemet och då den sprutas mot en yta får den en annan bearbetning än man får vid gjutning.

Detta projekt har startat med anledning av att man speciellt över dräner har uppmärksammat en kraftig sprickbildning sannolikt orsakat av en kraftig krympning. En förstudie (SveBeFo rapport K24) visade att det med stor sannolikhet, åtminstone delvis, beror på inverkan av tillstyvnadsacceleratoren och då speciellt den s.k. alkalifria. Detta arbete syftar till att närmare studera orsakssammanhangen och att finna motåtgärder mot den ökade krympningen.

Tillstyvnadsacceleratorerna är kemikalier (salter) som gör att sprutbetongen styvnar momentant på väggen. Under den första tiden kommer dess hållfasthet att vara avhängigt av tillstyvnadsacceleratoren. Hur lång tid det tar för den verkliga cementhydratationen att komma igång beror på många omständigheter som typ av cement, vct och temperatur. Med anläggningcement och normal bergtemperatur tar det över ett dygn innan sprutbetongen har någon signifikant styrka.

Då cementreaktionerna sker i en tillstyvnad struktur kommer den kemiska krympningen att påverka betongen direkt. Detta gör att man i sprutbetong får en autogen krympning på ca 0,5 % vilket medför att man måste tillföra vatten direkt efter sprutning för att slippa krympning. Dessutom får man en grövre pastastruktur vilket gör att uttorkningskrympningen för sprutbetong med den alkalifria tillstyvnadsacceleratoren blir ca 15-20 % större än för vanlig gjuten betong. Tillsammans ger detta en så stor ökad krympning att den kan förklara problemen med den tidiga uppsprickningen.

Krympbeloppet är avhängigt av mängden cementpasta. Normalt innehåller sprutbetong mycket cement (och vatten). För att minska detta har proportionering och reologiska villkor för pump- och sprutbarhet undersökts. Genom att proportionera med ökad fillerhalt kan man sänka cementhalten ca 20 % men då uppstår problem med konsistensen vid låga vct. Man kan emellertid förbättra egenskaperna genom att tillföra rikligt med luft som till största delen försvinner vid sprutningen. En annan metod som undersökts är att till den färska betongen tillsätta krympreducerare. Även detta minskar krympningen. Både för den cementreducerade betongen och den med krympreducerare behövs fullskaliga sprutningar för att verifiera att resultaten är giltiga även vid normalproduktion

Nyckelord: Sprutbetong, tillstyvnadsacceleratorer, autogen krympning, uttorkningskrympning, proportionering, krympreducerare

Summary

Sprayed concrete or “shotcrete” is basically ordinary concrete, but its way of application gives it other properties. In the nozzle it is mixed with a set accelerator, which in turn changes the chemical system and as it is shot against a surface it will get another treatment than when casted and vibrated.

This project started as one in later years, especially at shotcrete on drainage mats, could observe severe cracking presumably caused by enhanced shrinkage. A preliminary study (SveBeFo report K24) showed that this probably was due to the effect of the set accelerator and especially the now commonly used alkali free set accelerator.

A set accelerator is a chemical compound (a salt) that makes the concrete stiff already at the wall. During the first period the strength of the shotcrete will depend on the set accelerator. The time for the real cement hydration and proper strength is dependent on the type of cement, the water/cement ratio and the temperature. With the commonly used cement for shotcrete in Sweden (CEM I, MH, LA, SR) and normal rock temperature it will take more than 24 hours before the shotcrete will get any significant strength.

The cement reactions will occur in an already existing “stiff” structure why the chemical shrinkage will affect shrinkage directly. An effect of this is that one, in contrast to cast concrete, will get an autogenous shrinkage of around 0.5 ‰. Thus added water from time 0 is needed. Moreover, the hardened shotcrete will get a coarser pore structure, which will enhance the drying shrinkage with between 15 and 20 %. Together this gives a shrinkage that can explain the increased cracking.

The amount of shrinkage is dependent on the amount of cement paste in the mix. Normally shotcrete contains more cement (and water) than ordinary concrete. To reduce the amount of paste, proportioning and rheological conditions for pumpability and shootability has been studied. By careful proportioning with increased amounts of filler it is possible to reduce the amount of cement with around 20 %, but one will get problems at low w/c ratios. One effective method is, however, to add substantial amount of air to the mix, air that disappears during the shooting operation. Another effective method is to add shrinkage reducers to the mix.

Both for the cement reduced concrete and for the mix with shrinkage reducer full scale experiments are needed to verify the results.

Key words: Sprayed concrete, shotcrete, set accelerators, autogenous shrinkage, proportioning, drying shrinkage, shrinkage reducer

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Forskningsprojektets syfte och genomförande	2
2	Sprutbetong, det kemiska systemet	5
2.1	Portlandcement och dess hydratation	5
2.2	Tillstyvnadsacceleratorer och betong	7
2.2.1	Typer av tillstyvnadsacceleratorer	8
2.2.1.1	Vattenglas	9
2.2.1.2	Alkaliaccelerator	9
2.2.1.3	Alkalifri accelerator	10
2.3	Krympmekanismer i betong, speciellt sprutbetong	12
2.3.1	Kemisk och autogen krympning	13
2.3.2	Uttorkningskrympning	14
2.3.3	Krympreducerare	14
2.4	Sprutbetongs reologiska egenskaper	15
2.4.1	Reologi	15
2.4.2	Sprutbetong	17
2.4.2.1	Sprutbarhet	17
2.4.2.2	Återstuds	21
2.4.2.3	Möjligheter att styra reologin	25
2.4.2.4	Pumpbarhet	27
3	Undersökningsmetodik och material	31
3.1	Material	31
3.2	Metoder	33
3.2.1	Kemiska systemen	33
3.2.2	Strukturen och strukturutveckling	34
3.2.3	Krympning	34
3.2.4	Reologi och arbetbarhet	36
4	Resultat	37
4.1	Struktur hos pasta och sprutad betong	37
4.1.1	Mikrostrukturens utveckling	37
4.1.2	Porositet	39
4.1.3	Sprutbetongens struktur	40
4.2	Cementrydratation	41
4.2.1	Cementrydratation-kalorimetri	41
4.2.2	Cementrydratation –Röntgendiffraktion	43
4.2.3	Hållfasthetsutveckling pasta	45
4.3	Cementreducering	45
4.3.2	Arbetbarhet och reologi	46
4.3.2.1	Ersättning av cement med filler	46
4.3.3	Ersättning av cement med luft	50
4.3.4	Ersättning av cement med filler i kombination med luft	53
4.3.5	Inblandning av 8/11 mm sten	55
4.3.6	Cementreducerade betonger med stålfiber	57
4.3.7	Provsprutningar	58
4.3.8	Betongernas egenskaper och sprutbarhet	58

4.4	Krympning	60
4.4.1	Autogen krympning.....	60
4.4.2	Uttorkningskrympning.....	62
4.4.2.1	Pastaprover.....	62
4.4.2.2	Gjuten betong.....	66
4.4.2.3	Sprutad betong	69
5	Diskussion.....	71
6	Slutsatser och fortsatt arbete.....	73
7	Referenslista	75

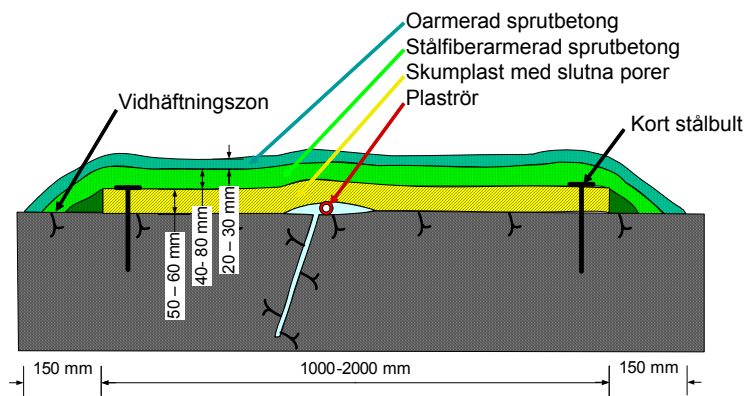
1 Introduktion

Sprutbetong kan när det gäller de flesta egenskaper betraktas som en vanlig betong eller ett bruk som appliceras och kompakteras genom en speciell process där den sprutas med hög hastighet mot en yta med hjälp av tryckluft. ACI (American Concrete Institute) definierar sprutbetong som "Mortar or concrete pneumatically projected at high velocity onto a surface" (ACI 506R-90). Sprutbetong används huvudsakligen vid reparation av befintliga konstruktioner, släntstabilisering, tunnelbyggnation samt vid andra applikationer där det är svårt eller ineffektivt att sätta form (Armelin & Banthia 1998).

Under senare år har man alltmer börjat uppmärksamma kraftig sprickbildning hos sprutbetong, speciellt i tunnlar. I en del fall har detta gett besvärliga konsekvenser och det indikerar att sprutbetong inte i alla avseenden och då speciellt när det gäller krympning, inte kan betraktas som en konventionell betong.

En nyligen genomförd pilotstudie visar att speciellt alkalifria accelerators tycks öka krympningen (SveBeFo rapport K 24). Resultaten från detta arbete indikerar att konventionell betong ger 0,4-0,6 % uttorkningskrympning i tunnelmiljö medan sprutbetong baserad på vattenglasaccelerator ger en krympning på 0,5-0,8 % och en baserad på alkalifri tillstyvnadsaccelerator ger 0,7-1,0 %. Det finns också indikationer på en kraftig autogen krympning om sprutbetongen inte vattenhärdats från början.

Avdelningen för Betongbyggnad, KTH, har i samarbete med Golder Associates AB på uppdrag av Vägverket genomfört en studie av orsaker till sprickbildning i sprutbetong på dräner i Södra Länken. Två typer av dräner förekommer i tunnarna - dels smala dräner med en bredd av 1.5 m, dels breda dräner där bredden kan vara tiotals meter. På de breda dränerna är sprutbetongen förankrad c/c 1200 mm med bultar.



Figur 1.1 Principiell utformning av "smal" drän.

Principal design of "short" drainage system

Sprutbetongen på samtliga dräner i huvudtunnlar och ramper har inspekterats visuellt. Observerade sprickor har dokumenterats och sprickvidden har där det varit

möjligt mätts med lupp, mätsticka eller tumstock. Sammanlagt har över 900 sprickor hittats.

50 % av de breda dränerna har sprickor men endast 10% av de smala dränerna. 60 % av sprickorna har en vidd, som är större än 0,5 mm. Sprickor med bredd mindre än 0,1 mm har inte registrerats – främst på grund av svårigheten att upptäcka dem. Det finns skäl att förmoda att sprickor med bredd större än cirka 0,3 mm medför risk att stålfiber korroderar av långt innan konstruktionens förutsatta livstid har uppnåtts. Sprickbildningen har huvudsakligen sin orsak i förhindrad krympning. Även temperaturskillnader har troligen spelat roll.

Sprutbetong är i krympningshänseende en extrem betong p.g.a. hög cementhalt och hög vattenhalt. Situationen förvärras dessutom av att vattenhärdning många gånger inte utförs. Den förhållandevis lilla mängden stålfibrer gör att sprutbetongen är töjningsmjuknande, d.v.s. den kraftupptagande förmågan före uppsprickning är större än den efter uppsprickning. Härigenom erhålles endast en spricka/konstruktionsdel och i denna tas hela den fria krympningen ut, vilket medför att sprickan blir mycket bred. Sprutbetongen appliceras i relativt tunna lager och kyls snabbt varför sprickorna antagligen inte beror på värmekrympning.

Krympning generellt är en funktion av rörelser och förändringar i cementpasta och vattenmängden i denna cementpasta. För att minska krympningen är det därför väsentligt att kunna minska mängden cementpasta och/eller vattenmängd, men detta är inte helt enkelt då detta även påverkar sprutbarhets- och hållfasthetsegenskaper. För att förstå och kunna finna medel för att minska krympningen måste man även begripa de underliggande mekanismerna.

1.1 Forskningsprojektets syfte och genomförande

Projektet syftar till att förstå grundläggande mekanismer för krympning hos sprutbetong, att analysera olika åtgärder för att minska krympningen med bibehållen sprutbarhet samt att åstadkomma fördelning av krympningen på fina sprickor, som inte medför korrosionsrisk.

Målet är att med hjälp av proportionering åstadkomma en fiberarmerad sprutbetong, som uppfyller dagens krav på pumpbarhet, sprutbarhet, accelererbarhet, hållfasthet och beständighet, men med mindre cementåtgång och krympning.

Vad som styr pumpbarhet och återstuds kommer att studeras med hjälp av reologi. Med hjälp av partikelpackning, filler, luftporbildare och en effektiv superplasticerare studeras möjligheten att minska mängden cementpasta. Det kommer att genomföras en systematisk studie med olika lufthalter, filler och fillerkombinationer som utvärderas med reometer för att kunna få fram en sprutbetong med krävda egenskaper. Effekten på krympningen studeras genom laboratoriesprutningar där hänsyn tas till härdning och tidsförlopp. Det kommer även att göras en serie försök med krympreducerare för att finna ut om dessa har någon effekt i sprutbetongens bindemedelssystem.

Projektet förväntas resultera i förslag till betongsammansättning och fiberinblandning för sprutbetong som klarar krav på sprutbarhet, reducerad krympning och töjningshårdnande.

Forskningsprogrammets olika delar

- Optimal proportionering för minskning pasta- vattenmängd
- Sprutbetongs specifika egenskaper när det gäller krympning
- Inverkan av acceleratorer på cementsystem och den hårdnade produktens struktur
- Krympförsök på de olika betongerna med och utan fiberinblandning
- Provsprutning.

2 Sprutbetong, det kemiska systemet

Den principiella skillnaden mellan vanlig betong och våtsprutad betong är att den senare innehåller en tillstyvnadsaccelerator som blandats med betongen i sprutmunstycket. Tillstyvnadsacceleratorer är kemikalier som samverkar med de kemiska reaktioner som bidrar till den vanliga cementhydratationen, men som momentant får cementpastan och därmed betongen att styvna. På plats måste betongen vara så styv att den inte ramlar ner.

På marknaden idag finns tre principiellt olika typer av tillstyvnadsaccelerator: vattenglas, alkalihaltiga och alkalifria accelerators. Dessa har olika verkningssätt, men för att förstå verkningssättet måste man förstå cements tidiga hydrattation.

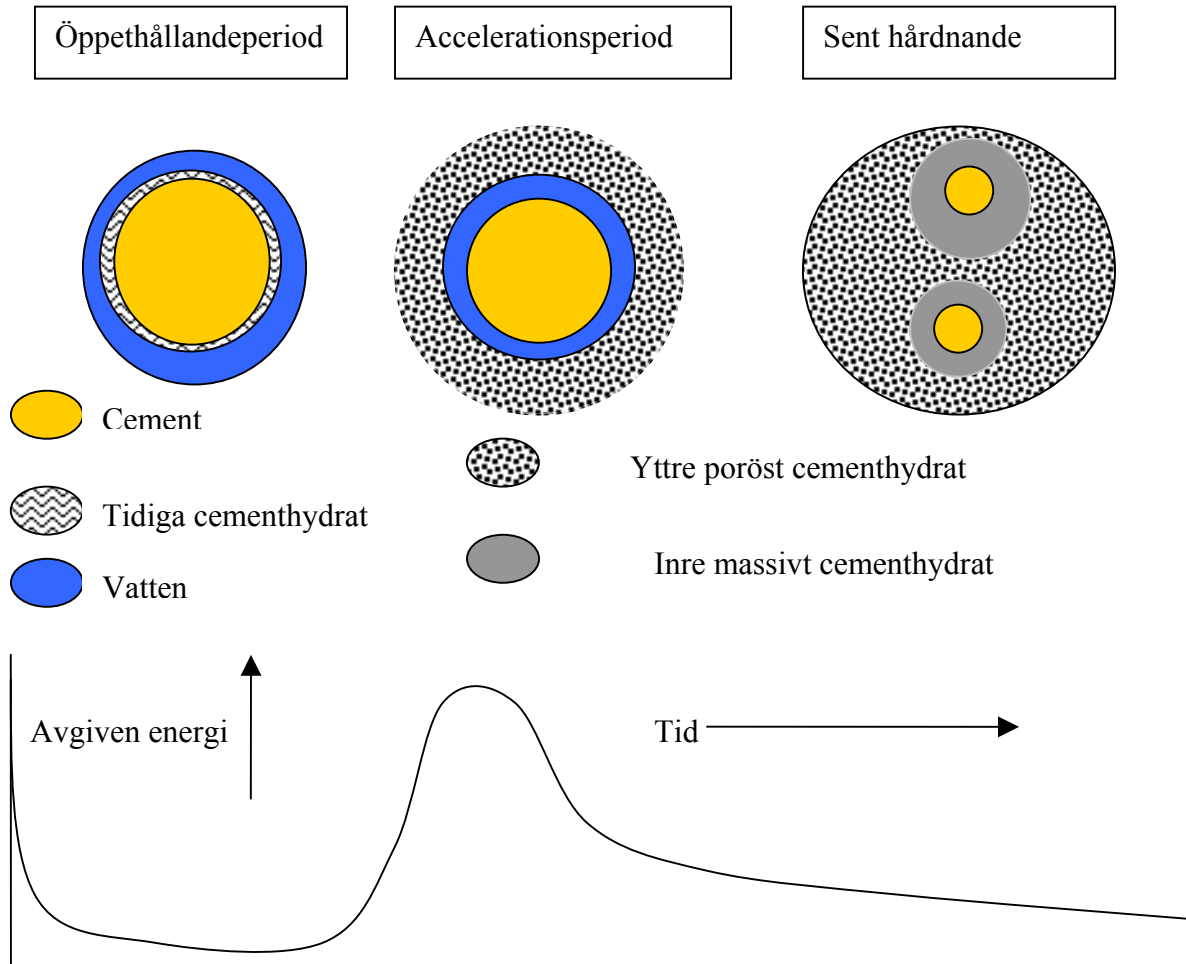
2.1 Portlandcement och dess hydrattation

Cementklinker består av fyra huvudmineral alit (C_3S), belit (C_2S), aluminat (C_3A) och ferrit (C_4AF), där $C=CaO$, $S=SiO_2$, $A=Al_2O_3$, $F=Fe_2O_3$ och $H = H_2O$. Alit och belit är de klinkermineral som bildar själva cementgelen, den amorfa s.k. kalciumsilikathydraten (C-S-H) och den kristallina kalciumhydroxiden (CH). Aluminatet är mycket reaktivt och bildar i kontakt med vatten kalciumaluminathydrat (CAH). Detta ger emellertid en snabb s.k. falsk bindning som får betongen att tillstyvna direkt. Därför tillsätter man gips till cementet så att man i stället för CAH bildar ettringit (AF_t) i stället vilken, i mindre mängd, inte ger någon falsk bindning. I ett cement är mängden tillsatt gips relaterat till mängden aluminat för att styra tillstyvnad och rörlighet. Det är även viktigt att reglera gipsens löslighet så att den motsvarar mängden frigjord aluminat.

Under sitt tillstyvnande genomgår cementpastan, betongens bindmedel, fyra stadier (Figur 1.1).

1. I det första stadiet väts cementet. Detta ger en tunn hinna av cementhydrat som skyddar cementkornet och förhindrar/fördröjer fortsatt hydrattation. Skalet/hinnan består av en blandning av primitiv C-S-H och ettringit. Vattnet (porvätskan) får ett högt pH och blir rik på Ca, Na, K och sulfationer.
2. Under steg två hindrar de tidiga hydraten massiv reaktion men det sker omlagringar i hydrattationsprodukterna som möjliggör steg 3. Perioden benämns öppethållandeperioden och är den period där betong kan gjutas.
3. I steg tre sker förändringar/omlagringar som medför att det bildas ett gap mellan cementkornet och de tidigt bildade hydraten. Detta medför att vatten kommer i kontakt med cementmineral vilket medför att hydrattationen tar fart. De nya hydrattprodukterna avsätts utanför de tidigare bildade hydrattprodukterna och gör att mellanrummet mellan cementpartiklarna fylls med cementhydrat, vilket ger en hårdnad betong. Detta kallas accelerationsperioden.
4. I steg fyra avtar reaktionshastigheten. Reaktionsprocessen förändras när ”skalet” blivit för tätt och framför allt de kvarblivna större cementkornen

reagerar genom en långsam diffusionsstyrd "in situ" reaktionsprocess. Cementet innehåller mindre sulfat än vad som behövs för att bilda ettringit av all aluminat vilket medför att en del av ettringiten omvandlas till monosulfat som har en högre aluminat/sulfatkvot. En långsammare hydratationsprocess av återstående cement vidtar. Man får även en omstrukturering av cementgelen (C-S-H) som blir mera regelbundet uppbyggd.



Figur 2.1. De olika stadierna i cementpastas tillstyvnande-hårdnande. I diagrammet underst visas avgiven energi under de olika stadierna. Detta kan avläsas genom isoterm kalorimetri. I början från vätning, därefter en låg aktivitet som avslutas med en kraftig massiv reaktivitet när styrkan byggs upp. Därefter vidtar en långsam reaktion som sakta ökar styrkan

The different stages of stiffening and hardening of a cement paste. The diagram shown exothermal energy released at different stages as measured by calorimeter. At the start there is wetting subsided by a dormant period followed by massive reactions when the strength is gained. At the end there are slower reaction increasing the strength.

Längden av öppethållandetiden beror på typen av cement och då framför allt innehållet av aluminat (C_3A) och temperatur. Hastigheten hos hårdnandet under accelerationsperioden beror på finmalning och temperatur. Vanliga accelerationer påverkar öppethållandeperioden och/eller hårdnandeförloppet men de ger inte tillräckligt snabb tillstyvnad för att kunna användas i sprutbetong. Därför behövs en mycket snabb tillstyvnad för att hålla betongen på plats.

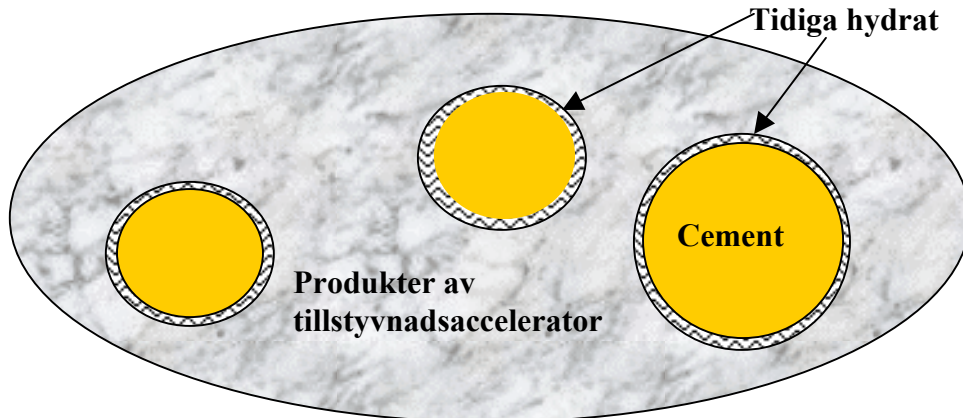
Skillnaden mellan tillstyvnadsacceleratorerna och de vanliga acceleratorerna är att de första ger en tillstyvnad men inte äkta hårdnande medan de senare ger ett snabbare verkligt hårdnande. Detta tillstyvnande kallas ibland falsk tillstyvnad då det inte relaterar till de massiva cementreaktionerna. I torrsprutad betong används ibland cement utan gips för att utnyttja den falska bindningen.

2.2 Tillstyvnadsacceleratorer och betong

En tillstyvnadsaccelerator skall ge en betong som blir styv direkt efter blandning. En vanlig accelerator påverkar kalciumsilikatsystemet hos cementet så att öppethållandet minskar, men för sprutning är dessa för långsamma. För att få en momentan tillstyvnad måste man påverka vätskefasen mellan cementpartiklarna och ge denna en struktur som direkt stoppar rörligheten. Detta medför att under öppethållandeperioden, som kan vara över ett dygn, så är styrkan i sprutbetongen beroende av det falska momentana tillstyvnandet och vad som sker i den låsta struktur som tillstyvnadsacceleratoren givit.

I vanlig betong beror tillstyvnande och hårdnande på typ av cement, vattencement tal (vct) och temperatur. Tillstyvnadsacceleratorerna påverkar strukturen och sammansättningen av porlösningarna varför man inte kan utgå från att hållfasthetstillväxt och struktur blir samma som i den rena betongen.

En kritisk variabel när det gäller betong är volymförändringar som ger svällning eller krympning. Styv/hårdnad betong är spröd vilket gör att den kan spricka. Under tillstyvnandet och hårdnandet sker volymförändringar. I vanlig betong sker volymförändringar under öppethållandeperioden när betongen är flytande men under denna period kan den anpassa sig genom nivellering. I sprutbetong tillstyvnar betongen direkt efter applicering vilket medför att dessa volymförändringar sker i en låst struktur, en struktur som den kommande massiva cementreaktionen måste anpassa sig till. Detta medför att den tidiga krympmekanismen kommer att skilja sig från den i vanlig betong. Dessutom måste man beakta vad som sker i de tidigt bildade hydratfaserna som tillstyvnadsacceleratorerna har givit och vad som sker med de tidiga hydratfaserna när den verkliga tillstyvnaden/hårdnandet under den massiva cementreaktionen tar vid.



Figur 2.2. I en sprutbetong fylls porvätskan under öppethållandeperioden med produkter från tillstyvnadsacceleratoren, vilket ger den struktur som håller betongen på plats. I denna struktur sker sedan accelerationen och det sena hårdnandet.

In a shotcrete there is to start with a pore structure filled with products from the set accelerator. This is the structure giving the early strength that keeps the shotcrete at place. In this “false” structure the real cement hydration giving the hardened shotcrete will take place.

2.2.1 Typer av tillstyvnadsacceleratorer

På marknaden finns tre principiellt skilda typer av tillstyvnadsacceleratorer;

1. Vattenglas (Vg)
2. Alkaliaccelerator (Aa)
3. Alkalifri accelerator (Af)

Förutom dessa kan man för torrsprutad betong använda cement utan gips vilket ger en falsk bindning som håller betongen på plats.

Man kan även använda betong som överdoserats på luft. Om man blandar 20-25 % luft i en betong kommer denna att vara rörlig. Detta överskott av luft försvinner vid sprutningen vilket gör att betongen blir styvare och stannar på plats.

Av dessa tre är den alkalifria acceleratoren, av olika orsaker, mest vanlig idag. I äldre tider och då speciellt för torrsprutning av tunna lager användes ofta alkaliacceleratoren.

2.2.1.1 Vattenglas

Vattenglas som är den äldsta tillstyvnadsacceleratoren är alkalisilikat i vattenlösning. Det är en lösning som består av alkali- och silikajoner. Den färska cementpastan innehåller Ca joner som faller silikatjonerna.

Från början tillverkades den av kvarts som löstes upp i varm alkalihydroxid (lut). Idag tillverkas den av kvarts och kristallin alkalihydroxid som reagerar vid upphettning och bildar ett alkalisilikat som efter finmalning löses upp i vatten. I vattenlösning bildas en alkalisk (högt pH) lösning av alkalijoner och silikat. Silikats löslighet ökar med ökat pH-värde (Dove & Rimstedt 1994).



Detta beror på att med ökat pH så ökar mängden OH^- vilket gör att H^+ binds som H_2O . Reaktionen konsumerar OH^- -joner dvs. silikan verkar som en syra. Detta resulterar i att den syreatom som sticker ut från Si-O komplexet blir allt starkare negativt laddad, vilket gör att dess attraktionskraft på katjoner som K^+ och Ca^{2+} stiger.

I en lösning i jämvikt med amorf silika vid höga pH förekommer det också joniserade polymerer som $\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_7^{2-}$. Dessa befinner sig i lösning så länge denna domineras av envärda alkalijoner. Kalciumjonen som är tvåvärd (Ca^{2+}) kan emellertid binda ihop dessa joniserade komplex och bilda C-S-H. För att detta skall ske fordras emellertid en hög ytladdning, dvs. ett högt (pH > 10-11). Utan kalciumjoner stiger lösligheten med stigande pH.



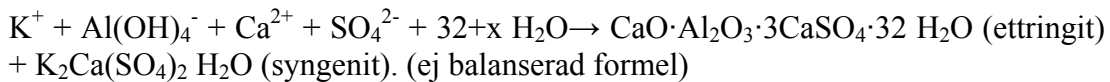
I kontakt med kalciumjoner bildas primitiv C-S-H av samma typ som på cementklinkerkornen. Vid cementreaktionen frigörs SiO_4^{4-} från alit och belit och reagerar med Ca^{2+} från porlösningarna. Skillnaden är att när det gäller vattenglas så sker reaktionen i porlösningarna, vilket "gelar" cementpastan och ger tillstyvnandet. Vid cementreaktionen sker under öppethållandetiden samma reaktion på cementkornens yta. Kalciumet kommer från den tidiga hydratationen av cementkornet och då detta konsumeras av vattenglas kommer tidpunkten för accelerationsperioden att förändras. Ett problem med vattenglas är att det höjer alkalihalten i porlösningarna så att risken för alkalisilikatreaktion ökar.

2.2.1.2 Alkaliaccelerator

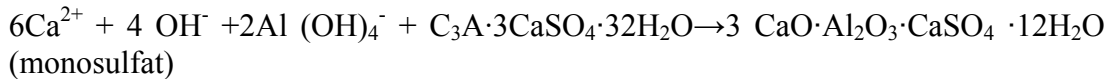
Den alkalihaltiga acceleratoren är en lösning vars huvudbeståndsdel är natrium- eller kaliumaluminat. Ofta innehåller den även en del vattenglas och alkalikarbonater.

- Natriumaluminat $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$
- Kaliumaluminat $\text{K}[\text{Al}(\text{OH})_4]$
- Alkalikarbonat $\text{Na}, \text{K}_2(\text{CO}_3)$

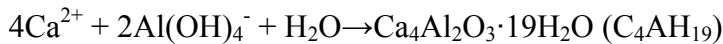
Vid kontakt med den unga cementporlösningen kommer alkalialuminaten att bilda ettringit med gipset från cementet.



Bildningen av ettringit kräver relativt mycket sulfat. När mängden sulfat blir mindre än mängden aluminatjoner bildas i stället monosulfat som kräver mindre sulfat och vid ytterligare sänkning av sulfathalten kommer en del av ettringiten att omvandlas till monosulfat.

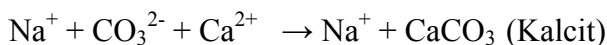


Sulfathalten är dock i allmänhet för låg för att binda all alkalialuminat varför det i stället bildas kalciumaluminathydrat samma som vid falsk bindning.



Man kan anta att ettringit, monosulfat och kalciumaluminathydrat kommer att befinna sig i någon typ av jämvikt och att mängden av de olika faserna beror på tillgång till sulfat och aluminat (Ca-joner finns alltid i överskott). Sulfaten i cement blir tillgänglig snabbt medan aluminat frigörs när C₃A från cementet hydratiserar. Detta medför att man kommer att få fasomvandlingar som påverkar volymen. Nedbrytning av ettringit frigör vatten och ger en kemisk krympning vid uttorkning. Vid tillgång på vatten och tillförsel av sulfat sker i stället bildning av ettringit och en svällning. Detta är det klassiska sulfatangreppet. Detta medför att en sprutbetong med alkaliaccelerator blir känslig för sulfatangrepp. Vid användning av sulfatresistent cement som anläggningscement kommer alkaliacceleratoren att göra blandningen känslig för sulfatangrepp. Dessutom ger alkaliacceleratoren ett tillskott av alkalier som gör betongen mer alkalireaktiv vilket ställer högre krav på att ballasten har kontrollerats för alkalireaktivitet.

Alkalikarbonater är lösliga och reagerar med Ca-joner från porlösningen vilket faller ut kalcitkristaller (kalciumkarbonat) som också får betongen att tillstyvna.



Även denna komponent gör betongen mera känslig för alkalireaktiv ballast.

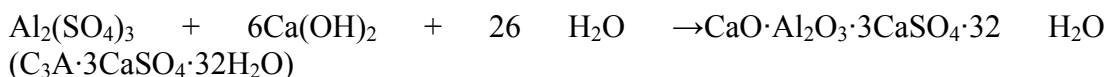
2.2.1.3 Alkalifri accelerator

Det finns olika varianter av den alkalifria acceleratoren. I grunden innehåller de i olika mängd

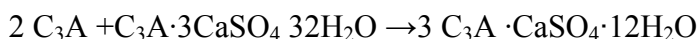
- Amorf aluminiumhydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$
- Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Aluminiumklorid AlCl_3

I grunden bygger den alkalifria acceleratoren på kalcium-aluminat-sulfatreaktionerna liksom alkaliacceleratoren. Skillnaden från de alkaliska tillstyvnadsacceleratorerna är förutom avsaknaden av alkalier att de alkalifria innehåller sulfatjoner. Detta medför att man slipper en del av problemen med beständighet (se ovan). Problemet med den alkalifria acceleratoren har varit att kunna lösa tillräckligt med aluminiumsulfat i vatten. I de olika varumärkena har man löst detta problem på olika sätt. Hur man löst det är en affärshemlighet men man vet att en del av dem innehåller organiska komponenter (Af-2).

Huvudkomponenten är aluminiumsulfat. Både aluminat- och sulfatjonerna reagerar med kalciumjoner i den alkalina (högt pH) porlösningen. Det bildas flera olika faser (Bürge 2001). Dessa reaktioner sker också i den vanliga betongen men proportionerna blir olika. Den viktigaste reaktionen är den som bildar mineralet ettringit.



Om sulfathalten är för låg bildas monosulfat



Vid ännu lägre halt sulfat bildas kalciumaluminathydrat (C_4AH_{19}) samma som vid falsk bindning, men man kan anta att sulfathalten är tillräckligt hög för att förhindra att denna fas bildas.

Skillnaden mot alkaliacceleratoren är framför allt att den alkalifria innehåller sulfat. Sulfathalten i porlösningen är alltid hög i början, dels på grund av gipsens höga löslighet dels på grund av att det finns sulfat i aluminiumsulfaten från början. Om halten sulfat är för låg eller halten aluminiumhydroxid för hög omvandlas en del av ettringiten med tiden till monosulfat och/eller hydrogranat.

Den alkalifria acceleratoren påverkar cementreaktionerna dels genom att kraftigt sänka halten Ca-joner under öppethållandetiden, vilket i sin tur kommer att påverka när accelerationsperioden påbörjas, dels genom att påverka strukturen på den tidiga hydratstrukturen, vilket också kommer att påverka accelerationsperioden. Därför kan man inte utgå från att systemet med avseende på tidsförloppet blir samma.

Ettringit som är en mycket vattenrik produkt bildas dels på ytan av cementkornen dels som en nätverklignande struktur i vätskefasen. Denna reaktion som är snabb medför att betongen får mindre fritt vatten och att den förlorar sin rörlighet genom den struktur som byggs upp i vätskan mellan cementkornen. Styrkan är låg, endast några MPa, och beror på mängden tillsatt accelerator. Med tiden börjar accelerationsperioden, cementkornen börjar hydratisera på allvar och fylla ut utrymmet mellan ettringitnålarna. Mikroskopiundersökningar (Xi & Stark 2005) visar att ettringiten rekristalliserar och ändrar struktur från en finkornig massa till mera nålformade kristaller med tiden. Detta kommer att ge en större ordning, vilket påverkar styrkan, men det kommer även att påverka vattenbalansen.

I allmänhet innehåller den alkalifria acceleratoren även andra komponenter än alkalisulfat för att få en bra styrning av tillstyvnadsförloppet. Aluminiumklorid (AlCl_3) tillsätts antagligen då kloridjoner ger en snabb hållfasthetsutveckling. Exakt vad och i vilken proportion som tillstyvnadsacceleratorerna innehåller olika komponenter är en affärshemlighet.

En intressant observation som vi tidigare gjort är att kraftig utveckling av ettringit kan ge problem. I experiment med aluminatrika, extremt finmalda injekteringscement fick vi tidig massiv ettringitbildning och störningar vilket gav en kraftig retardation av hållfasthetstillväxten (Fjällberg & Lagerblad 2003). Därför har detta undersökts närmare med hjälp av kalorimetri som registrerar värmeutvecklingen och därmed reaktionsförloppet.

2.3 Krympmekanismer i betong, speciellt sprutbetong

Betong krymper av många olika orsaker. Hur mycket de krymper och vilken konsekvens det ger beror på randvillkoren.

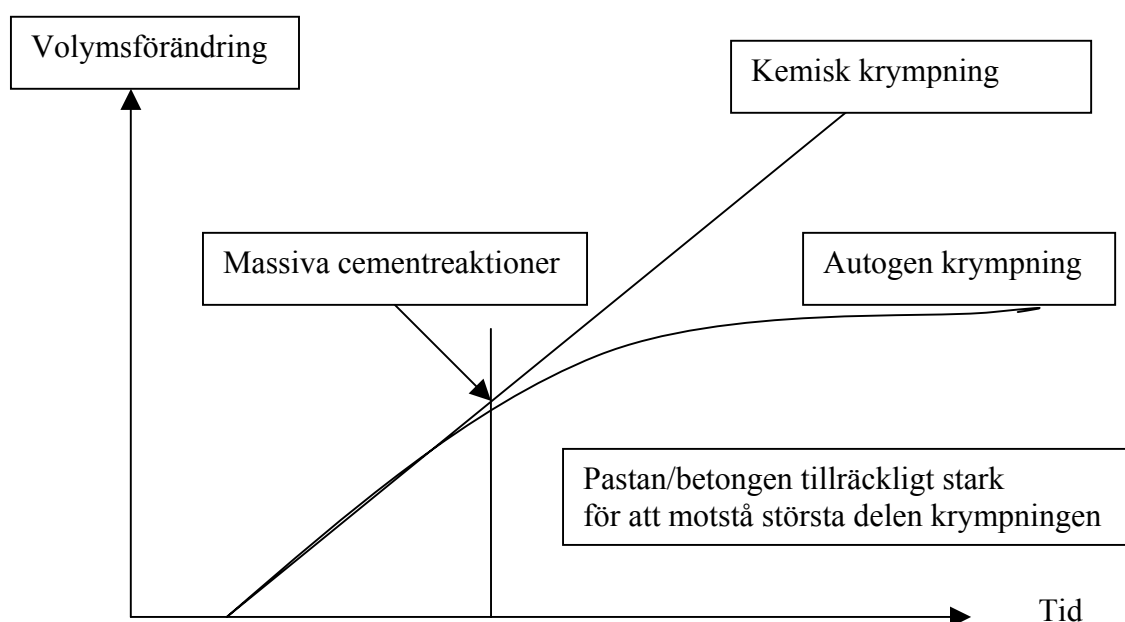
Sprutbetong skiljer sig från vanlig betong genom att den är styv nästan momentant. En bergvägg är normalt relativt kall vilket gör att den kyls snabbt. Man kan i allmänhet anta att fuktigheten är under 100 % RH även om man kan få en kraftig variation beroende på årstid och lokala förhållanden. Resultatet av krympningen i sin tur beror på bindningen och fasthållning.

Man får olika typer av krympning under de tre olika stadierna i betongs tillstyvnad; färsk, ung och hårdnad betong. Dessutom måste man ta hänsyn till om betongen förlorar vatten, är förseglad eller om den torkar i alla de tre tillstånden. En uttorkning ger krympning i alla tre stadierna vilket medför att man bör tillföra vatten (hårdning).

Man måste även beakta temperaturvariation och de spänningar som detta ger upphov till. I vanlig betong ger hydratationen upphov till en värmeökning vilket expanderar den unga betongen. Senare när betongen uppnått en högre styrka kommer betongen att svalna vilket ger en termisk krympning. När det gäller sprutbetong är den relativt varm när den appliceras. Tillstyvnadsacceleratoren ger ett tidigt extra energitillskott vilket ger en initial temperaturförhöjning. Bergväggen eller dränermattorna kommer att vara kallare än betongen. Detta ger, speciellt som sprutbetongen momentant blir styv, upphov till en snabb nerkylning och en tidig temperaturkontraktion. En temperatursänkning på 10 grader, vilket ger ett realistiskt belopp, ger i en fast kropp en endimensionell krympning på ca 0.1 ‰. När den verkliga hydratationen startar (efter något dygn med anläggningscement) kommer en värmepuls som ger en expansion och en efterföljande kontraktion. Man kan dock anta att värmen i en tunn sprutbetong relativt snabbt leds bort.

2.3.1 Kemisk och autogen krympning

Basen i den autogena krympningen är den kemiska krympningen. Denna beror på att volymen av hydratiserad cementpasta är mindre än den hos cement och vatten. Volymminskningen är ca 25 volym % av mängden förbrukat vatten. För en pasta med cement av typ anläggning och ett vct på 0,4 är slutkrympningen vid full hydratation ca 7-8 %. Hela denna volymminskning ger emellertid inte upphov till fysisk krympning. Detta beror på att när cementet börjar reagera så byggs det upp en struktur som motverkar krympningen. I det förseglade systemet ger cementreaktionerna upphov till ett undertryck varför den totala volymminskningen endast blir ett teoretiskt värde.



Figur 2.3. Skiss som illustrerar skillnaden mellan kemisk och autogen krympning.

Schematic picture illustrating the difference between chemical and autogeneous shrinkage.

Om man förseglar cementpasta och mäter volymen blir volymminskningen vid ett vct på 0,40 med ett cement liknande anläggningscement ca 0,5 vol. % (Justnes et al 1999, Hammar 1999) under öppethållandetiden. Detta ger pastan en endimensionell krympning (prisma) på ca 1,6 ‰.

Mätningar på färsk betong, där pastan endast utgör en mindre del med ett vct på 0,4 gav en endimensionell autogen krympning på ca 0,25 ‰. Holt & Leivo (1999).

Alla studier på autogen krympning är gjorda på vanlig betong och inte på sprutbetong. I vanlig färsk, förseglad betong får man en krympning (kemisk krympning), men denna blir av underordnad betydelse i praktiken då betongen är flytande och man får en sättning. I vanlig betong blir konsekvensen att betongen först

sedimenterar vilket ger en vattenhinna på toppen. När styrkan är tillräckligt hög kan inte betongen sätta sig och det uppstår ett undertryck som med tiden övergår i en ökad porositet. I sprutbetong får man ingen sedimentation och sättning eftersom betongen momentant blir styv. Den alkalifria acceleratoren konsumerar dessutom vatten, då ettringiten är mycket vattenrik. En beräkning ger att den alkalifria acceleratoren ger en nästan momentan volymminskning på 8,4 volym % som också måste tas med i beräkningen. Eftersom mängden är relativt liten ca 4 % (2 % torrsvikt) baserat på cementvikten blir dock dess effekt liten ($< 0,1$ ‰). Resultaten (se senare) på att den tidiga strukturen inte kan motverka krympningen varför tidig vattenhärdning är av största vikt.

Den kemiska krympningen fortsätter så länge det finns cement att hydratisera. Hastigheten avtar och den allt högre styrkan gör effekten mindre. Effekten blir istället en ökad porositet.

2.3.2 Uttorkningskrympning

Plastisk krympning är krympning orsakad av vattenförlust när betongen befinner sig i plastiskt tillstånd, innan det verkliga hårdnandet sker. Den kommer därför att pålagras den autogena krympningen som i grunden är en funktion av den kemiska krympningen.

Uttorkningskrympning är den krympning som betong ger när den torkar i hårdnat tillstånd.

I den hårdnade betongen övergår den plastiska krympningen i en uttorkningskrympning. Cementpastan är porös och när vatten lämnar betongen drar porerna ihop sig vilket får betongen att krympa. Uttorkningskrympningen kommer att påbörjas när vattenhärdningen avslutas och hastigheten beror på RH i omgivande luft. Mekanismen bakom denna krympning antas vara meniskbildning i kapillärsystemet vilket ger en sammandragning. Krympbeloppet är avhängigt framför allt vct och mängd vatten i blandningen. Även om vct är relativt lågt i sprutbetong är mängden pasta relativt hög. Dessutom kan man förmoda att kapillärsystemet i sprutbetong inte är samma som i vanlig gjuten betong vilket visas senare. En väsentlig skillnad är att sprutbetongen i motsats till vanlig gjuten betong är styv momentant.

2.3.3 Krympreducerare

Krympreducerare började utvecklas i Japan i början på 1980-talet. Det är i grunden olika typer av alkoholer som ofta är polyoler. De anats främst verka genom att sänka ytspänningen i porvattnet varigenom miniskbildningen i porerna minskar vilket i sin tur minskar krympningen. Krympreducerare och dess funktion finns beskriven i Fjällberg (2002).

2.4 Sprutbetongs reologiska egenskaper

Det finns två principiellt skilda metoder för applicering av sprutbetong; torr- respektive våtmetoden. I den här rapporten beaktas endast våtsprutad betong.

Vid våtsprutmetoden blandas alla delmaterial, inklusive vatten och eventuella tillsatsmedel, varefter betongen pumpas till munstycket. Vid munstycket tillförs tillstyvnadsaccelerator samt tryckluft som skjuter iväg betongen mot underlaget. För att en betong skall kunna appliceras med våtmetoden måste den således vara både pumpbar och sprutbar. Det råder dock alltid ett visst motsatsförhållande mellan de båda egenskaperna då olika krav ställs på den färska betongmassan. När pumpbarheten ökar (större sättmått), försämras betongens sprutbarhet (förmågan att sprutas i tjocka skikt) och vice versa (Beaupré 1994).

När det gäller sprutbarhet måste man även beakta tillstyvnadsacceleratorerna och dess effektivitet. De blandas med betongen i sprutmunstycket och ger en tillstyvnad vilket är en reologisk förändring. Tiden från munstycket till den sprutade ytan är ganska kort och man kan därför förmoda att förändringen under själva sprutningen är liten men att när betongen väl är på plats så sker en förändring som förhindrar betongmassan från att rinna av.

Båda pumpbarheten och betongens sprutbarhet är kopplade till dess reologiska egenskaper. I kapitlen nedan behandlas vilka reologiska egenskaper som är önskvärda hos betong för att erhålla god sprutbarhet. Inledningsvis ges en introduktion till reologibegreppet och de parametrar som brukar användas för att beskriva betongs reologiska egenskaper. Därefter tas inverkan av betongens reologiska egenskaper på sprutbarheten uttryckt som maximal skiktjocklek och återstuds upp.

2.4.1 Reologi

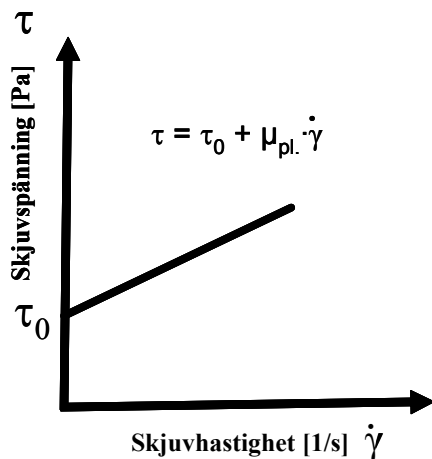
Reologi är en väletablerad vetenskap som används inom många olika industrier för att till exempel studera flytbeteendet hos ett material, simulera en process eller bedöma en produkts slutegenskaper. Inom cement och betongområdet används reologisk metodik ofta t.ex. vid studier av olika delmaterials inverkan på den färska betongmassan.

Definitionsmässigt är reologi ”läran om materiens deformations- och flytegenskaper”. Inom reologin behandlas samband mellan kraft, deformation och tid.

När betongs reologi studeras är man oftast intresserad av samband mellan skjuvhastighet ($\dot{\gamma}$) och skjuvspänning (τ). Det finns ett flertal modeller som kan användas för att beskriva pastors och betongs reologi. Banfill (2004). Gemensamt för samtliga modeller är att de indikerar att betongen har en flytgränsspänning. Den kanske mest allmänt accepterade modellen för beskrivning av betongs reologi är Bingham's vätskemodell. Med Bingham's vätskemodell beskrivs betongens

egenskaper med två parametrar; flytgränsspänning (τ_0) och plastisk viskositet ($\mu_{pl.}$). Flytgränsspänningen beskriver det initialmotstånd hos betongen som måste övervinnas innan betongen flyter. Relaterat till färsk betong, kan man säga att en betong med litet sättmått har en hög flytgränsspänning medan en betong med stort sättmått har en relativt låg flytgränsspänning. När betongen appliceras och kompakteras genom sprutning förfaller det vara önskvärt med en så hög flytgränsspänning som möjligt när betongen hamnat på substratets yta (se längre fram i texten). Om betongens egenskaper styrs så att flytgränsspänningen är hög bör den erforderliga doseringen av tillstyvnadsaccelerator kunna reduceras.

Viskositet är ett grundläggande begrepp inom reologin som beskriver den lätthet med vilken en vätska rör sig. Man kan även säga att viskositeten utgör ett mått på betongens inre friktion. Den plastiska viskositeten definieras som skjuvspänning dividerat med skjuvhastighet ($(\tau - \tau_0) / \dot{\gamma}$) och har SI-enheten Pascal sekund (Pa s). I Figur 2.4 beskrivs en Binghamvätskas flytbeteende och Binghamekvationen.



Figur 2.4. Bingham's vätskemodell.

The reological modell of Bingham.

Betongs flytgränsspänning och plastiska viskositet kan bestämmas med hjälp av en betongviskosimeter. Det finns ett flertal viskosimetrar med varierande mätsystem (koncentriska cylindrar, parallella plattor etc.) på marknaden. Gemensamt för de flesta betongviskosimetrar är att de är så kallade rotationsviskosimetrar. I en viskosimeter med ett koncentriskt mätsystem skjuvas betongen i den spalt som uppstår mellan cylindrarna genom att den yttre roteras med olika hastigheter. Samtidigt registreras den kraft som verkar på den inre cylindern i form av ett vridmoment. För betong erhålls ofta ett rätlinjigt samband mellan vridmomentet och rotationshastigheten. Skärningspunkten med y-axeln ger g-värdet och linjens lutning ger h-värdet (jämför med Binghamekvationen i Figur 2.4). Genom beaktande av mätsystemets geometri kan g-värdet och h-värdet räknas om till betongens flytgränsspänning respektive plastiska viskositet. Det är dock inte ovanligt att det är g-värdet och h-värdet som redovisas i litteraturen.

2.4.2 Sprutbetong

2.4.2.1 Sprutbarhet

En betongs sprutbarhet är en egenskap som beror på parametrar som dess förmåga att fästa på en yta (adhesion), att hålla samman och att byggas upp i tjocka skikt (kohesion) och mängden återstuds (rebound). I studier av Beaupré (1994) användes betongens förmåga att sprutas i tjocka skikt som ett mått på dess sprutbarhet. Betong som kan sprutas i tjocka skikt under en sprutning utan att falla ner på grund av låg adhesion eller kohesion anses därmed ha bra sprutbarhet. I andra tillämpningar där skiktjockleken är av mindre betydelse kan mängden återstuds utgöra ett mått på betongens sprutbarhet. I dessa fall uppvisar en betong med lite återstuds god sprutbarhet.

Maximal skiktjocklek (Build-up thickness)

Med den maximala skiktjockleken avses den tjocklek som kan sprutas med bibehållen adhesion och kohesion, dvs. utan att betongen släpper från substratet eller faller isär pga. sin egetyngd.

När betongen sprutas mot en vertikal vägg och appliceras nerifrån och upp är det normalt inte några problem att nå önskad skiktjocklek. Däremot kan det vara mer kritiskt i applikationer där betongen sprutas underifrån t.ex. i tak i tunnlar etc. Problem relaterade till små maximala skiktjocklekar är att betongen måste appliceras i flera lager för att nå erforderlig tjocklek utan att riskera att betongen faller ner på grund av låg kohesion. Beaupré (1996).

Den viktigaste parametern som styr betongens maximala skiktjocklek är dess sammansättning. Generellt ökar en betongs maximala skiktjocklek vid silikatillsats och användning av tillstyvnadsaccelerator. Betongens sammansättning har en direkt inverkan på betongens färska egenskaper och därmed maximala skiktjockleken.

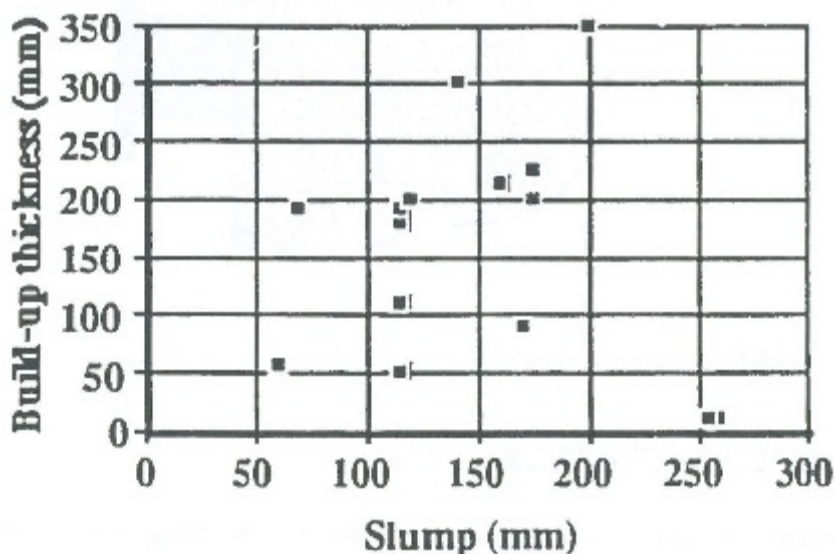
Samband mellan maximala skiktjockleken och betongens reologi

Beaupré (1994) rapporterade att antalet studier i litteraturen som berör sprutbetongs reologi var ytterst begränsat fram till och med 1993. Antalet träffar på våt sprutbetongs reologi i föreliggande litteraturstudie är också relativt begränsat (9 st).

Beaupré (1994) studerade samband mellan maximala skiktjockleken (sprutbarhet) hos sprutad betong och dess reologiska egenskaper (1994). Den maximala skiktjockleken mättes genom att spruta betonger vinkelrätt mot en vertikal provyta tills kohesionskrafterna överskridits och betongen föll isär. Därefter studerades betongernas reologiska egenskaper med en reometer (UBC Rheometer) samt genom att bestämma sättmättet. Provtagningen gick till så att betongen sprutades in i reometerens mätkärl varefter reologin karakteriserades. Detta förfarande utfördes förmodligen för att Beaupré var intresserad av betongens reologiska egenskaper efter att den pumpats och kompakterats vid sprutningen. I avhandlingen utvärderades en rad olika betongkvaliteter (vct, cementtyper, lufthalter), både med och utan stålfiber (Dramix 30/50, Bekaert Corporation).

Beauprés (1994, 1996) resultat visar att det inte är möjligt att förutse en betongs sprutbarhet/maximal skiktjocklek enbart genom att mäta dess sättmått före

pumpning och sprutning (Figur 2.5). Han drar dock slutsatsen att samband möjligtvis kan ses för betonger med samma sammansättning och lufthalt.

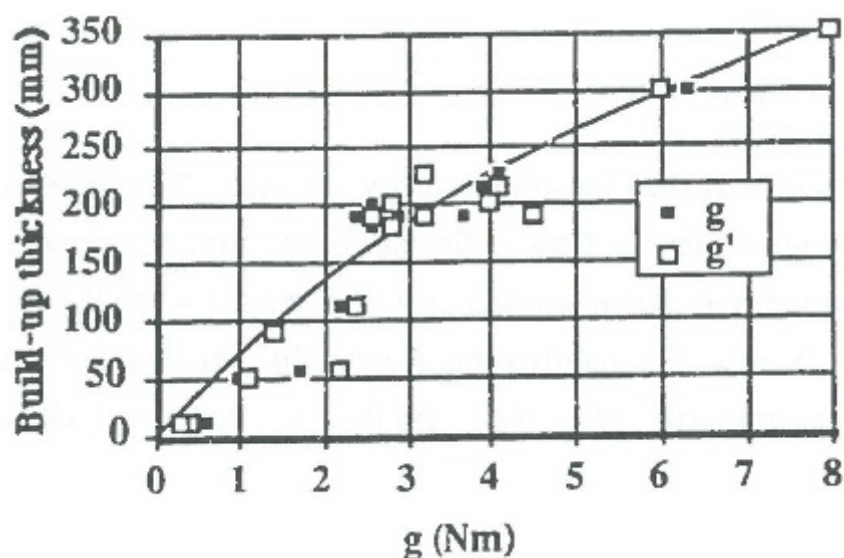


Figur 2.5. Samband mellan betongens sättmått före sprutning och den sprutade betongens maximala skiktjocklek. Från Beaupré 1994.

The relationship between slump before mixing and the maximum thickness of the shotcrete. From Beaupré 1994.

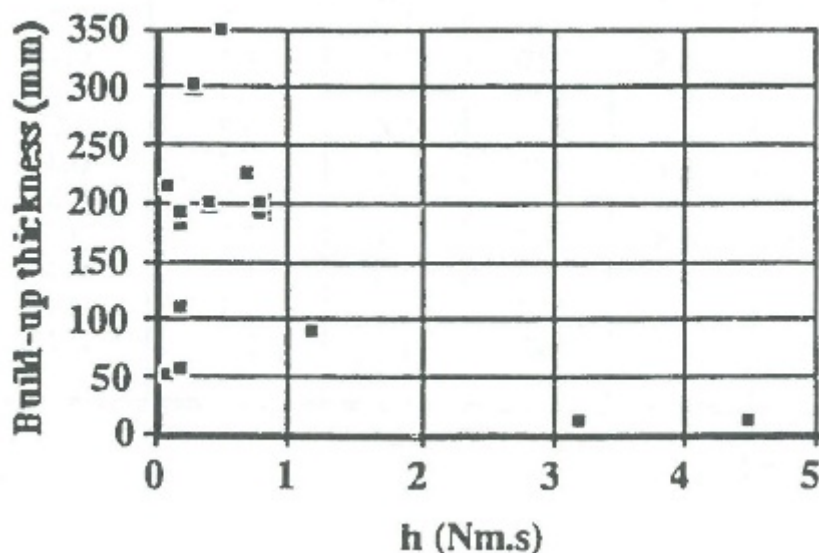
Däremot observerades ett bra samband mellan den sprutade betongens flytgränsspänning (uttryckt som g -värde) och den maximala skiktjockleken, dvs. ju högre flytgränsspänning desto tjockare skikt var det möjligt att spruta vid en kontinuerlig sprutning. Detta förefaller logiskt då betongens sammanhållning ökar med ökande flytgränsspänning som ett resultat av finpartiklarnas flockulering. Även Austin (1999, 2005) har observerat detta samband både för bruk och finbetong innehållande ballast med $d_{\max} = 3$ mm respektive $d_{\max} = 8$ mm.

Här måste man emellertid även beakta inverkan av tillstyvnadsacceleratoren som höjer flytgränsspänningen. Även om den sprutade betongen inte är påverkad så kommer den underliggande betongen att vara styvare. Tidfaktorn och acceleratoren effekt blir därför viktiga.



Figur 2.6. Samband mellan den sprutade betongens flytgränsspänning (flow resistance, g) och den maximala skiktjockleken. Från Beaupré (1994). *Relationship between the yield stress (flow resistance, g) and maximum build-up thickness of shotcrete.*

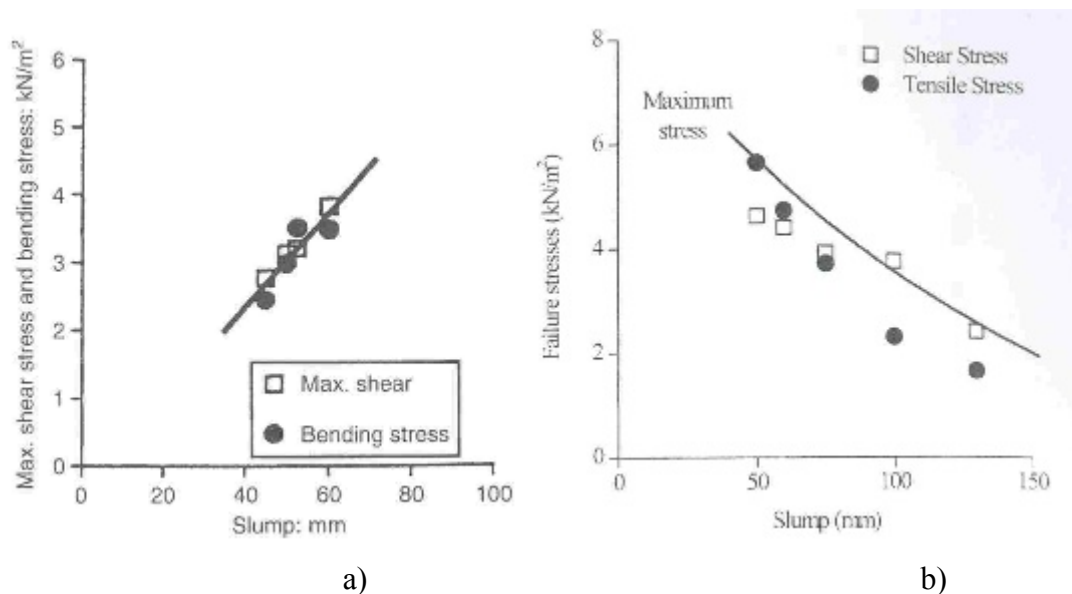
Beaupré kunde dock inte finna något tydligt samband mellan betongens viskositet (torque viscosity, h-värde) och dess förmåga att sprutas i tjocka skikt (Figur 2.7). Av resultaten framgår inte hur flytgränsspänningen varierade för de olika betongerna vilket skulle vara intressant information med hänsyn till resultaten i föregående Figur (2.6).



Figur 2.7. Samband mellan den sprutade betongens viskositet (torque viscosity) och den maximala skiktjockleken. Från Beaupré (1994).

Relationship between the viscosity of the concrete and the maximum build-up thickness of shotcrete. From Beaupré (1994).

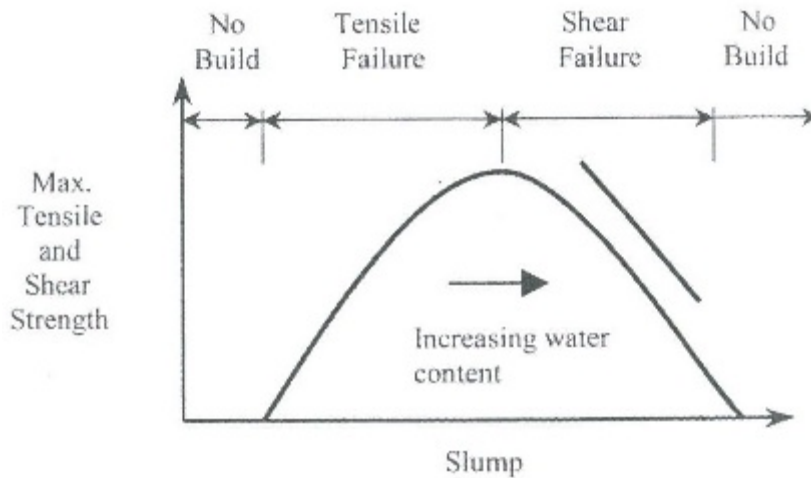
Austin (1999, 2005) med kollegor har redovisat resultat där den maximala skiktthjockleken (build-up) har beskrivits i termer av de skjuvspänningar och dragspänningar som bruk och betong utsätts för vid den maximala skiktthjockleken på grund av dess egenvikt. För små sättmått observerades att dragspänningen respektive skjuvspänningen vid den maximala skiktthjockleken ökade med ökande sättmått (Figur 2.8a). Detta kan intuitivt upplevas som motsägelsefullt, men författarna förklarade det utifrån de små sättmåten. Vid små sättmått har materialet inte de erforderliga kohesionsegenskaperna ("jordfuktig"; faller lätt isär) samt att det är för torrt för att ge tillräcklig vidhäftning till ytan. (Detta bör även inträffa vid överdosering av en effektiv tillstyvnadsaccelerator). Därmed byggs inte tjocka skikt upp och de resulterande spänningarna orsakade av materialets egenvikt blir relativt små. När sedan sättmättet ökar något förbättras kohesions- och adhesioneegenskaper varvid det är möjligt att spruta tjockare skikt, vilket i sin tur ger större spänningar vid den maximala skiktthjockleken. Den maximala skiktthjockleken och därmed spänningarna ökar dock bara till en viss punkt med ökande sättmått då betongen blir för lättflytande för att sitta kvar på ytan. Därefter minskar spänningarna vid den maximala skiktthjockleken med ökande sättmått (Figur 2.8b) då materialet blir mer och mer lättflytande.



Figur 2.8. Samband mellan betongens sättmått och de skjuvspänningar respektive dragspänningar (böjspänning) som betongen utsätts för vid den maximala skiktthjockleken på grund av dess egenvikt. Vänstra Figuren gäller för små sättmått medan den högra gäller för större sättmått. Från Austin (1999, 2005).

Relationship between the slump and the shear and bending stress that the shotcrete is subjected to at the maximum thickness due to its dead weight. The left figure is relevant for low slump while the one on the right hand side is relevant for larger slump (From Austin 1999, 2005).

I Figur 2.9 ges en schematisk beskrivning av hur drag- och skjuvspänningarna vid den maximala skiktjockleken förändras med betongens sättmått enligt Austin (2005).



Figur 2.9 Schematisk beskrivning av hur drag- och skjuvspänningarna förändras med sättmättet. Från Austin (2005).

Schematic description of how the tensile and shear strength are changed by the slump. From Austin (2005).

2.4.2.2 Återstuds

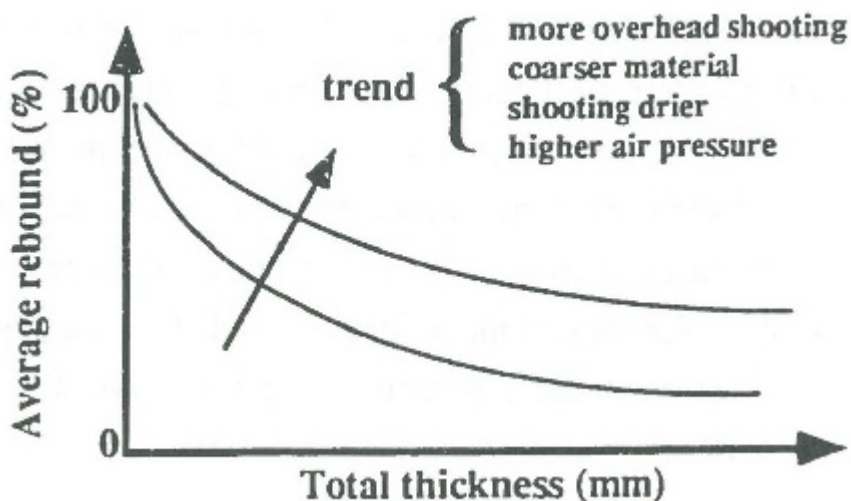
Återstuds kan definieras som den andel av den sprutade betongmassan som inte fäster till substratytan. Andelen återstuds kan variera inom ett stort spann där upp till 50 % återstuds rapporterats för torrsprutad betong (Armelin et al 1998). Andelen återstuds för våtsprutad betong är generellt lägre (Ballou 2003). Enligt Blindheim och Aagaard bör återstuds vara mindre än 10 % vid normala förhållanden och när sprutningen utförs av erfarna yrkesmän (Blindheim et al 1996). Större ballastkorn och fibrer har störst tendens att återstudsas (Ghio 1993). Fiberförlusterna på grund av återstuds kan utgöra 10 % till 30 % av totala fiberinnehållet (Blindheim 1996). Mängden återstuds påverkas både av använd sprutteknik och av den sprutade betongens sammansättning (Warner 1995, Beaupré 1994). Exempel på parametrar relaterade till sprutteknik:

- Vald metod : våt- eller torrsprutning
- Sprutposition
- Sprutvinkel
- Spruthastighet
- Tjocklek
- Armeringsförekomst

Parametrar relaterade till betongens sammansättning:

- Ballastmängd samt karakteristik (gradering, D_{max})
- Cementmängd
- Silikamängd
- Fibermängd

Återstudsens påverkas även av egenskaperna hos den sprutade ytan. I Figur 2.10 visas att återstudsens är som störst när betongen sprutas direkt mot en hård yta, men att den minskar till en konstant nivå när ett betongskikt med en viss tjocklek byggs upp. Det skall dock påpekas att återstudsens kan öka igen om t.ex. acceleratordoseringen ökas eller om man återgår till en yta för att påföra ett tjockare skikt då ytan kan ha hårdnat igen (Chandra & Taketo 1997). Vidare framgår av figuren att återstudsens ökar vid sprutning mot tak, med grövre ballast, när vattenhalten minskar och när höga lufttryck används. I Figueireda (1999) konstateras även att återstudsens kan reduceras om kontinuerlig ballastgradering används.



Figur 2.10 Inverkan av betongskiktets tjocklek på mängden återstuds. Från Parker (1976) refererat i Beaupré (1994).

Effect of the thickness of the concrete on the amount of rebound. From Parker 1976, referred to in Beaupré (1994).

Samband återstuds och betongens reologi

Beaupré (1994) kunde inte finna något direkt samband mellan mängden återstuds och betongens reologiska egenskaper, lufthalt eller pastavolym. I diskussionen skriver han dock att en betong med stort flytmotstånd borde ge mera återstuds än motsvarande betong med lågt flytmotstånd då mängden återstuds ökar vid sprutning mot en hård yta. Resultaten visar även på en tendens mot mindre återstuds med ökande vattencementtal. Detta har även Syrjänen (1996) påvisat. Resultaten från Syrjänen (1996) indikerar även att återstudsens minskar med ökande silikainnehåll. En ökning av vct leder generellt till att både betongens flytgränsspänning och

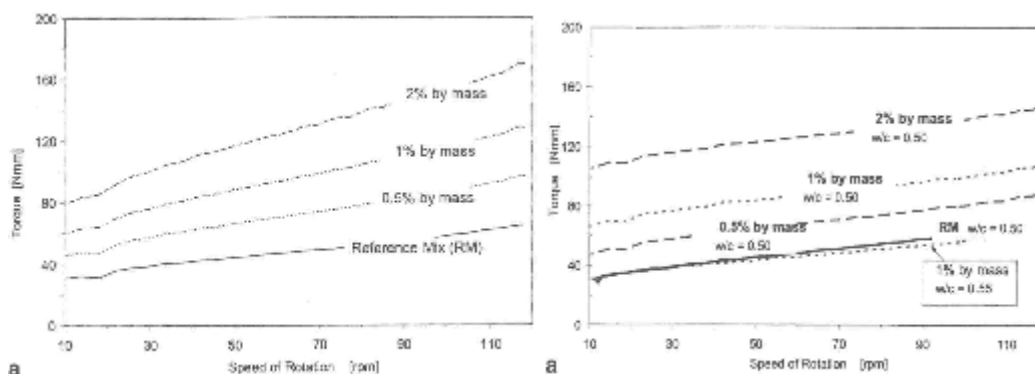
plastiska viskositet minskar. Silikatillsats i moderata mängder leder huvudsakligen till en sänkning av betongens plastiska viskositet (se längre fram i texten).

Pfeuffer och Kusterle (2001) skriver följande angående återstuds och sprutbetongs reologiska egenskaper:

- viskositeten bör vara så låg som möjligt för att säkerställa att ballastkornen tränger in i pastafasen och att en tät partikelpackning erhålls.
- Suspensionen (betongen eller bruket) bör uppvisa en lämplig flytgränsspänning så att den inte faller av substratets yta.

Även försöken som ovanstående forskare utfört på bruk ($D_{max} = 0,5$ mm) visar att återstuds minskar med ökande vatteninnehåll, en förändring av vct från 0,40 till 0,50 resulterade i mer än 50 % reduktion av återstuds. Resultaten förklaras med att vct-förändringen gör att viskositeten (och även flytgränsspänningen) minskar, vilket även verifieras genom mätningar av reologin, och enligt ovan är det därmed lättare för ballastkornen att tränga in i pastafasen och omslutas av den.

Pfeuffer och Kusterle (2001) utvärderade även inverkan av flytmedel och olika förtjockare, oorganiska respektive organiska, på bruks reologi och mängden återstuds. Resultaten visar att förtjockarna hade olika effekt på brukets reologiska egenskaper och mängden återstuds. Den organiska förtjockaren (xanthan) gav bruket både högre viskositet och flytgränsspänning medan tillsats av den oorganiska förtjockaren huvudsakligen ledde till en högre flytgränsspänning (Figur 2.11).

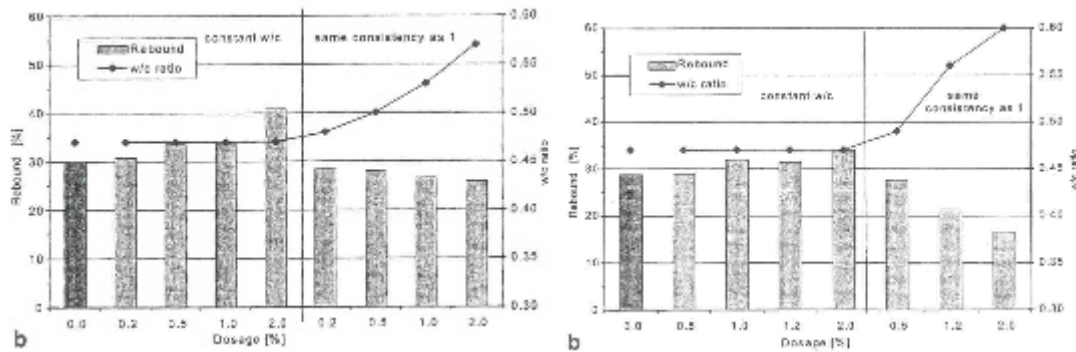


Figur 2.11 Inverkan av organisk (vänstra diagrammet) respektive oorganisk förtjockare (högra diagrammet) på bruks reologiska egenskaper. Flytgränsspänningen (g-värdet) ges av kurvans skärningspunkt med y-axeln medan viskositeten (h-värdet) ges av kurvans lutning. Från Ghio & Monterio (1998).

The influence of organic and inorganic thickeners on the rheological properties of a mortar. The yield stress (g-value) is given by the intersectional point with the Y-axis while the viscosity (h-value) is given by the fall of the curve. From Ghio & Monterio (1998).

Resultaten visade att återstuds var något högre för bruket med den organiska förtjockaren som gav både högre flytgränsspänning och viskositet (Figur 2.12). Av figuren framgår även att den organiska förtjockaren uppvisade ungefär samma återstuds när konsistensen justerades till den för referensen medan återstuds för den oorganiska minskade vid samma konsistens.

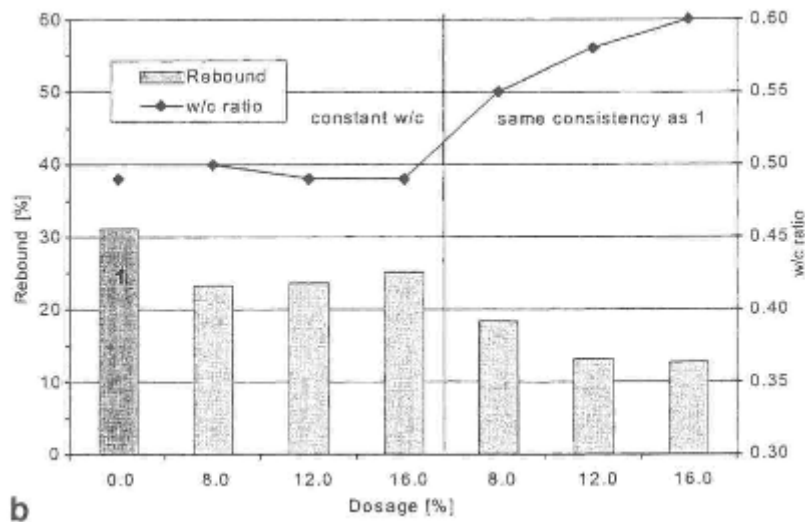
Ghio och Monteiro (1998) har också studerat inverkan av en förtjockare (polysackarid med molekylvikt på cirka 2 000 000) på sprutbetong. De observerade att pumpröcket reducerades när förtjockaren användes och att det gick att spruta betongen till högre höjder mot en vertikal vägg samt att vidhäftningen mellan betongen och armeringen förbättrades. Den positiva effekten av förtjockaren kopplades till dess reologiska egenskaper. Polysackariden uppvisar ett skjuvförtunnande beteende vilket innebär att viskositeten minskar med ökande skjuvhastighet. Det betyder att betongen uppvisar en relativt låg viskositet under själva pump- och sprutprocessen när betongen utsätts för höga skjuvhastigheter. Men när betongen sedan träffar substratytan och skjuvning avtar ökar betongens viskositet varvid betongens sammanhållning förbättras.



Figur 2.12. Inverkan av organisk respektive oorganisk förtjockare på sprutade bruks återstuds. Från Pfeuffer & Kusterle (2001).

The effect of organic and inorganic thickener on rebound. From Pfeuffer & Kusterle (2001).

Vidare undersökte Pfeuffer och Kusterle (2001) inverkan av olika mängder silika på bruks reologiska egenskaper och mängden återstuds. Resultaten visade att silikatillsats minskade återstuds vid konstant vct och att den minskade mer än 50 % vid samma konsistens som referensen (Figur 2.13). Resultaten från reologimätningarna visade entydigt att flytgränsspänningen ökade vid silikatillsatsen medan viskositeten minskade. Det betyder (enligt författarna och Beauprés resultat avseende maximal skiktjocklek) att silikas inverkan på reologin både förbättrar möjligheten att spruta bruket (eller betongen) i tjocka skikt samtidigt som återstuds minskar.



Figur 2.13. Inverkan av olika silikamängder (0, 8, 12, 16 %) på sprutbetongs återstuds vid konstant vct och vid samma konsistens som referensen. Från Warner (1995).

Effect of different amounts of silica fume (0, 8, 12, 16 %) on the rebound with constant w/c ratio and the same consistency. From Warner (1995).

Det är känt att en hög cementshalt och att silikatillsats minskar återstudsden på ett effektivt sätt (Melbye et. al 1994, 1993, Armelin & Banthia 1998). En konsekvens av en ökad cementshalt vid konstant vct är att viskositeten minskar. Därmed kan den minskade återstudsden vid en ökning av cementshalten delvis relateras till den lägre viskositeten och att ballastkornen därmed lättare penetrerar pastafasen och packas effektivare. En annan aspekt är att när cementshalten ökas reduceras ballastmängden (och även fibermängden i aktuella fall) med motsvarande volym vilket torde minska återstudsden då det huvudsakligen är ballasten som återstudsar.

2.4.2.3 Möjligheter att styra reologin

De resultat som Beaupré, Pfeuffer och Kusterle redovisat indikerar att de reologiska egenskaper som är önskvärda för att nå god sprutbarhet är en relativt hög flytgränsspänning samt en låg viskositet. Genom omsorgsfull proportionering och val av delmaterial kan betongens reologi styras till dessa egenskaper.

I Figur 2.14 & 2.15 redovisar Wallevik (2000) hur olika delmaterial påverkar konventionell betongs reologi. Av figuren framgår att genom att ersätta en del av cementet med silika kan viskositeten reduceras utan att flytgränsspänningen påverkas nämnvärt. Wallevik (2000) skriver att en 50 % minskning är möjlig att uppnå. Viskositeten minskar dock bara till en viss substitutionsgrad varefter både viskositeten och flytgränsspänningen ökar. Den substitutionsgrad där viskositeten börjar stiga beror på cementinnehållet och förmodligen även på vattenhalten.

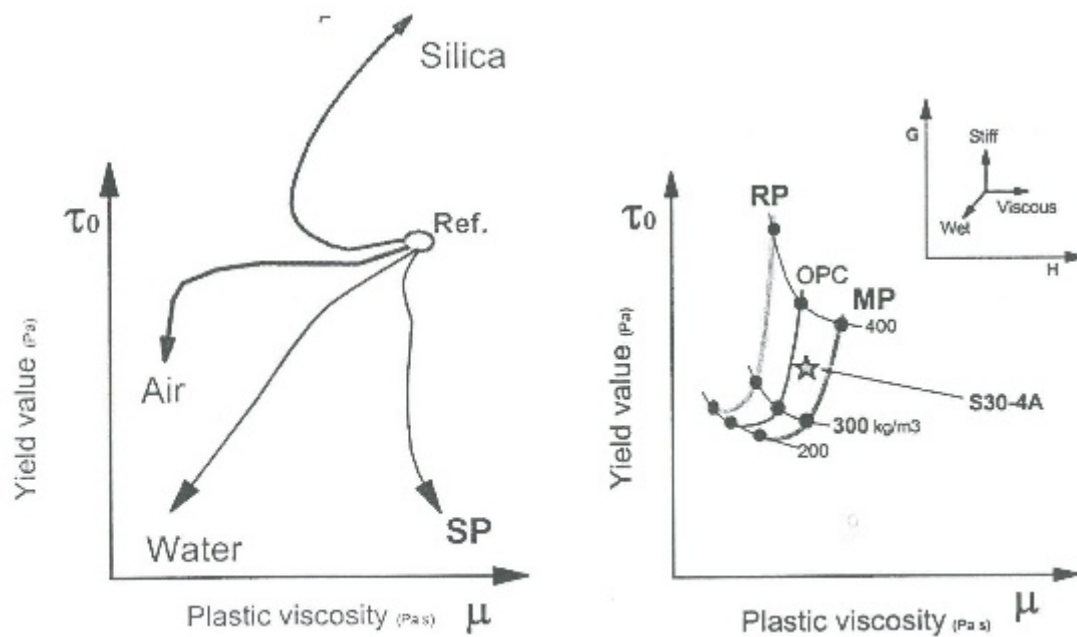
Vidare framgår att vattenhalten påverkar både flytgränsspänningen och den plastiska viskositeten. Vattenhalten är dock ofta fastställd pga. vct och beständighetskrav varför möjligheterna att variera den är begränsad.

En ökning av cementmängden vid konstant vattenhalt leder till både högre flytgränsspänning och plastisk viskositet. Om däremot vct hålls konstant torde en ökad cementmängd leda till att både viskositeten och flytgränsspänningen minskar. Vidare visas tydligt att valet av cement kan ge stora skillnader i reologi bland annat pga. olika finmaldhet.

Lufttillsats förbättrar normalt betongs arbetbarhet och sammanhållning. Av figuren framgår att lufttillsats leder till både lägre viskositet och flytgränsspänning.

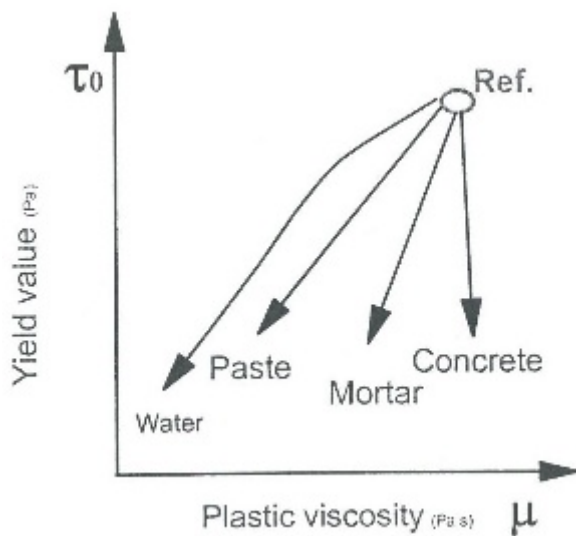
Flytmedelstillsats (SP) sänker huvudsakligen betongens flytgränsspänning genom att dispergera flockulerade finpartiklar. Effekten av flytmedel skiljer sig dock åt mellan betong, bruk och cementpasta. För bruk och cementpasta liknar effekten mer den för ökad vattentillsats, dvs. både flytgränsspänningen och viskositeten minskar. Det betyder att flytmedel även borde ge en viss sänkning av sprutbetongs viskositet då den kan sägas vara ett mellanting av bruk och betong då D_{max} ofta är begränsad till 8-12 mm på grund av pumpbarhetskrav och för att minimera återstudsden (Melbye et al 1994).

Utöver de möjligheter att styra betongs reologiska egenskaper som redovisas i Figur 2.14 & 2.15 kan även reologin kontrolleras genom tillsats av viskositetsmodifierare (förtjockare) eller tillsats av olika typer fillermaterial. Angående effekten av stålfiber på betongs reologi indikerar resultaten från Beauprés (1994) arbete att de har större inverkan på flytgränsspänningen (g-värdet) än på viskositeten.



Figur 2.14. Inverkan av olika delmaterial på betongs reologiska egenskaper. I den högra figuren visas inverkan av olika cementmängder samt cementsorter. Från Wallevik (2000).

The effect of different submaterials on the rheological properties of concrete. In the figure to the right the effect of different amounts of cement and types of cement is shown. From Wallevik (2000).

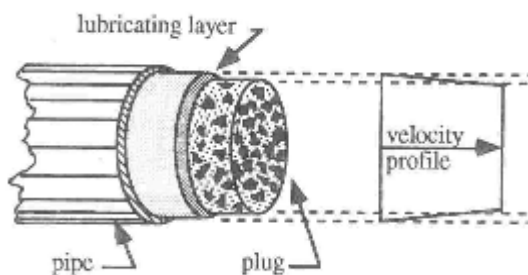


Figur 2.15. Inverkan av flytmedel på betongs, bruks och cementpastors reologi. Från Wallevik (2000).

The influence of superplasticizer on the rheological properties of concrete, mortar and cement pastes. From Wallevik (2000).

2.4.2.4 Pumpbarhet

För att betong skall kunna pumpas måste pumptrycket övervinna friktionen mellan betongen och rörets väggar, motstånd som uppstår vid böjar och sektionsförändringar (avsmalning), betongens tryck när den skall pumpas till nivåer över pumpen samt betongens tröghet (Cooke 1990). Betongs flöde i rör beskrivs som ett pluggflöde med ett tunt, smörjande, lager av cementpasta mellan rörets väggar och pluggen (Figur 2.16). Flödesmönstret kan förklaras av att betongen uppvisar en flytgränsspänning. Eftersom skjuvspänningen vid flöde avtar från rörets väggar mot rörets mitt bildas pluggen där skjuvspänningen är lika med flytgränsspänningen (Beaupré et. al 1993). I litteraturen anges 50 mm till 150 mm sättnått som ett lämpligt intervall för betong som skall pumpas (Beaupré et. al 1993, Syrjänen 1996).

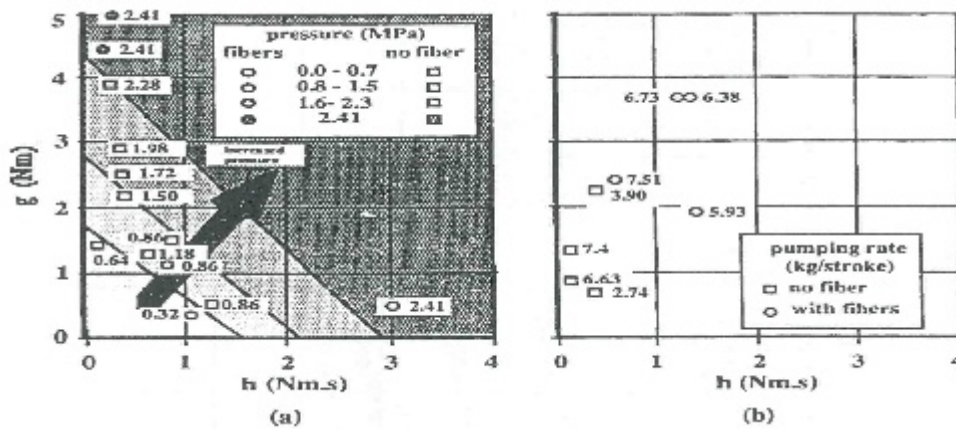


Figur.2.16. Betongflöde i rör. Från Brown et al (1977).

Flow of concrete in a tube. From Brown et al (1977).

Beaupré försökte etablera samband mellan betongens reologiska egenskaper och erforderligt pumptryck och pumphastighet. Resultaten från hans studie visar att det

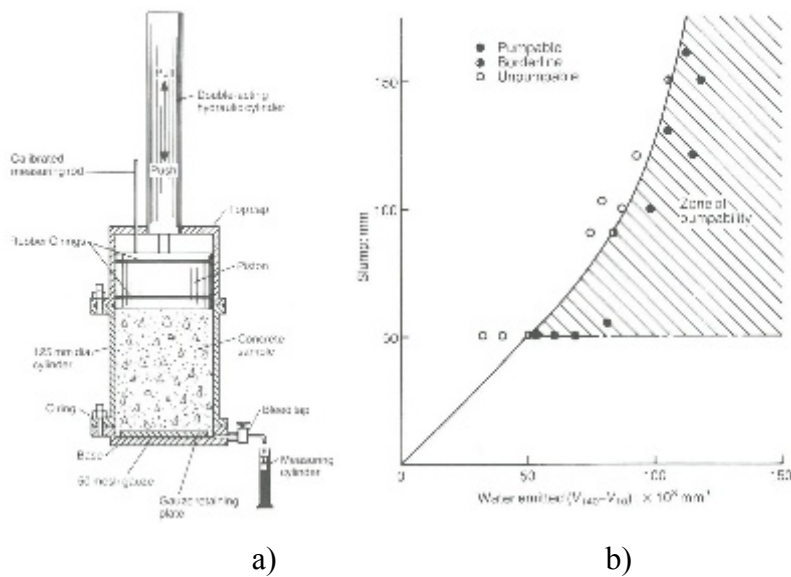
erforderliga pumptrycket ökar när betongens flytgränsspänning (g -värdet) och viskositet (h -värdet) ökar (Figur 2.17).



Figur 2.17 Samband mellan sprutbetongs reologiska egenskaper och erforderligt pumptryck (a) respektive pumphastighet (b). Från Beaupré (1994).

Relationship between the rheological properties of shotcrete and necessary pump pressure (a) and pumping rate. From Beaupré (1994).

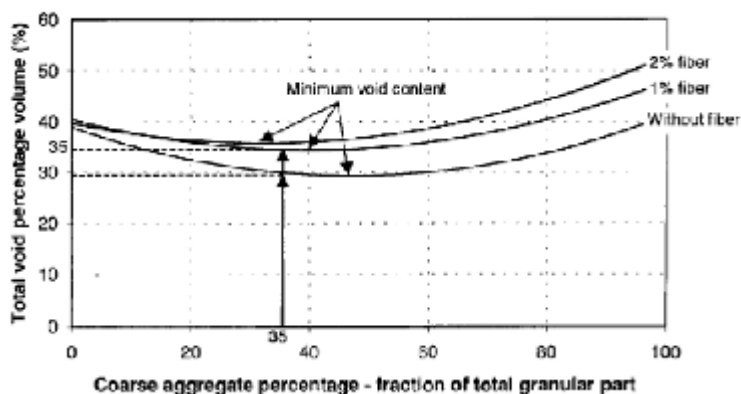
I Beaupré et al (1993) skrevs att det är logiskt att anta att pluggens area kommer att bli större vid höga flytgränsspänningar varvid betongen blir svårare att pumpa. Något samband mellan de reologiska egenskaperna och pumphastigheten kunde dock inte etableras. Däremot observerades ett samband mellan pumphastigheten och betongernas lufthalt där pumphastigheten minskade med ökande lufthalt. Det är förmodligen svårt att estimeras en betongs pumpbarhet enbart utifrån de reologiska parametrarna flytgränsspänning och viskositet då pumpbarheten även styrs av betongens stabilitet (motstånd mot vattenseparation) under tryck. "Pressure bleed" testet är ett exempel på en metod som kan ge en indikation på en betongs pumpbarhet (Figur 2.18a). Metoden bygger på att betongen utsätts för ett konstant tryck (35 bar) och vattenmängden som emitteras mäts vid olika tidsintervall. Den största vattenmängden emitteras under de första 140 s, därefter sker endast en mindre vattenavgång. För en betong som uppvisar en tendens till separation kommer den största mängden vatten att emitteras inom de 10 första sekunderna. Därför kan mängden vatten som emitteras i tidsintervallet mellan 10 s och 140 s ses som en indikation på betongens pumpbarhet. Ju större värde desto lättare är betongen att pumpa (Cooke 1990). I Figur 2.18b visas hur metoden kan användas tillsammans med sättningsmättet för att förutse en betongs pumpbarhet.



Figur 2.18 a) Pressure bleed testet. b) Samband mellan sättmättet, emitterat vatten och en betongs pumpbarhet. Från Cooke (1990)

a) Pressure bleed test. B) The relationship between slump, water emitted and pumpability. From Cooke (1990)

För att erhålla god pumpbarhet är proportionerna av ballastens finmaterial (<0,25 mm) och cement av avgörande betydelse (Cooke 1990). För betong med d_{\max} 8 mm och 16 mm rekommenderas ett totalt finmaterialinnehåll på 525 respektive 450 kg/m³. Mängderna och proportionerna av finmaterial och andra ballastfraktioner styrs dock av dess packningsegenskaper. Vid proportioneringen är det önskvärt att ballastens hålrumsvolym blir så liten som möjligt då det kräver minst pastamängd för att få betongen arbetbar. Utöver att pastan skall fylla ut hålrumsvolymen behövs ungefär 6 % extra pasta för att betongen skall vara arbetbar och pumpbar (Chapdelaine et. al 2000). Pastaöverskottet påverkas dock av ballastens kornform där stängliga och flakiga korn kräver ett större överskott. Även fiberarmerade betonger har ett större pastabehov då hålrumsvolymen förändras vid fibertillsats. I Figur 2.19 redovisas hur fibrer (polyolefin) påverkar både hålrumsvolymen och den optimala kombinationen av grov- och finballast (Chapdelaine et. al 2000). En konsekvens av detta är att fiberarmerad betong kommer att kräva en större pastavolym för att pumpbarheten skall bli bra alternativt en mer finmaterialrik ballast. En ökning av pastavolymen genom att öka cementmängden ger ökade kostnader och kan även få tekniska konsekvenser t.ex. krympning och beständighet. Den större hålrumsvolymen kan även kompenseras på andra sätt än genom att öka cementmängden. Ett sätt att öka pastavolymen är att tillsätta en luftporbildare. Beaupre har t.ex. använt luftporbildare för att både förbättra betongens pumpbarhet och sprutbarhet. I hans arbete provades betonger med lufthalter upp till 25 % Beaupré (1993). I Austins et al (2005) var betonger som hade en lufthalt större än 12,5 % svåra att pumpa och i vissa fall opumpbara.



Figur 2.19. Total hålrumsvolym vid olika kombinationer av sten och fiberinnehåll (volymprocent polyolefinfiber).

Total void content with different combinations of stone and steel fibres (volume % polyolefin fibres)

En annan möjlighet att öka ”pastavolymen” är att tillföra ett finkornigt tillsatsmaterial. Det är något som Wombacher et al (2003) delvis gjort. De utvärderade möjligheterna att tillverka sprutbetong med lågt cementinnehåll genom att använda flygaska och bränd oljeskiffer som ersättning. De undersökte huvudsakligen hållfasthetsutvecklingen och andra aspekter än betongens sprutbarhet (lakning av kalciumhydroxid, sulfater, vattenpermeabilitet etc.). Men resultaten visar att sprutbara betonger med cementinnehåll ner till 150 kg/m^3 kunde tillverkas genom att utnyttja mineraliska tillsatsmaterial och pumpförbättrande medel (högmolekylär polyetylenoxid). Deras generella slutsats var (fritt översatt): med hjälp av lämpliga tillsatsmaterial i kombination med flytmedel, pumpförbättrande medel och alkalifria acceleratorer är det möjligt att tillverka väl fungerande och beständiga sprutbetonger med upp till 50 procents reduktion av cementinnehållet.

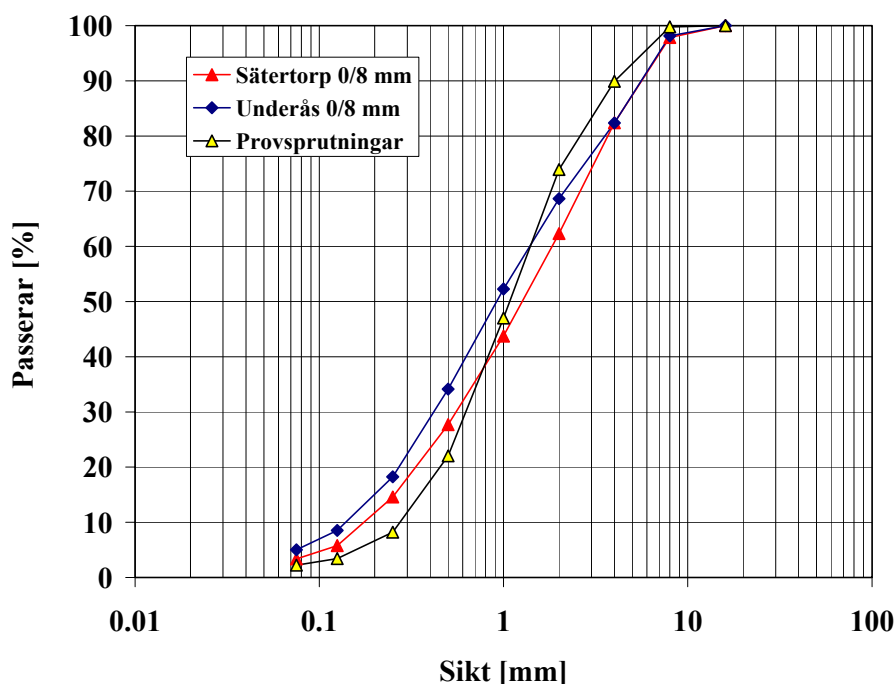
3 Undersökningsmetodik och material

Arbetet har syftat till att förstå och kunna minska krympningen hos sprutbetong. Detta fordrar dels en bättre förståelse för mekanismen dels åtgärder för att minska krympningen. Förståelsen ökar genom att undersöka dels hur de kemiska systemen i sprutbetong verkar, dels genom att undersöka strukturen hos sprutad betong. Materialundersökningen har huvudsakligen genomförts på pastaprover. Då man vet att krympningen är relaterad till mängden pasta i betongen har en stor del av arbetet inriktats mot att genom proportionering kunna minska pastamängden i sprutbetong.

3.1 Material

De material som använts i undersökningen har baserats på de som normalt används i sprutbetong i Sverige dvs, anläggningscement från Cementa AB (CEM I 42,5 BV/SR/L), silika från Elkem A/S (mikrosilika 940U) och naturgrus. Dessutom tillsattes superplasticerare och tre olika filler för att styra de reologiska egenskaperna.

I de inledande försöken vid CBI användes 0-8 mm grus från Jehanders anläggning i Enhörna. Under försökens gång bytte CBI grus till ett från Sättertorp. Vid provsprutningarna hos Vattenfall utveckling AB i Älvkarleby användes deras befintliga naturballast. Kornkurvor från de tre olika typerna redovisas i Figur 3.1.



Figur 3.1 Graderingskurvor hos använda ballastmaterial.

Sieve curves of the used aggregate materials (natural gravel).

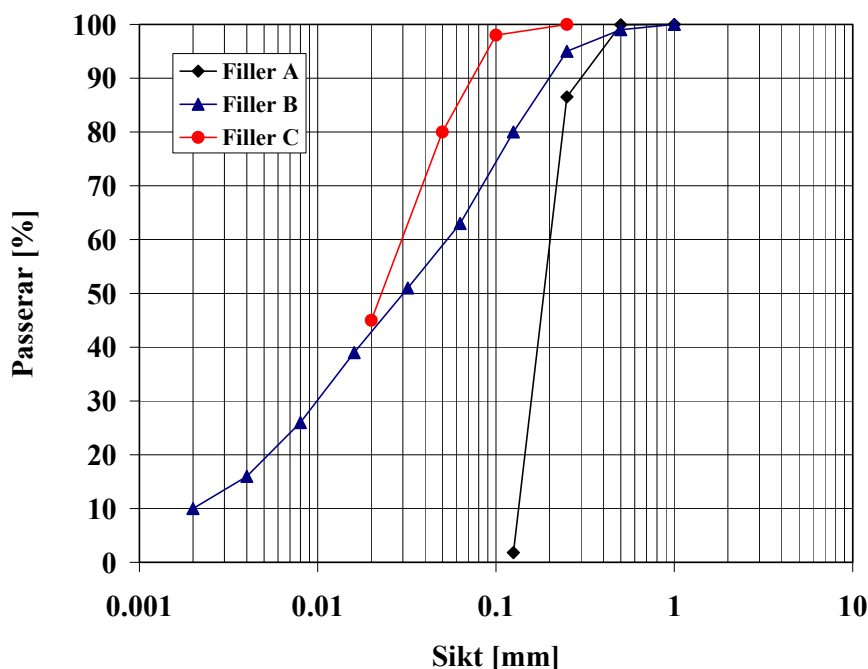
Filler

Filler A är en kvartssand (Öresundsand) som saluförs av Askania AB.

Filler B är en kristallin kalkfiller (Limus 40) som saluförs av Nordkalk AB. Enligt produktbladet uppgår den specifika ytan enligt BET-metoden till $1010 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Filler C är en kalciummagnesiumkarbonat (Dolomit C0-100) som saluförs av Omya AB. Den specifika yta enligt BET-metoden anges i produktbladet till $1500 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Graderingskurvorna för de använda fillermaterialen framgår av Figur 3.2. Kurvorna för Filler B och Filler C är hämtade från respektive produktblad och är troligtvis framtagna med någon lasersikt. Graderingskurvan för Filler A har bestämts genom mekanisk siktning på CBI. Finheten hos de olika fillermaterialen ökar i ordningen Filler A: Filler B: Filler C.



Figur 3.2. Graderingskurvor för använda filler.

Sieve curves for the used fillers.

Flytmedel

Glenium 51 användes vid betongprovningarna och provsprutningarna. Glenium 51 är ett flytmedel baserat på modifierade polykarboxylatetrar och saluförs av BASF Construction Chemicals Sverige. Rekommenderad dosering är enligt produktbladet 0,5-1,3 % av cementvikten.

Luftporbildare

Luftporbildaren Micro Air som saluförs av BASF Construction Chemicals Sverige användes i de betonger där förhöjd lufthalt önskades. Micro Air baseras på fettsyror/polyetylenglykol. Rekommenderad dosering är enligt produktbladet 0,05-0,3 % av cementvikten.

Krympreducerare

Sika Controll-40 användes som krympreducerare. Krympreduceraren saluförs av Sika Sverige AB. Vilken form av alkohol som ingår finns ej redovisat. Rekommenderad halt är ca 1-3 % av cementvikten.

Tillstyvnadsaccelerator

En alkalifri accelerator (Sigunit-L53 AF-S) från Sika Sverige AB användes vid pastaförsöken och provsprutningarna. Rekommenderad dosering är 2-10 % av cementvikten.

3.2 Metoder

3.2.1 Kemiska systemen

Det som är av intresse är hur hydratationssystemet utvecklas under inverkan av tillstyvnadsaccelerator och resultaten av denna hydratation i tid.

Cementrydratation är en exoterm reaktion varför man kan mäta hydratationförloppet genom hur mycket värme som avges. Värmeutvecklingen mättes på pastor med en isoterm kalorimeter vid 20°C. Vid mätningen hålls provets temperatur konstant, dvs. 20°C i detta fall. Den avgivna värmemängden registreras och anges i mW/g cement eller den ackumulerade som J/g cement.

Vilka produkter som bildas kan man registrera med hjälp av röntgendiffraktion. För kristallina ämnen får man toppar i ett diffraktogram. För vissa ämnen överlappar en del toppar varandra. Topparnas storlek är ett mått på mängden av ämnet i fråga vilket gör att man åtminstone semikvantitativt kan beräkna mängden. Alit (C_3S) har en ren topp vid $51,8^\circ 2\theta$, vilken har använts. Alit och belit (C_2S) har en dubbeltopp vid $31,5-33,2^\circ 2\theta$, vilken har använts för att bestämma hydratationsgraden för alit + belit. Vid bestämning av hydratationsgraden jämförs toppytorna med motsvarande toppar för ett ohydratiserat cement.

För ettringit, som är en hydratationsprodukt, har toppen vid $9,0^\circ 2\theta$ använts och för kalciumhydroxid, $Ca(OH)_2$ har topparna vid $18,0$ och $50,8^\circ 2\theta$ använts.

Undersökningen har utförts på cementpasta med inblandade komponenter. För analyserna har cementpastan mortlats till ett pulver. För analyserna utförda vid tidig ålder har hydratationen stoppats med alkohol och torkats vid 45°C.

3.2.2 Strukturen och strukturutveckling

Strukturen kan observeras visuellt med ögat och genom studier i svepelektronmikroskop (SEM) och med hjälp av tunnslip i polarisationsmikroskop. Syftet har varit att få fram texturen i den hårdnade sprutbetongen. I SEM har den hårdnade pastan undersökts under en tidssekvens. SEM arbetar under vakuum vilket gör att hydratationen avstannar och när man stoppar in provet vid olika tidpunkter så får man fram hur utvecklingen framskrider. Enbart prov med alkalifri accelerator har undersökts. Porstrukturen har även undersökts med hjälp av kvicksilverporosimetri. Denna metod bygger på att man under tryck i torra prov tvingar in kvicksilverånga i porsystemet. Med hjälp av detta kan man avläsa dels hur grovt porsystemet är, dels volymen på porsystemet. Metoden är något tveksam då den endast mäter i torra system medan man i verkligheten har ett porsystem som åtminstone delvis är vattenfyllt. Det ger dock en indikation på porsystemets geometri. Dessa undersökningar var utförda vid Tekniska Högskolan (Bauhaus) i Weimar, Tyskland.

Tryckhållfastheten vid 28 dygns ålder hos ett urval av de betonger som provades i laboratoriet provades enligt SS 13 72 10.

Tryckhållfastheten hos utsågade betongkuber (100mm sida) från de sprutade panelerna bestämdes vid 28 dygns ålder. Kuberna lagrades liksom krympbalkarna i 100 % relativ fuktighet under de första tolv dyggen och därefter i 50 % de följande dyggen fram till provtryckning.

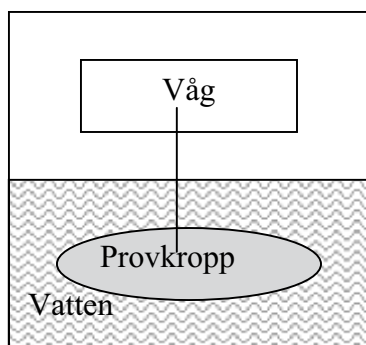
Tryckhållfastheten för cementpastaproverna bestämdes på prismor av dimensionen 40x40x160 mm³ vid ca 10 °C. Acceleratorerna blandades in i en halt av 7 % och krympreduceraren i en halt av 2 % och vct var 0,40. Tryckhållfastheten är ett medelvärde av två tryckningar.

3.2.3 Krympning

För att bestämma krympningen på sprutbetong måste man göra mätningen från det ögonblick som betongen sitter fast på berget. På berg kan man dock endast observera uppkomna sprickor. Basen i sprickbildningen är den s.k. fria krympningen som på berg kan ge olika konsekvenser och sprickmönster beroende på typ av fasthållning.

Som redovisats tidigare finns det flera typer av krympning. Varje typ kräver sin speciella metod. Med pyknometermetoder kan man avläsa den kemiska krympningen. Detta är dock inte gjort här då man ganska säkert vet beloppet och det exakta värdet för blandningen. En metod som både mäter den kemiska krympningen och den autogena krympningen är försegling av pasta i tunna elastiska gummin som sänkts ner i vatten. Krympningen ger en ökad densitet vilket ger en viktförändring (då den ligger i vatten). Viktförändringen har registrerats kontinuerligt och har omräknats till volymförändring. Metoden finns beskriven i Justnes et al (1999).

Den autogena krympningen mäts normalt med provet i flexibla rör med mät-dubbar. Mätningarna startar när betongen är tillräckligt styv för att kunna hanteras i mätutrustningen. Denna metod är dock svår att använda då man, grund av den snabba tillstyvnaden, inte får in sprutbetong i dessa rör.



Figur 3.3. Schematisk skiss över mätutrustning för kemisk och autogen krympning. En provkropp sänks ner i vatten och tyngdförändringen registreras. Viktförändringen kan översättas i densitet vilket i sin tur ger förändring i volym.

Schematic drawing of measurement equipment for chemical and autogeneous shrinkage. A body is submerged in water and the density difference is registered. The weight change can be translated to density, which in turn gives the volume difference.

Uttorkningskrympning mäts normalt på prismor som fått hårdna i fuktrum eller i vatten. Efter en viss tid placeras prismorna i klimatkammare med RH 50 eller 65 %. Betonger i Sverige mäts normalt enligt SS 13 72 15. När det gäller sprutbetong måste man såga ut prismor från hårdnad betong som vattenhårdats. Mät-dubbar limmas på.

Krympning mättes även på cementpasta med eller utan accelerator. Pastorna blandades i en Hobartblandare. Dels sprutades de med en tryckluftdriven målarspruta samtidigt som acceleratorm pumpades in med luften, dels blandades acceleratorm med blandningsvattnet, varefter blandningarna göts på vanligt sätt. De sprutade blandningarna sprutades direkt i gjutformarna och kompakterades lätt för att fylla ut formarna ordentligt. De blandade pastorna hälldes direkt i formarna och kompakterades. Prismornas dimensioner är 25x25x250 mm³ och vct var 0,40.

Endast till de sprutade blandningarna med Sigunit tillsattes flyttillsatsmedel (Sikament-EVO 26). Halten var 0,075 % av cementvikten. Då krympreducerare användes tillsattes den i blandningsvattnet i en halt på 2 % av cementvikten.

Prismorna avformades efter ett dygn och fukthärdades i 100 % RF. Av vissa blandningar fukthärdades en del prismor i 7 dygn och en del i 14 dygn innan de utsattes för uttorkning i 65 % RF. Vid krympmätningen vägdes också prismorna.

3.2.4 Reologi och arbetbarhet

Inom projektet har ett större antal betonger med varierande sammansättning (vct, cementmängd, tillsatsmedel, filler) utvärderats med avseende på deras arbetbarhet och reologi. Vid utvärderingen bestämdes betongernas sättmått enligt SS 13 71 21 och reologi med betongviskosimeter, se Figur 3.3. Viskosimeterns mätsystem består av koncentriska cylindrar där innercylinderns och yttercylinderns radie är 100 mm respektive 145 mm. Mätsystemet är optimerat för 16 mm ballast men går även att använda för mätning på betonger med upp till 22 mm ballast. Vid mätningen skjuvas bruket/betongen mellan cylindrarna genom att yttercylindern roteras enligt en förbestämd hastighetsprofil. Det genererade vridmomentet registreras kontinuerligt av innercylindern vilken ligger an mot en lastcell. Rotationshastigheten och vridmomentet kan räknas om till skjuvhastighet och skjuvspänning genom beaktande av mätsystemets dimensioner. Därefter appliceras Bingham's vätskemodell på nerkurvans mätvärden varvid flytgränsspänningen (τ_0) och den plastiska viskositeten (μ_{pl}) erhålles.



Figur 3.3 Betongviskosimeter, ConTec 4- SCC, för karakterisering av bruk och betong.

Concrete viscosimeter, ConTec 4-SCC, for characterisation of mortar and concrete.

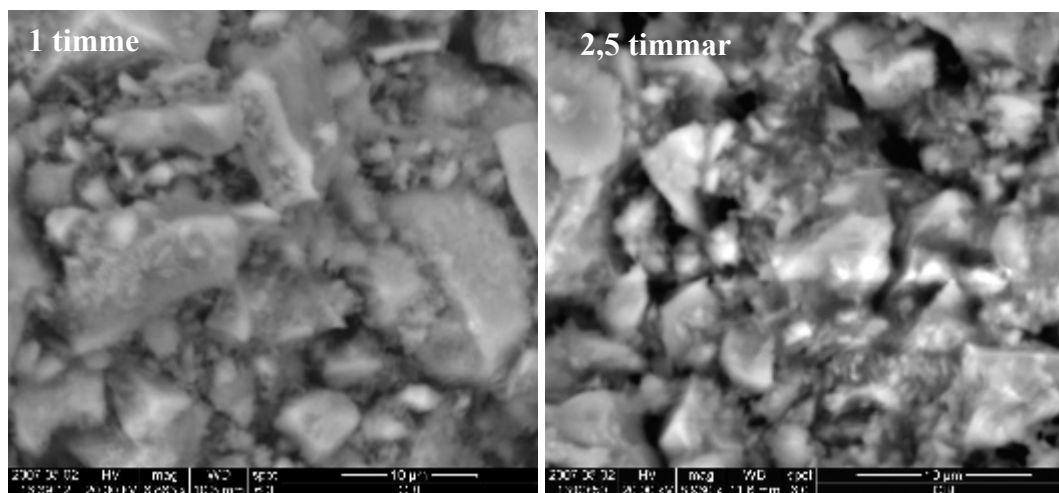
4 Resultat

4.1 Struktur hos pasta och sprutad betong

4.1.1 Mikrostrukturens utveckling

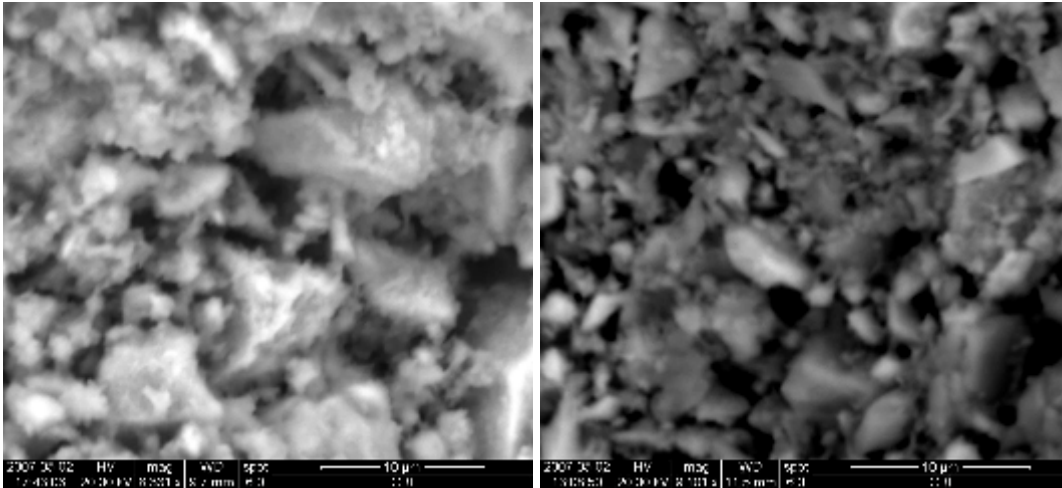
När en cementpasta blandas med en alkalifri tillstyvnadsaccelerator bestående av aluminiumsulfat bildas det ettringit (se kapitel 2.2.1.3). Vad SEM-bilderna visar är att efter en timme har det bildats ett nätverk av tunna strålförmiga ettringitnålar och en tunn hinna av cementshydrat på de enskilda cementkornen (Figur 4.1 & 4.2). Det sker mycket lite fram till 4,5 timmar. Efter 6,5 timmar kan man observera en signifikant ökning av mängden cementshydrat (Figur 4.2) vilket indikerar att själva accelerationsprocessen satt igång. Detta överensstämmer i stort med kalorimetern som visar att de massiva cementreaktionerna börjar efter ca 3 timmar och är i full gång vid 5 timmar. SEM observationerna med avseende på produkterna bekräftar i stort de observationer som gjorts av Xu och Stark (2005).

Bilderna visar att själva cementshydratationen sker inne i den av ettringit bildade lösa strukturen (Figur 4.2 & 4.3). I den hydratiserade cementpasta kan man inte observera några distinkta ettringitnålar vilket indikerar att de blivit en integrerad del av cementpasta. Ettringitnålarna kommer dock att bilda nukleationsytor vilket medför att man inte kan förvänta sig en inre struktur identisk med en vanligt hydratiserad cementpasta.



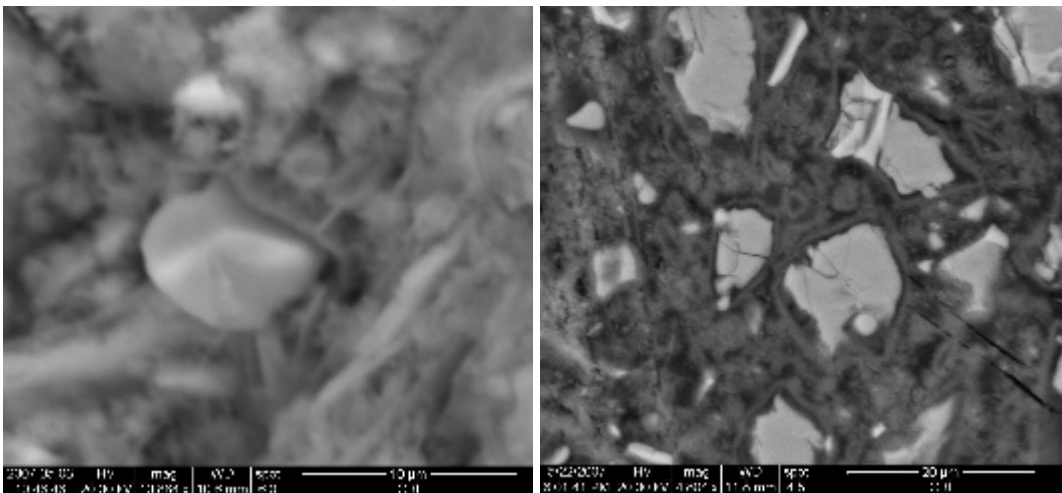
Figur 4.1. Brottyta från 1 och 2,5 timmar. Cementkorn som binds samman av ettringitnålar. Tunt skikt av cementshydrat på cementkornen.

Broken surface after 1 and 1.5 hours of hydration. The cement grains are bound together by ettringite needles. Thin layer of cement hydrates on the cement grains.



Figur 4.2. Brottyta från 4,5 och 6,5 timmar. Vid 6,5 timmar kan man observera en ökad bildning av cementhydrat på och mellan korn vilket tyder på att accelerationsperioden har börjat.

Broken surfaces after 4.5 and 6.5 hours of hydration. At 6.5 hours one can observe an increased formation of cement hydrates on and between cement grains which implies that the acceleration period has started.

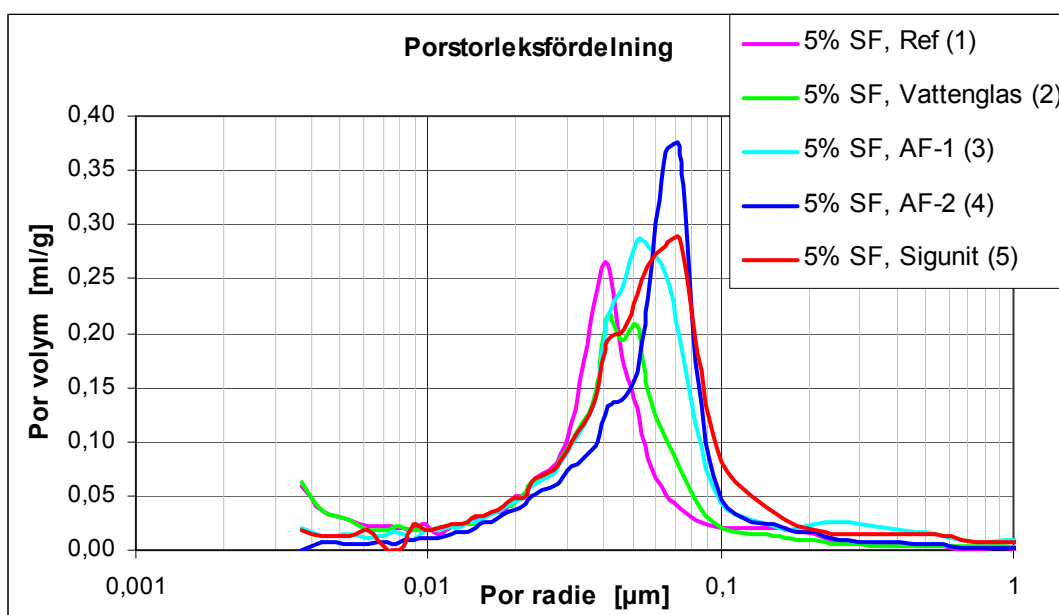


Figur 4.3. Snittad, ytstabiliserad och högpolerad yta vid 6,5 timmar (V.S) som visar en typisk cementpastedstruktur och brottyta vid 22 timmar (H.S) som visar en hårdnad cementpastedstruktur.

Cut, stabilised and high polish surface at 6.5 hours showing a typical cement paste structure. On the right side broken surface after 22 hours showing a typical structure of a hardened concrete.

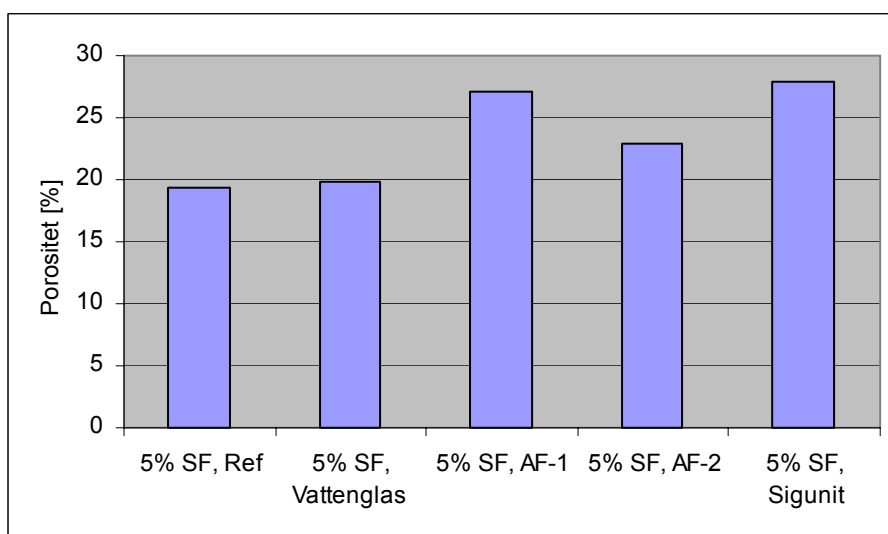
4.1.2 Porositet

Vi har även mätt porositeten med kvicksilverporosimetri på pastor (Figur 4.4 och 4.5). Undersökningarna, som gjordes i Weimar, utfördes på gamla sprutade pastor (SveBeFo rapport K24) som utsatts för uttorkning i mera än ett halvt år. Resultaten visar att tillstavnadsacceleratorerna och då speciellt de alkalifria ökar porositeten både när det gäller mängd och storlek på porerna. Tre typer av alkalifria acceleratorer undersöktes och alla gav samma resultat vilket tyder på att speciellt den alkalifria tillstavnadsacceleratorn ger en annan, grövre porstruktur, vilket i sin tur påverkar uttorkning och krympning.



Figur 4.4. Kvicksilverporosimetri. Porstorleksfördelning

Mercury porosity. Pore size distribution

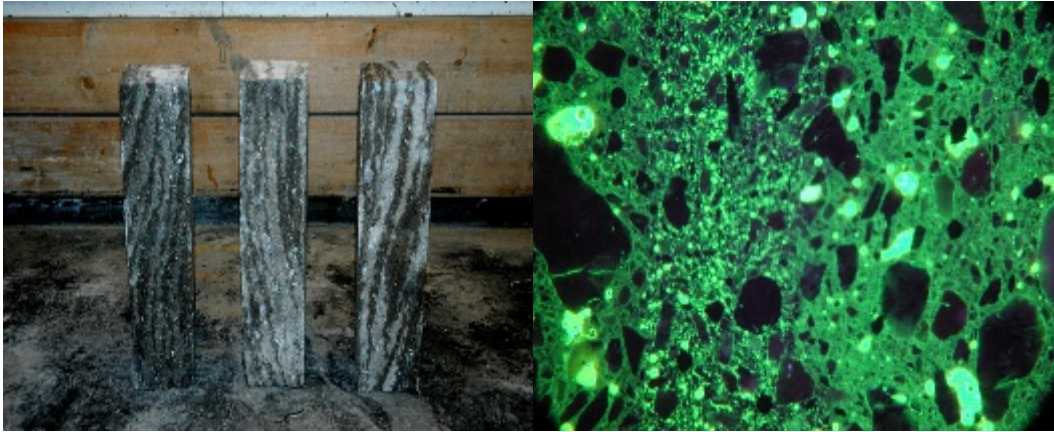


Figur 4.5. Kvicksilverporosimetri. Total porositet.

Mercury porosity. Total porosity

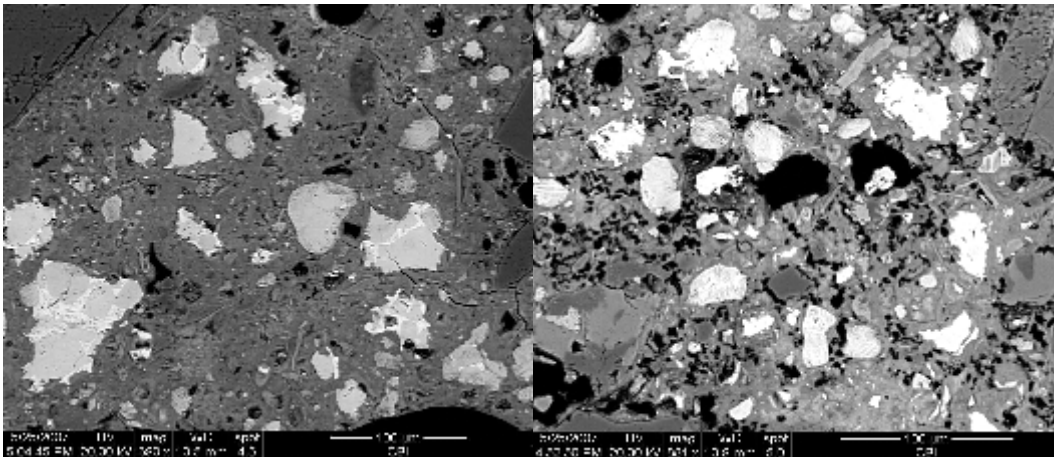
4.1.3 Sprutbetongens struktur

Om man observerar en snittyta av sprutbetongen kan man se att den är inhomogen (Figur 3.6). Denna sprutbetong är sprutad i fält på testplattor vid verkliga arbeten. Krympningen på dem är uppmätt (se kapitel 4.4.2.3, Figur 4.38). Inhomogeniteten är antagligen en funktion av själva spruttekniken. I större upplösning kan man se att detta även påverkar själva strukturen i mikroskala (Figur 4.7). Man kan observera mera homogena, täta delar och mera porösa delar. Detta i sin tur kommer att påverka krympningen och ge upphov till differentiella spänningar i materialet.



Figur 4.6. Vänster sida visar delvis fuktiga, utsågade prismor, som visar band mellan porösare och tätare betong. Höger sidan visar detaljer från fluorescens-epoxistabiliserat planslip, där porositeten och homogeniteten varierar.

Left side shows partly wet sawn prisms showing bands between porous and dense concrete. The picture on the right hand side shows details where the porosity varies.



Figur 4.7. SEM-foton av mera homogent(VS) och inhomogent(HS) parti av sprutbetong.

SEM photos of more homogeneous (left side) and inhomogeneous (right side) parts of a shot crete.

Skiktningen som är beroende av applikationstekniken ligger dock parallellt med den sprutade ytan vilket måste vara en fördel då vattnet får svårt att röra sig ut från de mera porösa lagren. Skiktningen medför antagligen att hållfastheten blir större i sprutrikningen än parallellt den sprutade ytan. Detta kommer att medför problem med uttorkning och krympning. Sprutbetong tappar vatten snabbare i mera porösa än i täta homogena partier. Vad effekten blir är svårt att förutse, speciellt då "randningen" ligger parallellt med den sprutade ytan.

4.2 Cementhydratation

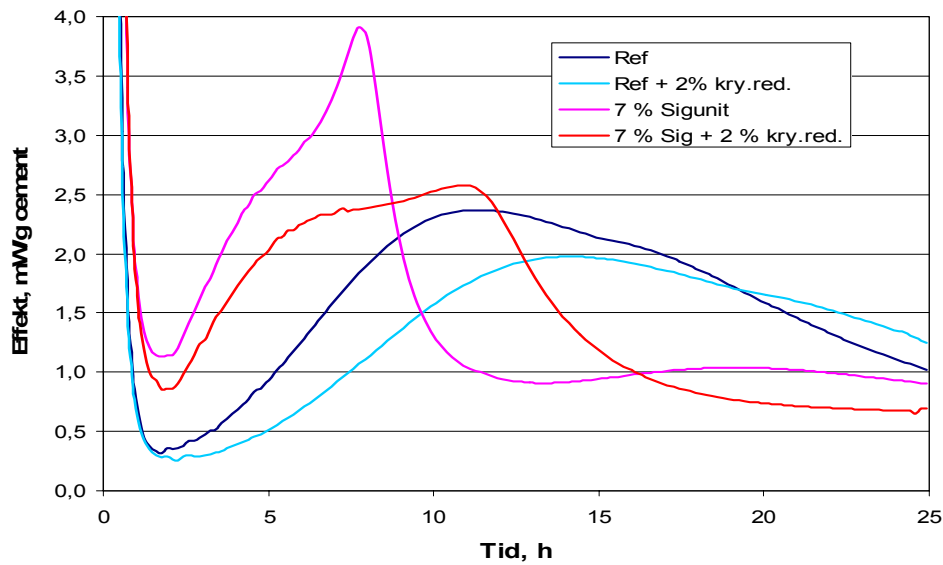
4.2.1 Cementhydratation-kalorimetri

Försök med kalorimeter är tidigare gjorda och rapporterade i SveBeFo rapport K24. De nu gjorda experimenten är komplement för att få nya referenser.

För att se hur acceleratorerna i sig och i kombination med krympreducerare påverkar den tidiga hydratationen gjordes några kalorimeterkörningar vid 20°C. Referensblandningen består endast av cement och vatten med vct på 0,40. Vid tillsats av accelerator och/eller krympreducerare har ingen korrektion gjorts för vatteninnehållet, utan samma vattenmängd har använts i samtliga blandningar. Resultaten ges i nedanstående figurer. Effekten på styrkan (Tabell 4.1) bekräftar resultaten från kalorimeterexperimenten.

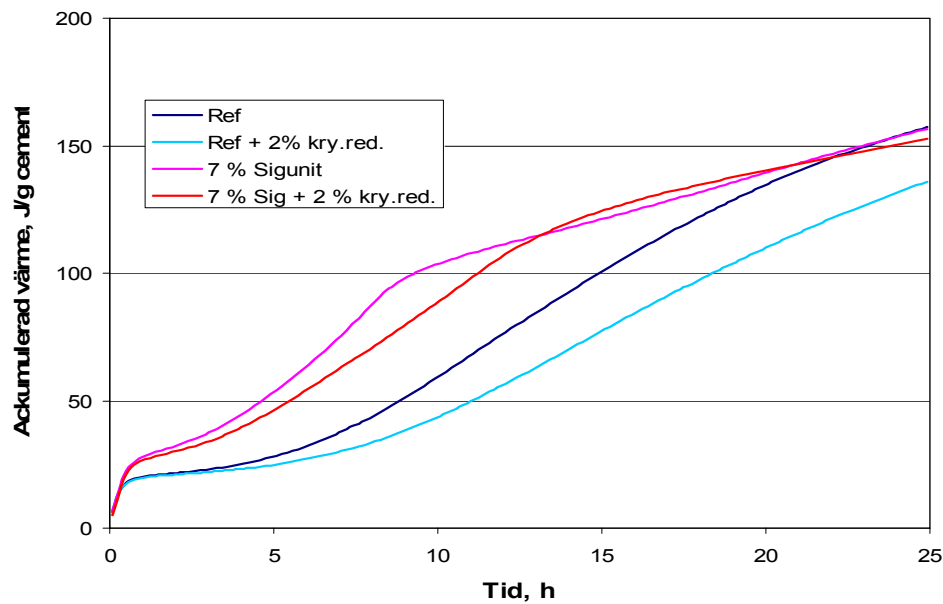
Krympreduceraren retarderar såsom i vanlig betong (Fjällberg 2002) hydratationen och styrkeutvecklingen. Undersökningar har även gjorts med vattenglas. I denna experimentserie höjdes emellertid halten av vattenglas till över rekommenderade halter och resultaten visade en kraftig retardation antagligen beroende på att man får störningar i hydratationssystemet. För bättre värden hänvisas därför till tidigare rapport (SveBeFo Rapport K24). Det är dock intressant att kunna konstatera att vattenglas har en max-dos som man inte bör överstiga, vilket även observerats i fält och är ett känt fenomen.

Även kalorimetrin visar att vattenglas i detta fall ger en retardation av de tidiga reaktionerna men i kombination med krympreducerare får man en acceleration. Siguniten påverkas inte lika mycket av krympreduceraren även om kurvans form förändras. Denna effekt av vattenglas har inte påvisats i den förra undersökningen och kan bero på den ökade doseringen (det gick inte att spruta pasta med lägre dosering).



Figur 4.8. Värmeutvecklingen för referens och Sigunit med respektive utan krympreducerare.

Heat release for reference paste and paste with Sigunit with and without shrinkage reducer.



Figur 4.9. Den ackumulerade värmeutvecklingen för referens och Sigunit med respektive utan krympreducerare.

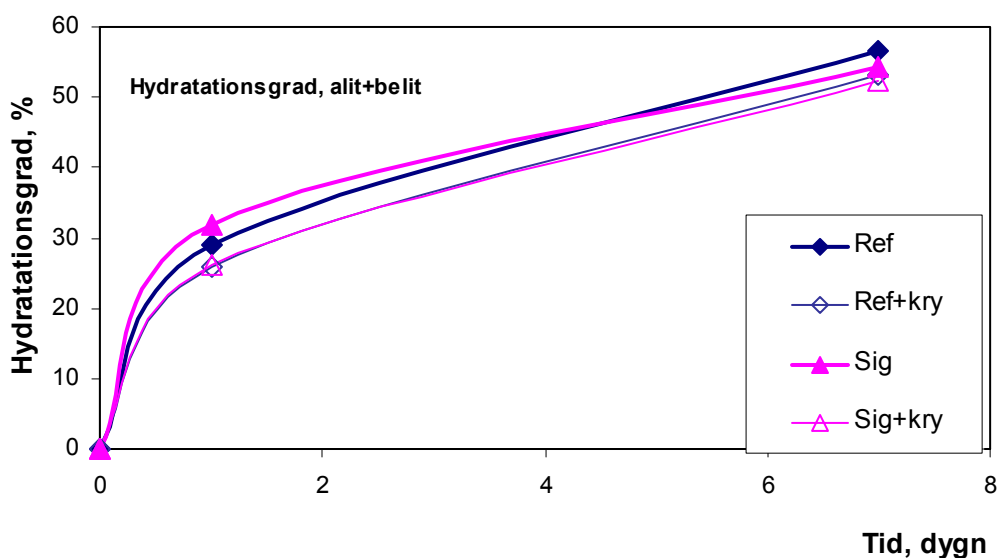
Accumulated heat release for reference sample and Sigunit with and without shrinkage reducer.

4.2.2 Cementshydratation – Röntgendiffraktion

Med röntgendiffraktometer får man en uppfattning om hur snabbt klinkermineralen reagerar och i vilken takt hydratationsprodukterna bildas. Den använda metodiken beräknar toppen och ytan under den och är semikvantitativ. Referensblandningen består endast av cement och vatten med vct 0,40. Vid tillsats av accelerator och/eller krympreducerare har ingen korrektion gjorts för vatteninnehållet, utan samma vattenmängd har använts i samtliga blandningar.

Intresset ligger i att se om reaktionerna sker i rätt ordning och om aluminatsystemet har utvecklats korrekt. Det är viktigt att ettringit är bildad när betongen styvnar då detta annars kan leda till sen ettringitbildning vilket i sin tur ger en expansion som fördärvar betongen. Undersökningarna med överdosering av vattenglas visade att både alit och belit reagerade långsamt och att halten av CH var för låg. Det tyder på att en överdosering av vattenglas spärrar hydratationssystemet generellt. Mängden ettringit var dock normal vilket tyder på att det endast är kalciumsilikatsystemet som retarderats av överdosering av vattenglas.

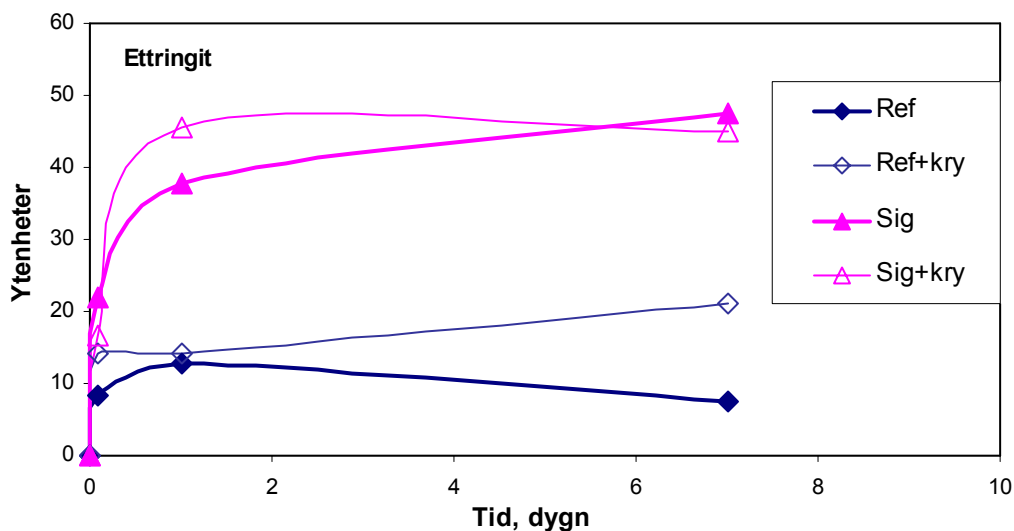
Med sigunit går hydratationen för kalciumsilikaterna alit och belit som det skall, medan krympreducerarna försenar hydratationen något. Detta är känt sedan tidigare (Fjällberg 2002). När man ser på utvecklingen av kalciumhydroxid (CH) finner man att man med krympreducerare får en långsammare bildning i början men att det har hunnit ikapp efter 7 dygn. Detta överensstämmer med kalorimeterdiagrammen och med förbrukningen av alit/belit dvs man får en viss retardation men att krympreducerarna i övrigt inte påverkar cementshydratationen.



Figur 4.10. Hydratationsgraden för alit + belit.

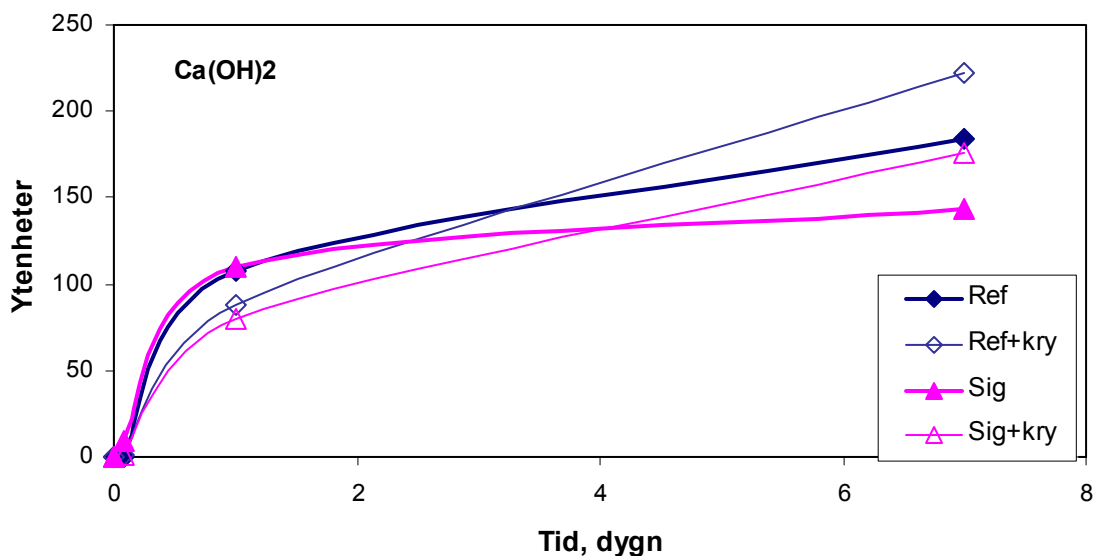
Degree of hydration for alite + belite.

Med Sigunit erhöjls den kraftigaste ettringitbildningen (Figur 4.11) vilket är naturligt då den alkalifria acceleratoren använder bildning av ettringit för att ge tillstyvnad. Krympreduceraren minskar inte ettringitbildningen, dvs den påverkar inte acceleratoren. I de övriga blandningarna får man en normal ettringitbildning. Minskningen av ettringit med tiden i referensblandningen beror antagligen på monosulfatomvandling.



Figur 4.11. Ettringitbildningen under de nio första dygnen.

Formation of ettringite during the first nine days.



Figur 4.12. Kalciumhydroxidbildningen under de nio första dygnen.

Formation of calcium hydroxide during the first nine days.

4.2.3 Hållfasthetsutveckling pasta

Tryckhållfastheten bestämdes på prismor av dimensionen 40x40x160 mm härdade vid ca 10 °C för att bättre efterlikna verkligheten. Acceleratorerna blandades in i en halt av 7 % och krympreduceraren i en halt av 2 % och vct var 0,40. Tryckhållfastheten är ett medelvärde av två prov, Tabell 4.1. Proven är tillverkade i Hobart blandare (mindre laboratorieblandare).

Krympreduceraren har här reducerat den tidiga hållfastheten för referensblandningen, men inte nämnvärt påverkat den sena hållfastheten. Den tidiga hållfastheten för Sigunit har inte nämnvärt påverkats av krympreduceraren. Resultaten bekräftar tidigare observationer, dvs att acceleratoren reducerar något och krympreduceraren ytterligare. Intressant är att kombinationen krympreducerare och accelerator ger en bättre hållfasthet efter ett dygn. Skillnaderna är dock för små för att kunna dra några slutsatser, men de visar att kombinationen krympreducerare och tillstyvnadsaccelerator fungerar. Tjugoåttadygnshållfastheten är tillfredställande för alla proven.

Tabell 4.1. Tryckhållfasthet i MPa härdning vid ca 10°C.

Compressive strength in MPa. Conditioning at around 10°C.

Ålder, dygn	1	2	28
Referens	6,7	14,8	31,4 (ett värde)
Ref + kry.red.	2,9	10,6	33,5
Sigunit	5,0	13,4	36,9
Sigunit + kry.red.	6,7	11,3	33,0

4.3 Cementreducering

Syftet med denna del var att utveckla sprutbetongrecepturer med relativt låg krympning. Den lägre krympningen skulle åstadkommas genom att proportionera betongerna på sådant sätt att cementmängden och därmed pastavolymen kan minskas. Försöken utfördes i flera steg enligt nedan:

- Ersättning av cement/pasta med filler
- Ersättning av cement/pasta med luft
- Ersättning av cement/pasta med filler i kombination med luft
- Förbättring av reologin genom inblandning av sten 8/11 mm

Betongerna som blandades i stegen ovan var oarmerade, men i ett femte steg togs recept för fiberarmerade betonger fram på grundval av resultaten i stegen ovan. Uttorkningskrympningen bestämdes för ett urval av de provade betongerna.

4.3.2 Arbetbarhet och reologi

Vilka egenskaper en sprutbetong skall ha finns beskrivet i kapitel 2.4. En beskrivning av ingående material finns i kapitel 3.1. För att en betong skall vara sprutbar, dvs., att den kan sprutas i tjocka skikt och med lite återstuds, är det viktigt att den uppvisar god sammanhållning och erforderlig konsistens. Enligt litteraturen (kapitel 2.4.2.2) styrs återstudsens delvis av viskositeten, vilken bör vara låg så att ballasten ska kunna penetrera och ge god kompaktering. Flytgränsspänningen skall vara relativt hög så att betongen kan sprutas i tjocka skikt. Denna parameter är troligtvis inte lika viktig att beakta vid proportioneringen då det vanliga förfarandet är att den regleras genom tillsats av tillstyvnadsaccelerator vid sprutning. Däremot kan den påverka pumpbarheten varför det är viktigt att beakta den ur denna aspekt.

Det verkar inte finns några etablerade gränsvärden för inom vilket viskositets/flytgränsområde betongens reologi bör ligga för att ge god sprutbarhet. Därför har reologin hos sprutbetonger av normal sammansättning fått utgöra önskvärda värden på viskositeten. Vid provningarna har målsättningen varit att reducera cementmängden med bibehållen eller så liten ökning av den plastiska viskositeten som möjligt.

Inom denna del av projektet har ett större antal betonger med varierande sammansättning (vct, cementmängd, tillsatsmedel, filler, stenhalt) utvärderats avseende deras färskas egenskaper och krympning.

4.3.2.1 Ersättning av cement med filler

Inom denna etapp har försök att reducera cementmängden genom att partiellt ersätta det med olika fillermaterial utförts. Vid försöken reducerades cementmängden med 100 kg/m^3 , dvs. från referensbetongens 480 kg/m^3 till 380 kg/m^3 . Fillermaterialen som användes var ett kvartsfiller (Filler A), en kalkfiller (Filler B) och en dolomitfiller (Filler C). De olika fillermaterialens finheten ökar i ordningen: A:B:C (Se Figur 2.2). De provade betongernas sammansättning framgår av Tabell 4.2.

Tabell 4.2 Sammansättning hos fillermodifierade betonger.

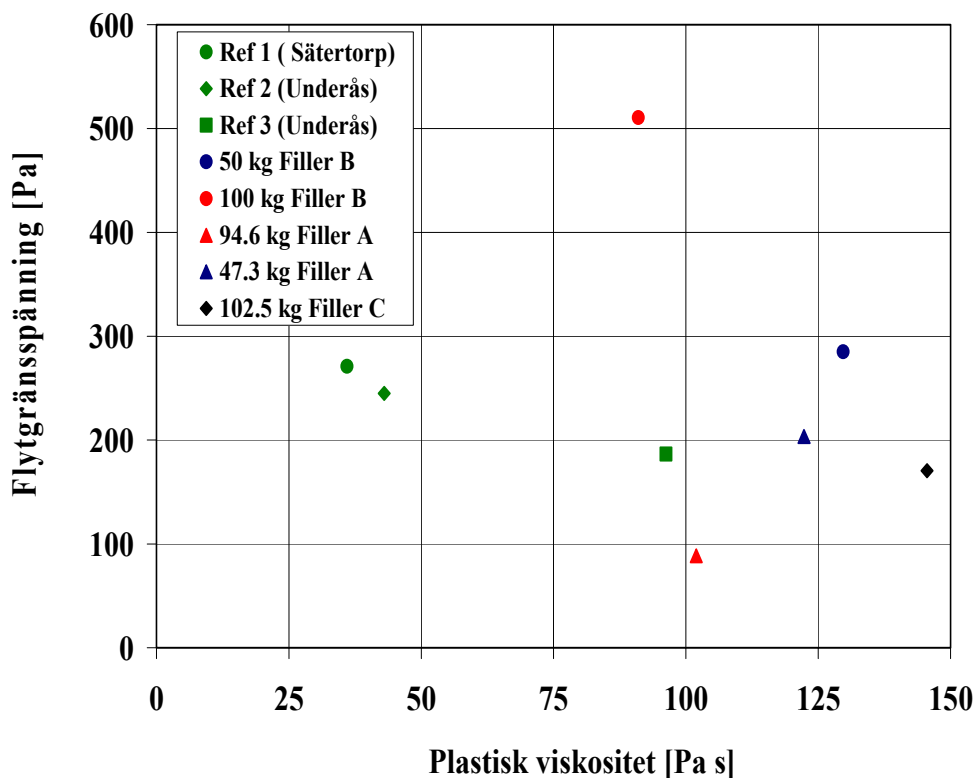
Composition of filler modified concretes.

Delmaterial	Referens 1-2	Referens 3	Filler A	Filler B	Filler C
Cement (ANL)	480	380	380	380	380
Silika 940U	24	19	19	19	19
Filler	0	0	47-165	50-175	51-179
Ballast 0/8 mm	1590	1799	1531-1750	1531-1750	1581-1703
Vatten	216	171	171-209	171-209	171-209
Flytmedel	2,6-2,8	7,9	3,0-11,6	3,3-11,7	3,2-10,2
Vct	0,45	0,45	0,45-0,55	0,45-0,55	0,45-0,55
Pastavolym	400	322	339-422	339-422	357-403

Vct 0,45

Betongerna med vct 0,45 var mycket viskösa och uppvisade även dålig sammanhållning. De flesta tenderade att falla isär och ger med största sannolikhet undermålig sprutbarhet. Betongen med Filler C, den finkornigaste fillern, gav relativt god sammanhållning, men uppvisade även den högsta viskositeten, se Figur 4.13. Den höga viskositeten hos de provade betongerna är en konsekvens av den vattenreduktion som följer när cementhalten minskas vid bibehållet vct (se även Figur 4.16). I detta fall innehöll betongerna 171 liter/m³ vatten jämfört med referensbetongernas 216 liter/m³. En slutsats är att cementreduktionen var för stor vid bibehållet vct för att betongerna skall vara sprutbara. Vidare kunde inte några generella trender avseende fillermaterialens egenskaper, t.ex. specifik yta, och betongernas reologi observeras.

De provade betongernas sättmått varierade mellan 210 mm och 220 mm, förutom för betongen med Filler C som uppvisade flytsättmättet 575 mm. Det som skiljer sättmättet från flytsättmättet är att vid mätning av den första avläses betongens sättning och den senare betongens utbredning.



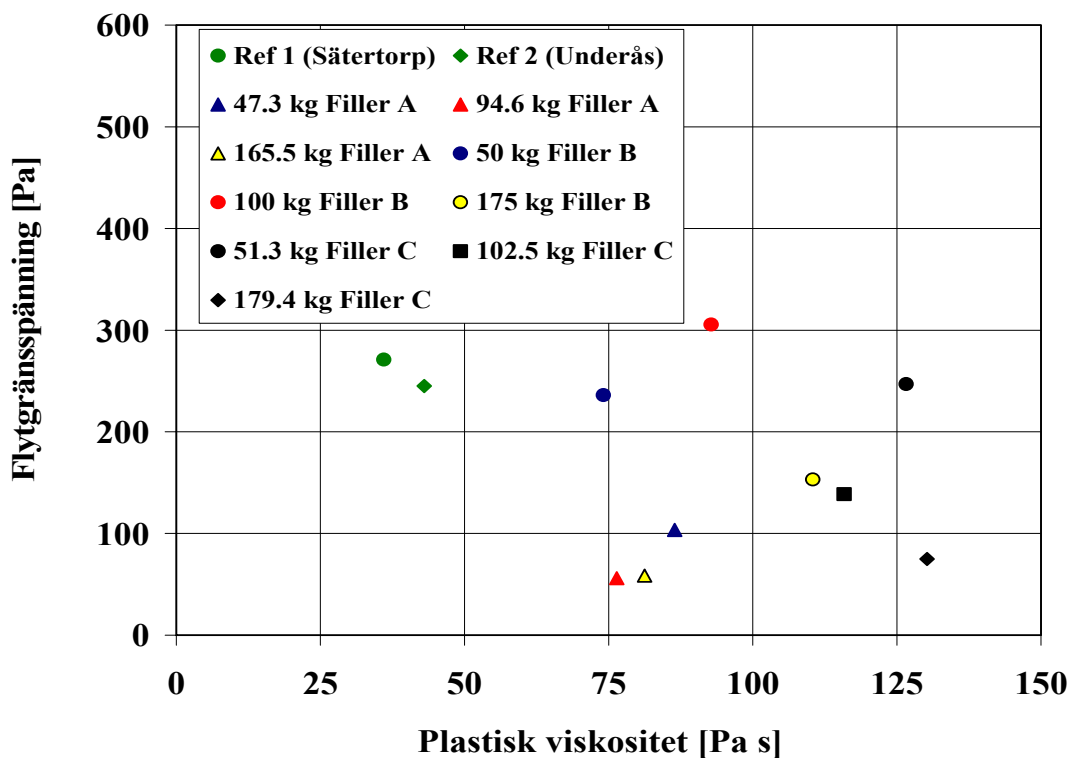
Figur 4.13. Reologin hos betonger med vct 0,45 där 100 kg/m³ cement ersatts med olika typer och mängder av filler.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.45 where 100 kg/m³ of cement was replaced by different types and amounts of filler.

Vct 0,50

Betongernas sammanhållning förbättrades generellt när vct höjdes till 0,50, men den plastiska viskositeten var fortfarande något hög jämfört med referensbetongerna, se Figur 4.17. Betongerna med 94,6 kg Filler A och 175 kg Filler B hade god sammanhållning. Av de provade betongerna bedöms den med 94,6 kg Filler A ha störst potential att sprutas även om viskositeten fortfarande var hög. Övriga betonger bedöms ha dålig sprutbarhet på grund av dålig sammanhållning och för hög viskositet.

De flesta av de provade betongernas sättmått låg mellan 210 mm och 245 mm. Betongerna med 175 kg Filler B och 179,4 kg Filler C uppvisade 510 mm respektive 655 mm flytsättmått.



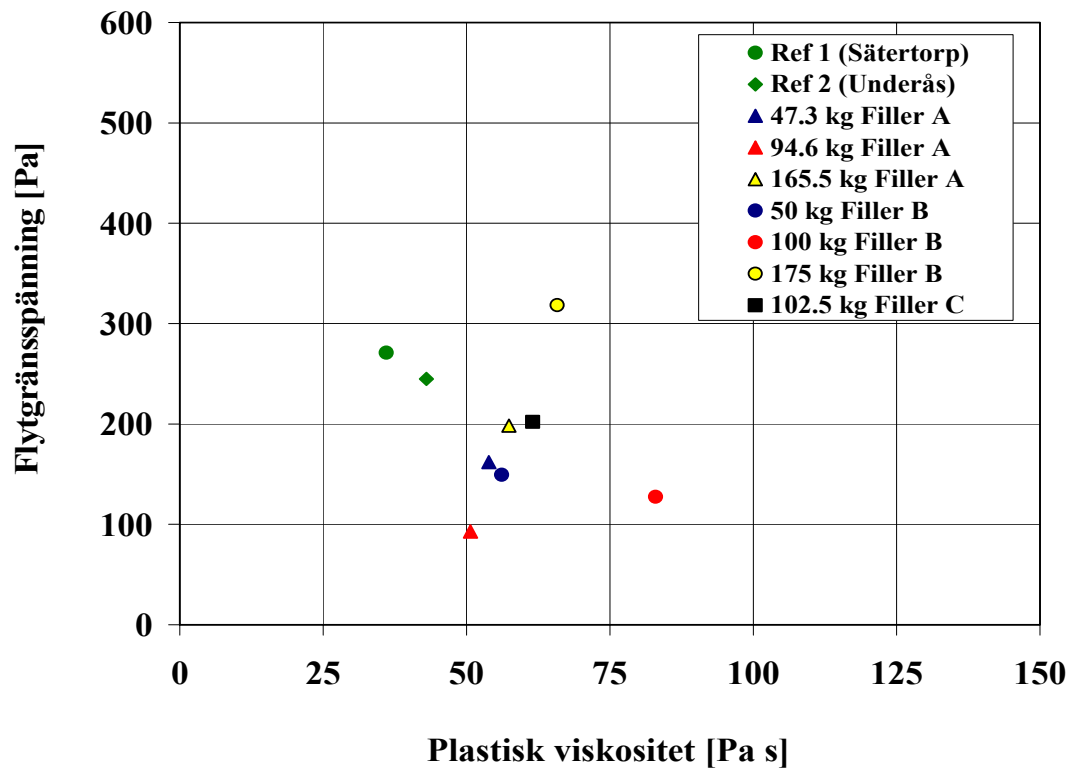
Figur 4.14. Reologin hos betonger med vct 0,50 där 100 kg/m³ cement ersatts med olika typer och mängder av filler.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.50 where 100 kg/m³ of cement was replaced with different types and amounts of filler.

Vct 0,55

Vid vct 0,55 hade samtliga betonger god sammanhållning och flera av dem är sannolikt sprutbara. Vatteninnehållet i betongerna var 209 liter/m³ vilket ska jämföras med 216 liter i Ref. 1 och Ref. 2. Denna skillnad i vattenhalt gör att betongerna fortfarande är något viskösare än referenserna.

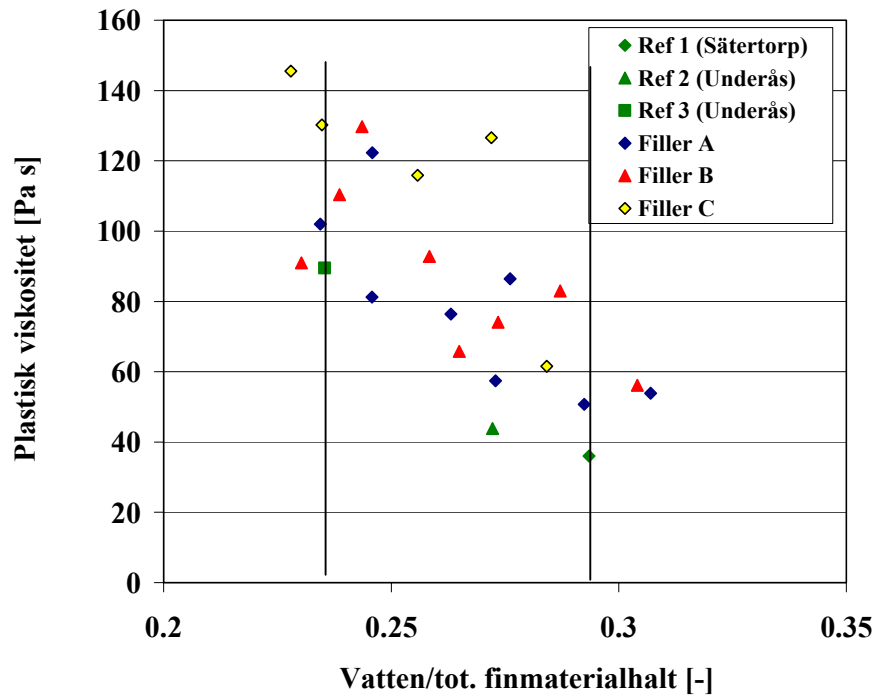
Sättmått för de provade betongerna varierade mellan 210 mm och 240 mm.



Figur 4.15. Reologin hos betonger med vct 0,55 där 100 kg/m³ cement ersatts med olika typer och mängder av filler.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.55 where 100 kg/m³ of cement was replaced with different types and amounts of filler.

I Figur 4.16 visas den plastiska viskositeten som funktion av förhållandet mellan vattenmängden och finmaterialhalten i de provade betongerna. I detta fall definieras cement, filler och ballastens finsvans < 0,25 mm som finmaterial. När vattenhalten minskat på grund av cementminskningen minskar kvoten mellan vatten och finmaterial och därmed ökar viskositeten generellt. Dessa resultat förklarar varför det är svårt att kraftigt reducera cementmängden vid konstant vct utan att den plastiska viskositeten ökar så mycket att sprutbarheten blir lidande. I andra betongtyper där viskositeten inte är av lika stor betydelse för dess gjutbarhet, t.ex., självkompakterande betong, är det tämligen lätt att reducera cementmängden genom att ersätta delar av den med ett lämpligt tillsatsmaterial.



Figur 4.16. Betongens plastiska viskositet som funktion av kvoten mellan betongens vattenhalt och finmaterialinnehåll. Till finmaterial räknas i detta fall cement, filler och finballast < 0,25 mm.

Plastic viscosity of the concrete as a function of the ratio between the water content and the content of fine materials. Cement together with filler and fine aggregate (<0.25 mm) is regarded as fine materials.

4.3.3 Ersättning av cement med luft

En potentiell möjlighet som kan utnyttjas för att reducera cementmängden utan att den plastiska viskositeten ökar markant är att tillsätta luftporbildare som ger betongen en förhöjd lufthalt. I detta steg undersöktes effekten av luftporbildartillsats på reologin hos betonger med reducerad cementmängd. Vid provningarna valdes vct till 0,50 för att vattenhalten skulle ligga på rimliga nivåer. Jämfört med referensbetongerna innehåller betongerna mellan 26 och 66 liter mindre vatten. Även den doserade mängden flytmedel hölls konstant för att kunna utvärdera effekten av luftporbildaren med så få varierande variabler som möjligt. De olika betongernas sammansättning framgår av Tabell 4.3.

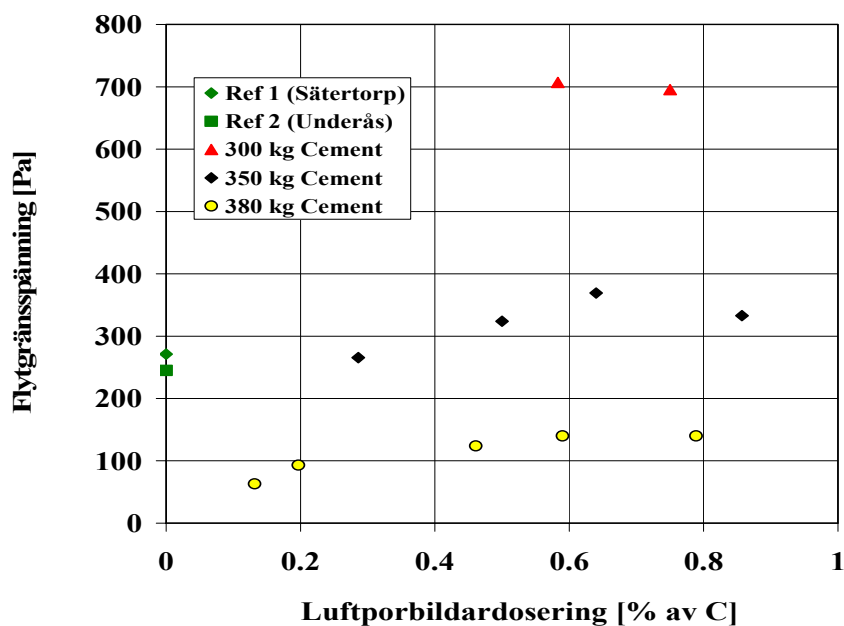
Tabell 4.3 Luftmodifierade betonger.

Air modified concretes.

Delmaterial	Referens 1-2	380 kg cement	350 kg cement	300 kg cement
Cement (ANL)	480	380	350	300
Silika 940U	24	19	17,5	15
Ballast 0/8 mm	1590	1667	1734	1845
Vatten	216	190	175	150
Flytmedel	2,6-2,8	4,5	4,5	4,5
Luftporbildare	-	0,5-3,0	1,0-3,0	1,7-2,3
Vct	0,45	0,50	0,50	0,50
Pastavolym	400	340	314	272

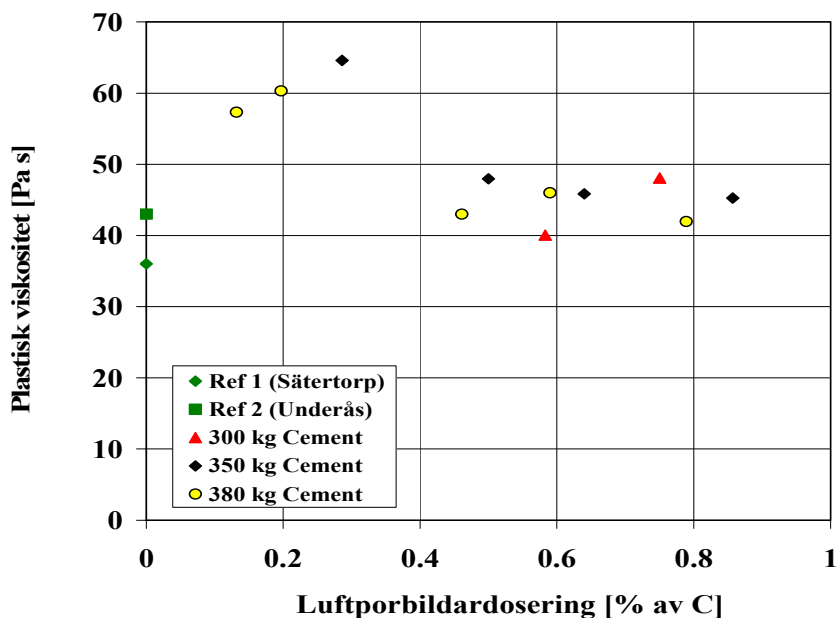
Resultaten från reologimätningarna visar att betongernas viskositet minskar markant vid tillsats av luftporbildare och att flytgränsspänningen ökar något, se Figur 4.17 och 4.18. Betongerna med 300 kg cement uppvisade dock undermåliga egenskaper i det färska tillståndet. Sättnmåtten för dessa betonger var 50 mm respektive 60 mm, vilket är långt under det önskade sättnmåtten på ungefär 200 mm. Reologimätningarna visar att betongens plastiska viskositet låg inom önskat område, d.v.s., ungefär som referensbetongerna. Men trots detta bedöms betongen som osprutbar utifrån den höga flytgränsspänningen och det visuella intrycket vid provningarna.

Betongerna med 350 kg och 380 kg cement uppvisade dock goda egenskaper då de var smidiga och lättbearbetbara. För betongerna med 350 kg cement varierade sättnmåtten mellan 225 mm och 240 mm och för de med 380 kg cement varierade flytsättnmåtten mellan 480 mm och 610 mm. Betongen med 350 kg cement uppvisade likvärdig reologi som referensbetongerna, både vad det gäller den plastiska viskositeten och flytgränsspänningen. Även för betongen med 380 kg cement låg viskositeten på samma nivå som referensbetongerna, men flytgränsspänningen var betydligt lägre. Detta indikerades även av betongernas flytsättnmätt som var större än referensbetongernas.



Figur 4.17 Flytgränsspänningen hos betonger med reducerad cementmängd vid olika doseringar av luftporbildare.

Yield stress of concretes with reduced amount of cement at different dosages of air entrainment.



Figur 4.18 Plastisk viskositet hos betonger med reducerad cementmängd vid olika doseringar av luftporbildare.

Plastic viscosity of concretes with reduced amount of cement at different dosages of air entrainment.

4.3.4 Ersättning av cement med filler i kombination med luft

I försöken nedan utvärderades betonger med fillertillsats i kombination med luftporbildare. De provade betongernas sammansättning framgår av Tabell 4.4.

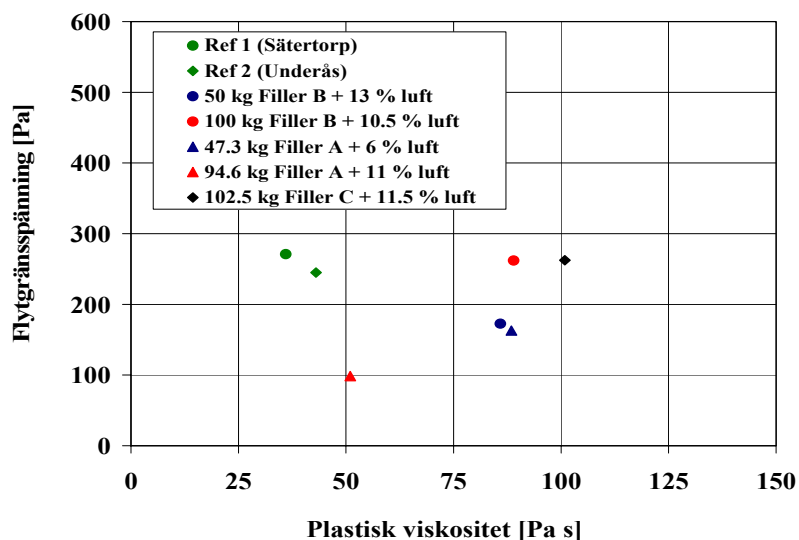
Tabell 4.4 Recept för provade betonger med filler i kombination med luft.

Recipes for tested concretes with filler in combination with air.

Delmaterial	Referens 1-2	Referens 3	Filler A	Filler B	Filler C
Cement (ANL)	480	380	380	380	380
Silika 940U	24	19	19	19	19
Filler	0	0	47-165	50-175	51-179
Ballast 0/8 mm	1590	1799	1531-1750	1531-1750	1581-1703
Vatten	216	171	171-209	171-209	171-209
Flytmedel	2,6-2,8	7,9	3,0-11,6	3,3-11,7	3,2-10,2
Luftporbildare	0	0	1,6-1,9	1,2-2,4	1,8
Vct	0,45	0,45	0,45-0,55	0,45-0,55	0,45-0,55
Pastavolym	400	322	339-422	339-422	357-403

Vct 0,45

De filler- och luftmodifierade betongerna med vct 0,45 uppvisade relativt god sammanhållning i jämförelse med de fillermodifierade betongerna utan luftporbildare. Den plastiska viskositeten var dock fortfarande förhållandevis hög jämfört med referensbetongerna. Sammantaget visar resultaten att betongerna inte är lämpliga att spruta.

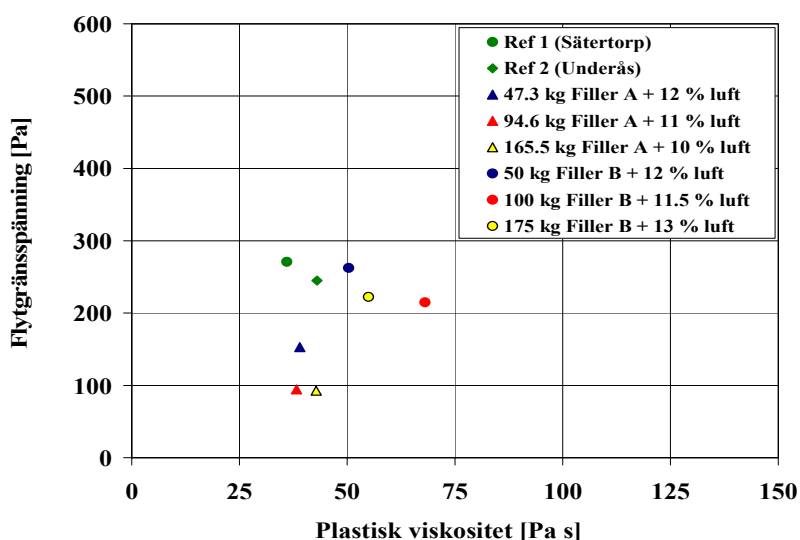


Figur 4.19. Reologin hos betonger med vct 0,45 där 100 kg/m^3 cement ersatts med olika typer och mängder av filler i kombination med luftporbildartillsats.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.45 where 100 kg/m^3 of cement is replaced with different types and amounts of filler in combination with air entrainment.

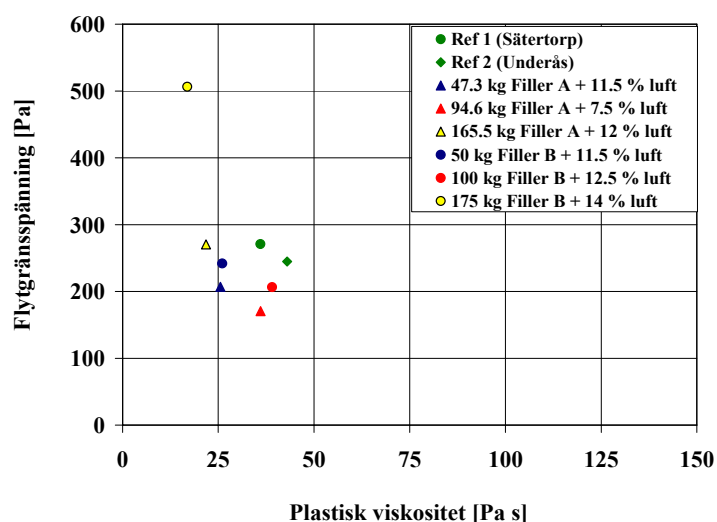
Vct 0,50 samt vct 0,55

Majoriteten av de fillermodifierade betongerna med luftporbildare och vct 0,50-0,55 bör kunna uppvisa god sprutbarhet. Av Figur 4.20 och Figur 4.21 framgår att viskositeten och flytgränsspänningen för de flesta av betongerna ligger inom målområdet, d.v.s. kring referensbetongernas reologi. Betongernas sättmått varierade mellan 210 mm och 250 mm bortsett från betongen med 165,5 kg Filler A och vct 0,50 som hade flytsättmättet 525 mm.



Figur 4.20. Reologin hos betonger med vct 0,50 där 100 kg/m^3 cement har ersatts med olika typer och mängder av filler i kombination med luft.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.50 where 100 kg/m^3 of cement is replaced with different types and amounts of filler in combination with air entrainment.



Figur 4.21. Reologin hos betonger med vct 0,55 där 100 kg/m^3 cement ersatts med olika typer och mängder av filler i kombination med luft.

Rheology of concretes with a w/c ratio of 0.55 where 100 kg/m^3 of cement is replaced with different types and amounts of filler in combination with air entrainment.

Resultaten indikerar att det är möjligt att reducera cementmängden med 100 kg jämfört med referensbetongerna om luftporbildare används. Vid försöken ovan har provningarna utförts på oarmerade betonger. I avsnitt 3.3.6 beskrivs försöken med stålfiberarmerade betonger.

4.3.5 Inblandning av 8/11 mm sten

I denna del undersöktes inverkan av att tillföra 0 till 40 % 8/11 mm ballast på betongernas färskas egenskaper. Vid provningarna utgicks från en betong med 380 kg cement och vct 0,50. I Tabell 4.5 redovisas betongernas sammansättning. Vidare framgår det tydligt att den erforderliga flytmedelsdoseringen för ett konstant sättmått minskar markant med ökande andel sten, vilket är ett resultat av att ballastens specifika yta minskar och därmed den mängd vatten som krävs för att väta ytorna.

Tabell 4.5 Recept för betonger med olika andelar 8/11 mm sten. Sättmått runt 200 mm.

Recipes for concretes with different amounts of 8/11 mm stones. Slump of around 200 mm.

Delmaterial	0 % 8/11 mm	15 % 8/11 mm	20 % 8/11 mm	25 % 8/11 mm	30 % 8/11 mm	40 % 8/11 mm
Cement (ANL)	380	380	380	380	380	380
Silika 940U	19	19	19	19	19	19
Vatten	190	190	190	190	190	190
Glenium 51*	6,1	4,1	3,6	3,0	2,9	2,1
Ballast 0/8 mm	1749,2	1486,8	1399,4	1311,9	1224,4	1049,5
Ballast 8/11 mm	0	262,4	349,8	437,3	524,8	699,7
Vct	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

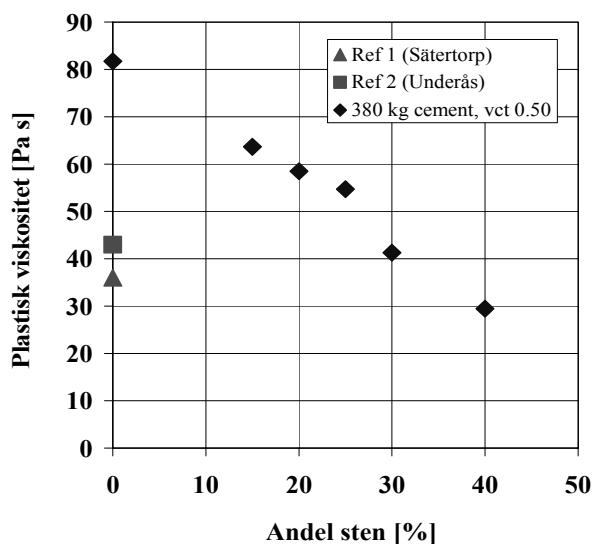
* torrhalt 35 %.

Betongen utan sten var styv med ganska dålig sammanhållning, se Figur 4.22. Men redan vid 15 % inblandning förbättrades betongens egenskaper avsevärt och vid 30 % var den plastiska viskositeten i samma storleksordning som referensbetongerna med 480 kg cement och vct 0,45, se Figur 4.23. Möjligheterna att blanda in större mängder 8/11 mm ballast begränsas dock av att återstudsden ökar. En viss inblandning torde dock vara möjlig utan att äventyra sprutbarheten.



Figur 4.22. Betonger med 380 kg cement, vct 0,50 och olika andelar 8/11 mm sten. Övre raden från vänster till höger: 0 %, 15 % samt 20 % 8/11 mm sten. Undre raden från vänster till höger: 25 %, 30 % samt 40 % 8/11 mm sten.

Concretes with 380 kg cement, w/c 0.50 and different proportions of 8/11 mm aggregate stone. Top row from left to right 0, 15 and 20 % 8/11 stone. Lower row from left to right 25, 30 and 40 % 8/11 stone.



Figur 4.23. Inverkan av andelen 8/11 sten på betongens plastiska viskositet. Konstant sättmått runt 200 mm. Recept tabell 4.5.

Effect of the amount of 8/11 stone on the plastic viscosity. Constant slump of 200 mm. Recipe according to table 4.5.

4.3.6 Cementreducerade betonger med stålfiber

Vid försöken inom denna del utfördes provningar på stålfiberarmerade betonger med reducerad cementmängd. För att motverka den ökning av viskositeten som erhålls om cementmängden reduceras vid bibehållet vct tillsattes luftporbildare. Betonger innehöll 50 kg stålfiber och cementmängden varierades mellan 480 kg/m³ och 380 kg/m³. De fullständiga recepten redovisas i Tabell 4.6.

Tabell 4.6. Recept för fiberarmerad sprutbetong.

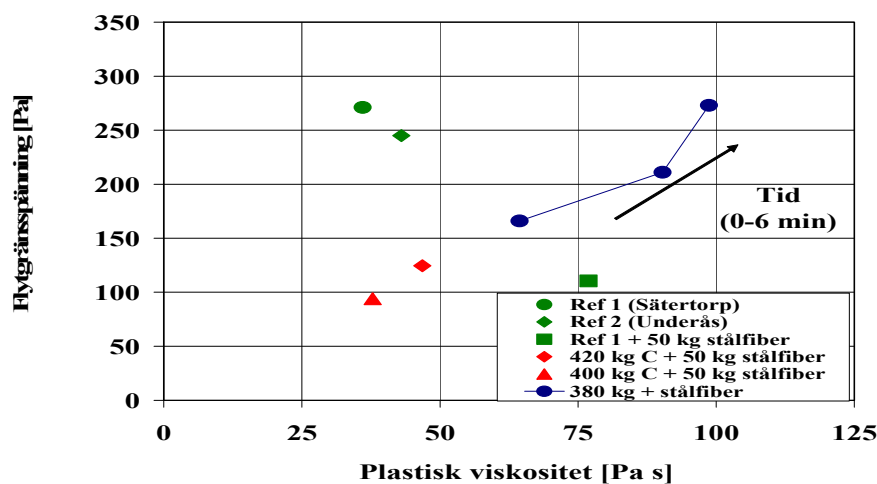
Recipe for fibre reinforced shotcrete.

Delmaterial	Ref 1 + stålfiber	420 kg cement	400 kg cement	380 kg cement
Cement (ANL)	480	420	400	380
Silika 940U	24	21	20	19
Vatten	216	189	180	171
Glenium 51*	4,0	4,6	5,8	9,3
Micro air**	-	0,8	1,7	2,2
Stålfiber Dramix RC-65/3	50	50	50	50
Ballast 0/8 mm	1493	1619	1661	1702
Vct	0,45	0,45	0,45	0,45

* 35 % torrhalt.

** 10 % torrhalt.

I Figur 4.24 redovisas resultaten från reologimätningarna. Fibertillsatsen resulterade i en markant ökning av referensbetongens viskositet. Samtliga av de cementreducerade betongerna uppvisade lägre plastisk viskositet än den fiberarmerade referensen. För betongerna med 400 kg respektive 420 kg cement var viskositeten i nivå med de oarmerade referenserna.



Figur 4.24. Fiberarmerade sprutbetonger med reducerad cementmängd och lufttillsats.

Fibre reinforced shotcrete with reduced amount of cement and air entraining.

Egenskaperna hos de provade betongerna var sådana att samtliga borde vara sprutbara. Konsistensförlusten hos betongen med 380 kg cement skedde däremot mycket snabbt varför den i realiteten inte är möjlig att använda, åtminstone inte utan tillsats av en retarder eller någon annan åtgärd som förlänger öppethållandetiden. Betongen med 400 kg cement uppvisade flytsättningsmålet 540 mm medan de övriga betongerna hade sättningsmål mellan 210 mm och 250 mm.

4.3.7 Provsprutningar

Provsprutningarna syftade till att verifiera sprutbarheten hos några av de betongrecept som tagits fram inom Etapp II och Etapp III. Sprutbarheten utvärderades dels genom mätning av återstudsens, dels genom operatörens personliga bedömning. Vid provningarna sprutades 70x70 cm paneler från vilka krympbalkar och kuber för bestämning av tryckhållfastheten sågades ut. Sammansättningen hos de sprutade betongerna framgår av Tabell 4.7. De angivna mängderna i tabellen avser de verkliga mängderna, dvs. det är inte börvärdena.

Tabell 4.7 Recept för de sprutade betongerna.

Recipe for the tested shotcretes.

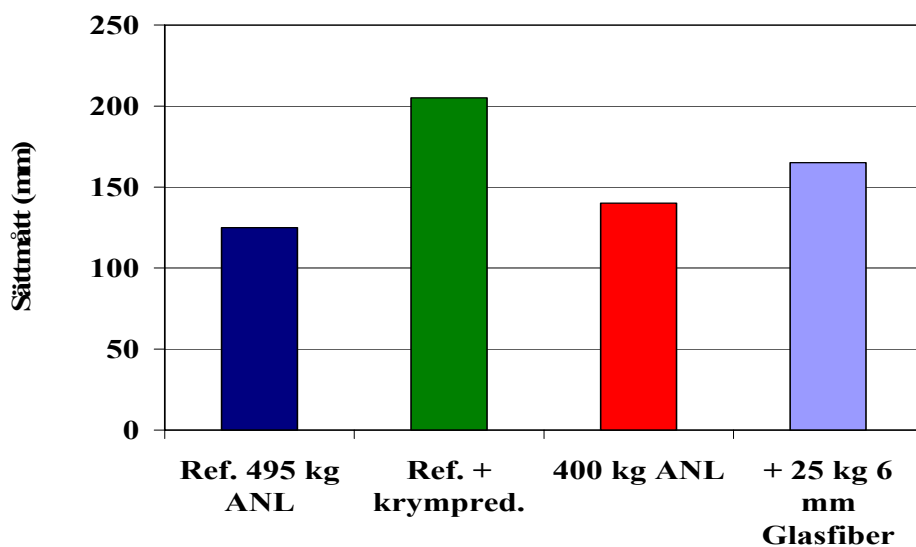
Delmaterial	Referens	Betong 1	Betong 2	Betong 3
Cement (ANL)	495	495	495	400
Silika 940U	19,8	19,8	19,8	20
Vatten	221,7	221,7	217,4	176,3
Glenium 51*	2,9	3,0	4,8	4,1
Micro air**	-	-	1,8	2,1
Sigunit L53 AF-S (accelerator)***	21,3	19,3	20,7	18,7
Sika Controll 40	-	9,9	-	-
Glasfiber (6 mm)	-	-	25	-
Stålfiber Dramix RC-65/3	50	50	50	50
Ballast 0/8 mm	1549	1549	1440	1661
Vct	0,47	0,47	0,47	0,48

* 35 % torrhalt. ** 10 % torrhalt. *** 47 % torrhalt.

4.3.8 Betongernas egenskaper och sprutbarhet

De sprutade betongernas sättningsmål varierade mellan 125 mm och 205 mm, se Figur 4.25. För betongerna med glasfiber och reducerad cementmängd, Betong 2 respektive Betong 3, hade det varit önskvärt om sättningsmåten varit i storleksordningen 200 mm. Framförallt Betong 3 hade gynnats av ett större sättningsmål då den upplevdes som betydligt viskösare än de andra betongerna. Sprutoperatören upplevde även att betongen var svårare att spruta än de andra betongerna. Betong 1 var den betong som var lättast att spruta, men även betongen med 25 kg glasfiber (Betong 2) var relativt

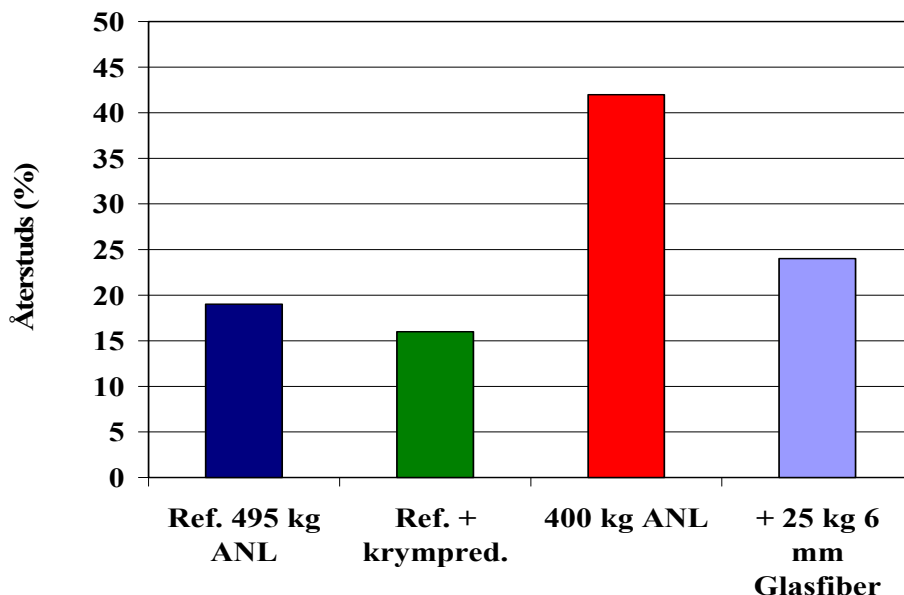
lättsprutad. I Betong 2 och Betong 3 användes luftporbildare i syfte att göra betongerna smidigare och förbättra pump- och sprutbarheten.



Figur 4.25. De sprutade betongernas sättnmätt.

Slump of the tested shotcretes.

Resultaten från mätningarna av återstuds visar att betongen med reducerad cementmängd gav mest återstuds (42 %). Detta kan troligtvis relateras till betongens konsistens och sättnmätt som var för litet med avseende på recepturen. De andra betongernas återstuds varierade mellan 16 % och 24 %.



Figur 4.26. Betongernas återstuds.

Rebound of the tested shotcretes.

4.4 Krympning

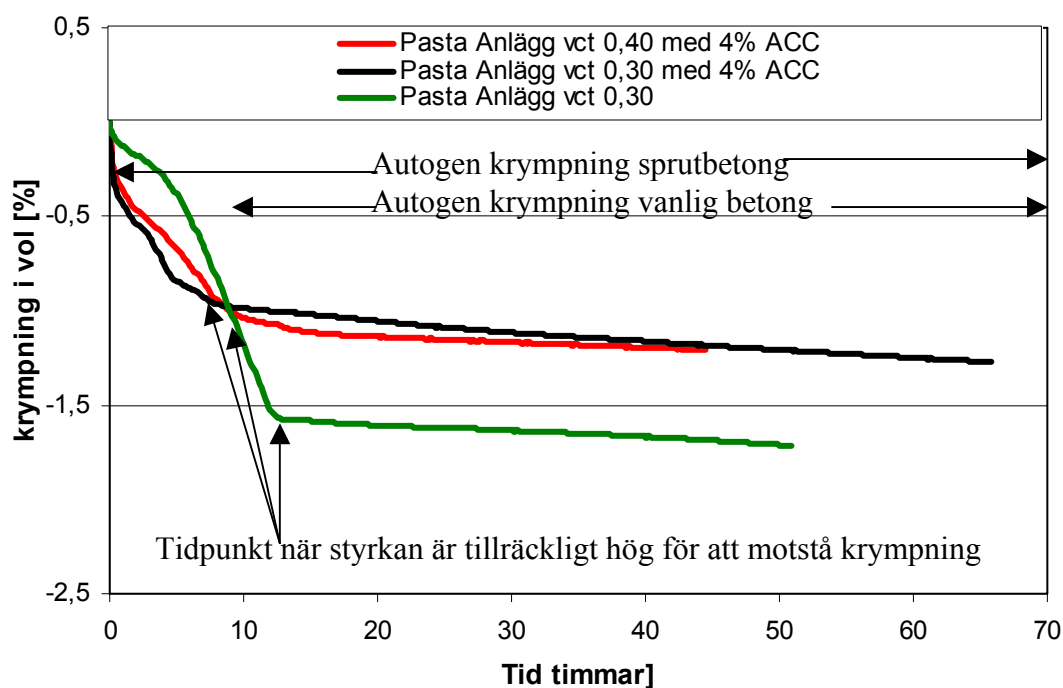
4.4.1 Autogen krympning

Den autogena krympningen är ett resultat av den kemiska krympningen, dvs. den volymminskning man får när cement reagerar med vatten (ca 8-9 volyms %). Den autogena är mindre än den kemiska krympningen då man med tiden bygger upp en struktur som motverkar krympningen. I stället byggs det upp ett undertryck som med tiden jämnas ut genom att betongen drar in vatten eller lyft, dvs. det ger en ökad porositet.

Metoden för att mäta den autogena krympningen finns beskriven i kapitel 3.2.3. Resultaten från försöken med autogen krympning finns redovisade i Figur 4.27. Till synes uppvisar den rena cementpastan en större krympning än den med tillstyvnadsacceleratoren. Detta beror emellertid på mätmetodiken. Med ren pasta måste man ha ett vct på runt 0,3 för att förhindra ”blödning” som ger ett felaktigt värde. Detta fenomen står beskrivet i Justnes et al 1999. Detta problem uppstår inte med tillstyvnadsaccelerator då pastan snabbt ”stelnar”. Resultaten visar att krympningen hos pastorna med alkalifri tillstyvnadsaccelerator efter 9 timmar har byggt upp en sådan styrka att den autogena krympningen har planat ut. För pastan med vct 0,3 tar det ungefär 13 timmar. Beräkningar har visat styrkan (tryck) vid 13 timmar (vid 20°C) bör vara runt 4-5 MPa. För proven med accelerator tyder resultaten på att krympningen avtar först när den verkliga hydratationen satt igång och pågått en stund antagligen när styrkan stigit från de 2-3 MPa som acceleratoren ger till 4-5 MPa. Skillnaden mellan pasta med tillstyvnadsaccelerator och vanlig pasta är att den med accelerator är styv momentant och att man därför inte kan få någon cementsedimentation. I vanlig pasta får man sedimentation och blödning vilket tas upp av en sättning i formen. Den ”falska” bindningen är emellertid inte tillräckligt stark för att kunna motstå krympningen.

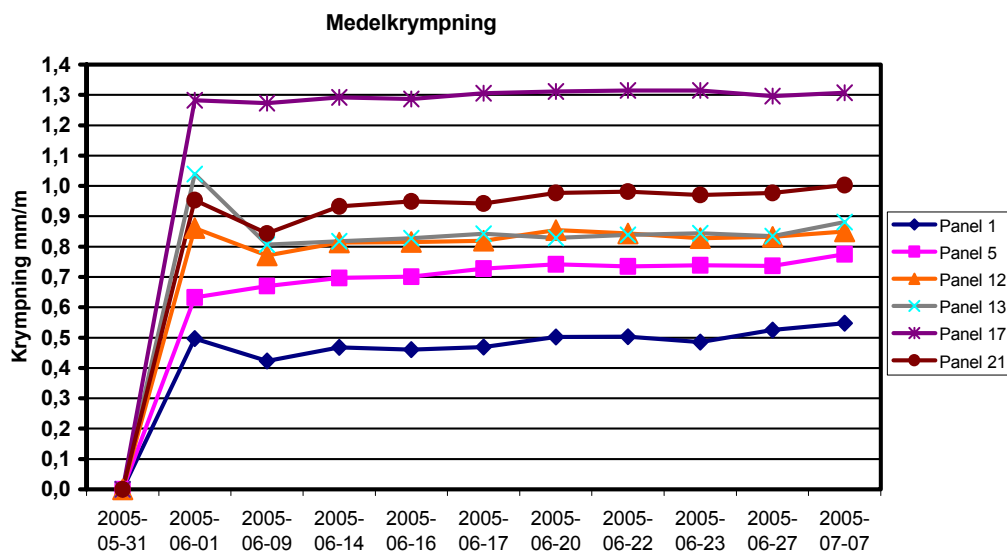
Resultaten från försöken förklarar den krympning (Figur 4.28) som skedde vid försöken i Törnsgöskogleden (Azis 2005). Vid dessa försök fästes mätdubbar i färsk sprutad betong och provkropparna täcktes med plast för att förhindra uttorkning. Resultaten från Törnsgöskogleden visar på en krympning på runt 0,5-1 ‰ och bekräftar resultaten från de här utförda försöken med den autogena krympningen. För att förhindra uppkomst av spänningar måste därför sprutbetong vattenhärddas direkt efter sprutning. När sprutbetongen vattenhärddas sker en viss svällning men inte så mycket att det motsvarar den tidiga krympningen. Detta medför att till största delen så kommer den autogena krympningen att pålagras av den senare uttorkningskrympningen.

Konsekvensen av membranhärdning eller utebliven vattenhärdning/dimning är att man under de första 10 timmarna får en sättning i den vanliga betongen medan det i sprutbetongen kommer att ge upphov till en dragspänning. Denna dragspänning given av den kemiska krympningen kommer att ge sprickor eller åtminstone sprickanvisningar. En 1- ‰ volymminskning motsvarar en endimensionell krympning på 0,33 %. Om man antar ett linjärt samband mellan mängd cementpasta i betongen och krympbeloppet skulle en betong med 75 % ballast krympa ca 0,8 ‰ endimensionellt. Uttorkningskrympningen (kapitel 4.4.2) kommer att pålagras den autogena krympningen.



Figur 4.27. Resultat från experiment med autogen krympning. I vanlig gjuten betong får man innan betongen styvnat en sättning medan man i sprutbetong får krympning i den styvnade pastan från tidpunkt 0.

Results from experiments with autogeneous shrinkage. Ordinary cast concrete will set before stiffening while the shotcrete will shrink from time 0.



Figur 4.28. Medelkrympning för sprutbetongspaneler från Törnskogstunneln. Från Fig. 6.2 i Aziz 2005. Det stora krympbeloppet i början härrör från första dygnet när styrkan är beroende av tillstyvnadsacceleratoren.

Shrinkage from experiments of shotcrete on panels. The main shrinkage comes from measurement during the first 24 hours, before the development of the real strength. Figure 6.2 in Aziz 2005.

4.4.2 Uttorkningskrympning

För att få fram uttorkningskrympningen har en rad försök genomförts både på pastaprover och betong. Pastaprover har dels gjutits strax efter blandning med tillstyvnadsaccelerator dels som sprutade prov. Sprutmetodiken finns beskriven i rapport K24.

När det gäller betong är det dels prov från fält, dels prov som tagits fram i samband med receptoptimeringen. I samband med receptoptimering har dels vanliga provkroppar mätts, dels utsågade prover. Proverna har hållits fuktiga under den första veckan varför den autogena krympningen inte finns med.

Uttorkningskrympningen mättes på ett urval av de betonger som provats fram vid laborieförsöken. Sammansättningen hos de betonger som uttorkningskrympningen mätts på framgår av Tabell 4.2. Vidare mättes även krympningen för betongerna med 15 %, 25 % och 30 % 8/11 mm sten i Tabell 4.5.

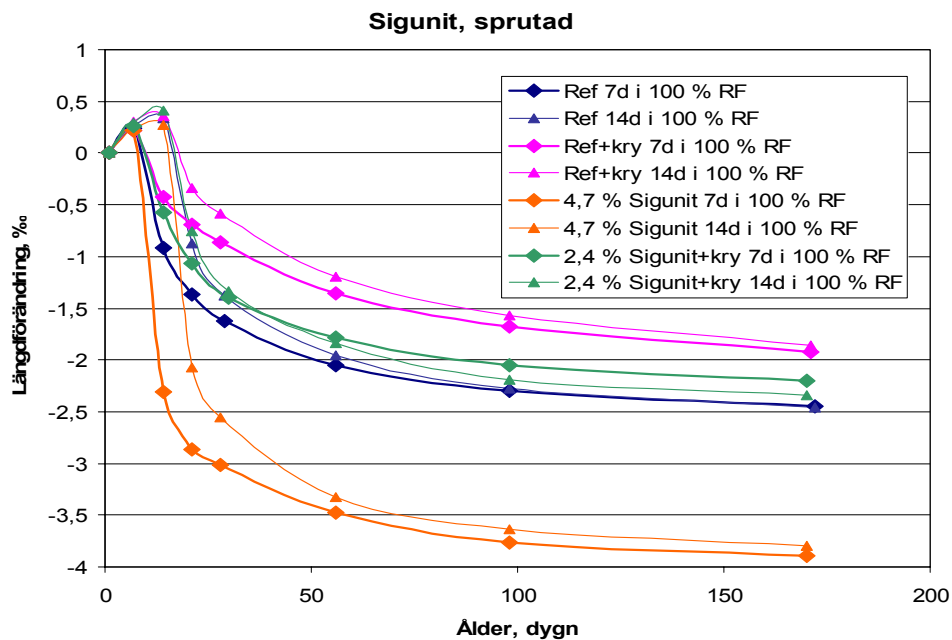
4.4.2.1 Pastaprover

Prov med uttorkningskrympning finns även beskrivet i SveBeFo rapport K24.

Den fria uttorkningskrympningen har mätts på pastaprover efter 7 och 14 dygns fukthärdning. Anledningen till denna uppläggning är att vi ville veta om en förlängd härdning och den ökade styrkan skulle minska krympningen. I vissa blandningar har acceleratoren sprutats in i blandningen, i andra har den blandats i med blandningsvattnet. Då vattenglas sprutades blandades det först med blandningsvattnet. En halt på 8 % behövdes för att pastan inte skulle rinna ned vid sprutning. Detta gav en kraftig retardation men styrkan efter 7 dygn var tillfredställande. Detta är ungefär dubbelt så mycket som normalt används vid sprutning av betong. Vid sprutning av cementpasta ställdes formarna på högkant och pastan sprutades direkt i formarna. Efter sprutning jämnades massan av och komprimerades lätt. Nedan anges krympningen och viktminskningen för de olika blandningarna.

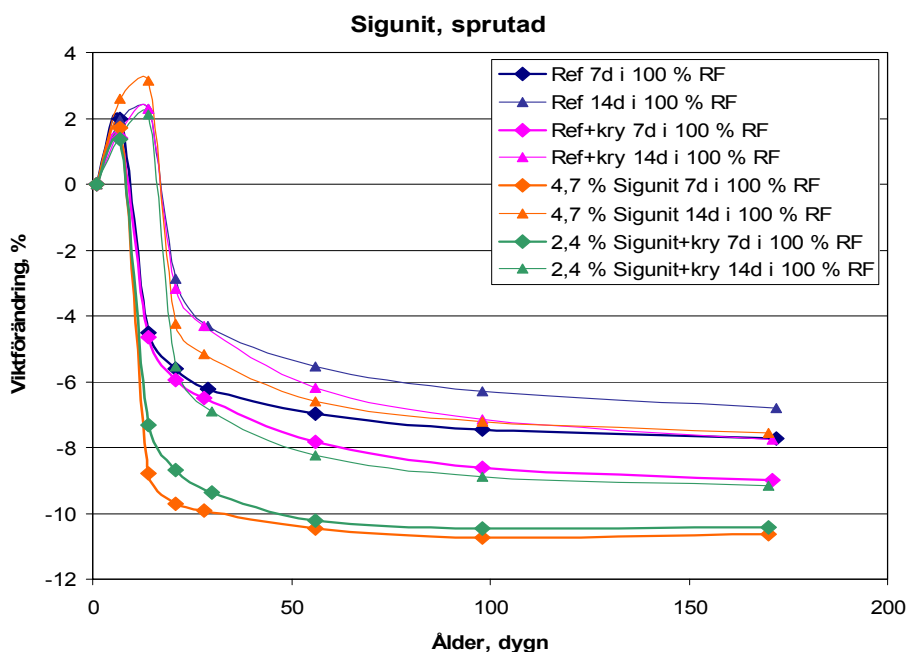
- 14 dygns fuktlagring ger i stort sett samma slutkrympning som 7 dygns fuktlagring. Resultaten tyder därför på att härdningstiden inte har någon signifikant effekt.
- Vattenglas ger ett långsammare krympförlopp än Siguniten och även en mindre slutkrympning (ca 170 dygn i detta fall). Detta syns speciellt på blandningarna med inblandad accelerator där halten har varit densamma dvs. 7 %. Det långsammare krympförloppet med vattenglas beror antagligen på en finare porstruktur (Fig. 4.4), som ger en långsammare vattenavgång vid uttorkning.
- Effekten av krympreducerare visas i Tabell 4.8 och 4.9. Tabell 4.8 visar krympreduktionen för sprutade prover och Tabell 4.9 för gjutna prover.
- Generellt minskar krympningen med krympreducerare. Med Sigunit har krympreduktionen blivit större än med vattenglas. Viktminskningen blir något lägre vid 14 dygns fukthärdning än vid 7 dygns fukthärdning. Krympreduceraren ökar viktminskning, men minskar trots det krympningen.

Den viktigaste orsaken till reducerad krympning torde vara att krympreduceraren minskar ytspänningen i porvattnet och därmed kontraktionen av porer.



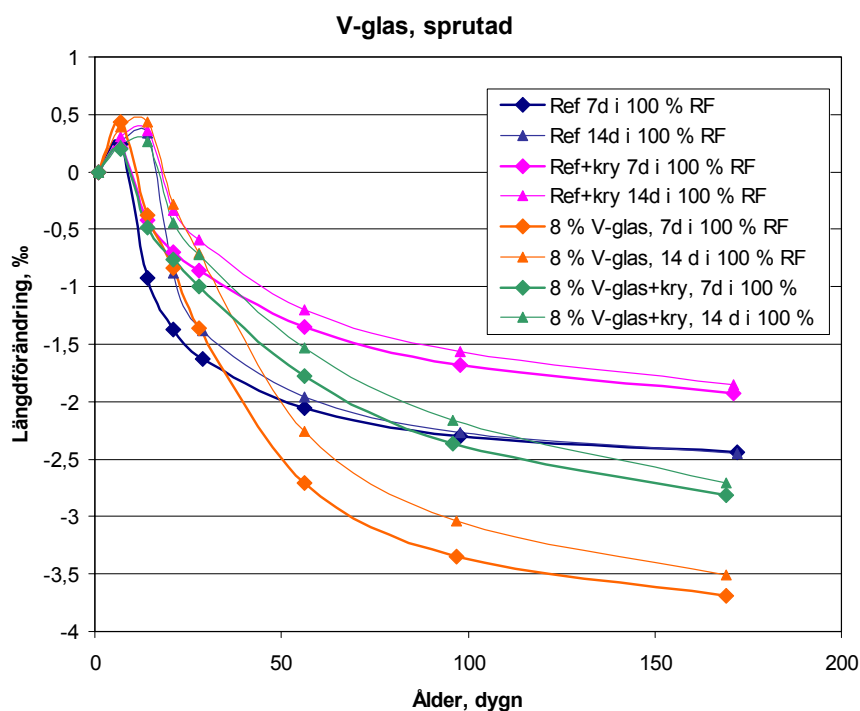
Figur 4.29. Längdförändringen för de sprutade blandningarna med Sigunit.

Length change for shot mixes with Sigunit set accelerator.



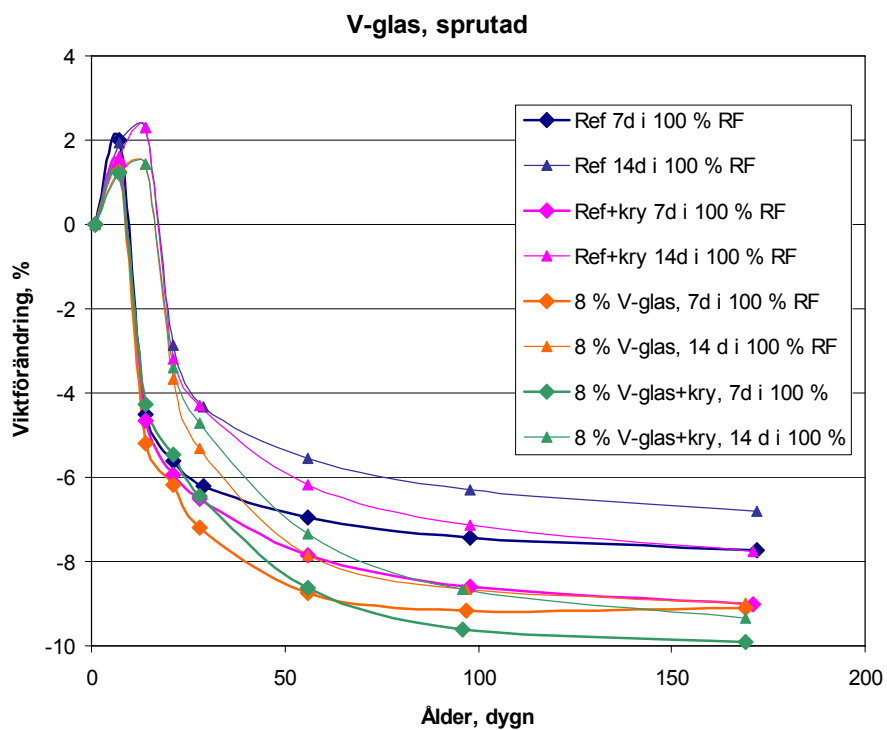
Figur 4.30. Viktförändringen för de sprutade blandningarna med Sigunit.

Change in weight for shot mixes with Sigunit.



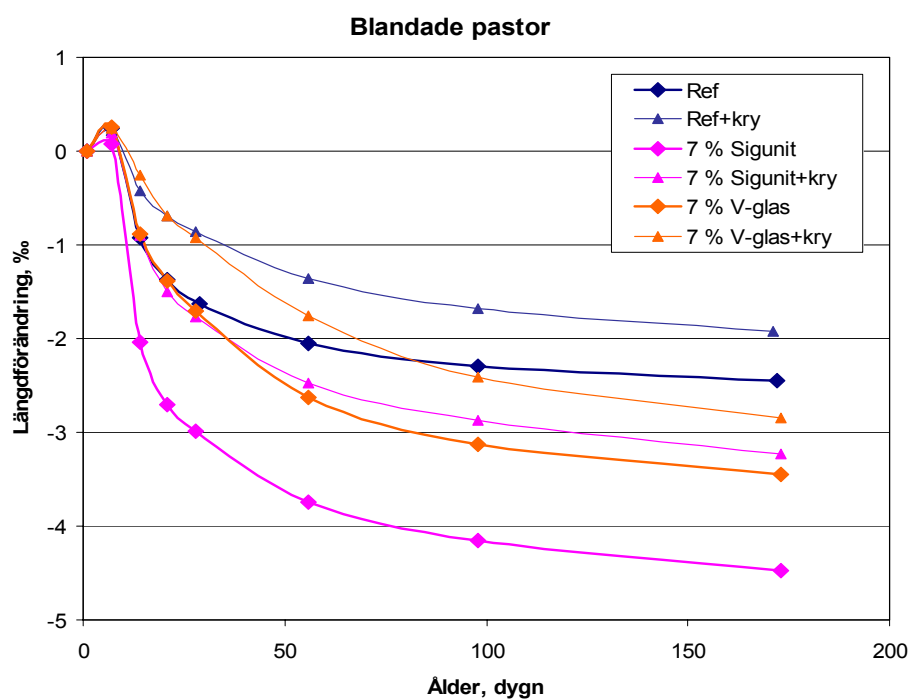
Figur 4.31. Längdförändringen för de sprutade blandningarna med vattenglas.

Length changes for shot mixes with water glass.



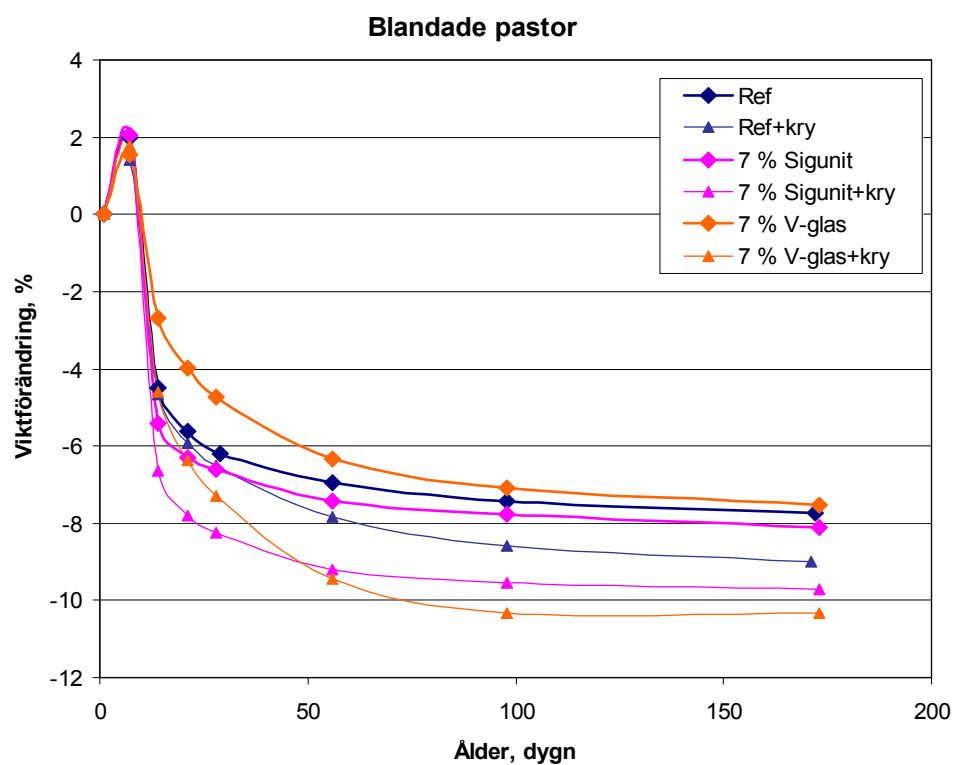
Figur 4.32. Viktförändringen för de sprutade blandningarna med vattenglas.

Weight changes for shot mixes with water glass.



Figur 4.33. Längdförändringen för de blandade pastorna.

Length changes for the mixed pastes.



Figur 4.34. Viktförändringen för de blandade pastorna.

Weight changes for the mixed pastes.

Tabell 4.8. Krympreduktion i % med krympreducerare som fukthärdats i 1 respektive 2 veckor och därefter härdats vid 50 % RH i 170 dygn. Sprutade pastor.

Shrinkage reduction in % with shrinkage reducers. Damp cured during 7 and 14 days flowed by curing at 50 % RH for 170 days. Shot pastes.

Sigunit, 7d	Sigunit, 14 d	V-glas, 7d	V-glas, 14 d
43	38	24	23

Tabell 4.9. Krympreduktion i % med krympreducerare vid ca 170 d ålder vid olika lång lagring. Gjutna pastor.

Shrinkage reduction in % with shrinkage reducers. Damp cured during 7 and 14 days flowed by curing at 50 % RH for 170 days. Casted pastes.

Referens, 7d	Referens, 14 d	Sigunit, 7d	V-glas, 7d
21	24	28	17

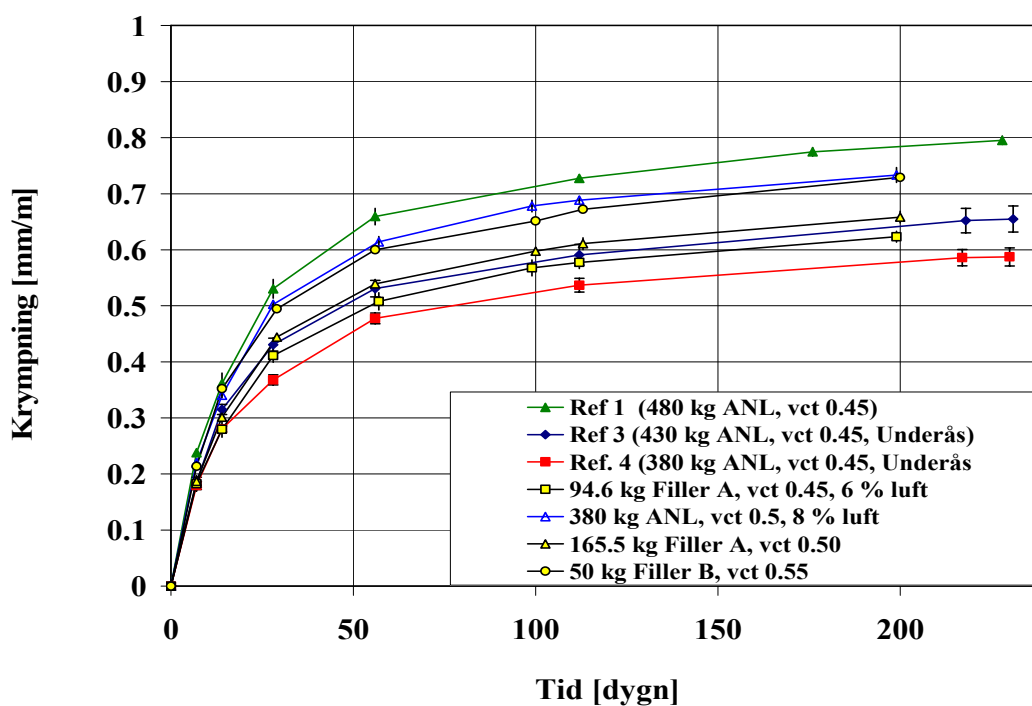
4.4.2.2 Gjutna betong

I Figur 4.35 och Figur 4.36 visas uttorkningskrympningen respektive viktminskningen för betongerna med sammansättning enligt Tabell 4.10. Resultaten visar som förväntat att vid samma vct så sjunker uttorkningskrympningen med något över 20 %. När vct ökar med samma mängd cement så ökar som förväntat krympningen. Resultaten visar att betongerna med Filler A med 380 kg cement och vct 0,45 krymper i samma storleksordning Ref. 3 med 430 kg cement och vct 0,45.

Tabell 4.10. Recept för de betonger som uttorkningskrympningen mätts på.

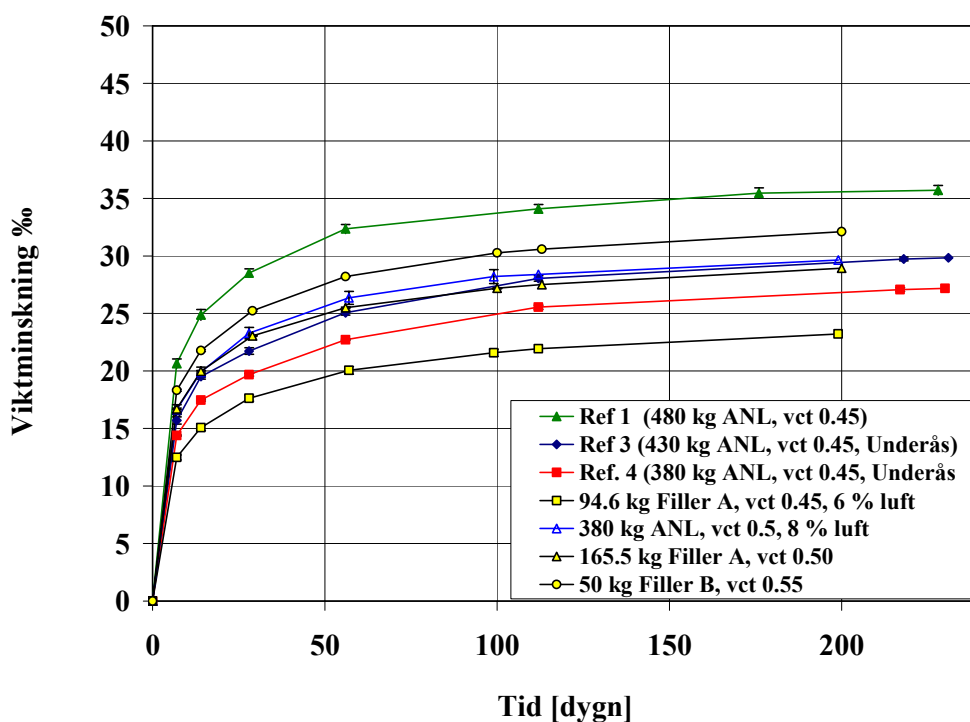
Recipes for the concrete subjected to drying shrinkage.

Delmaterial	Ref. 1	Ref. 3	Ref. 4	380 kg ANL vct 0,50 + luft	94,6 kg Filler A	165,5 kg Filler A	50 kg Filler B
Cement (ANL)	480	430	380	380	380	380	380
Silika 940U	24	21,5	19	19	19	19	19
Filler	0	0	0	0	94,6	165,5	50
Ballast 0/8 mm	1590	1695	1799	1667	1624	1582	1650
Vatten	216	194	171	190	171	190	209
Flytmedel	2,6	3,6	7,9	4,5	7,7	5,5	3,7
Luftporbildare	0	0	0	2,3	0,3	0	0
Vct	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,50	0,55
Pastavolyt	400	340	322	321	337	383	357



Figur 4.35. Krympning hos laborietillverkade sprutbetonger utan tillstyvnadsaccelerator.

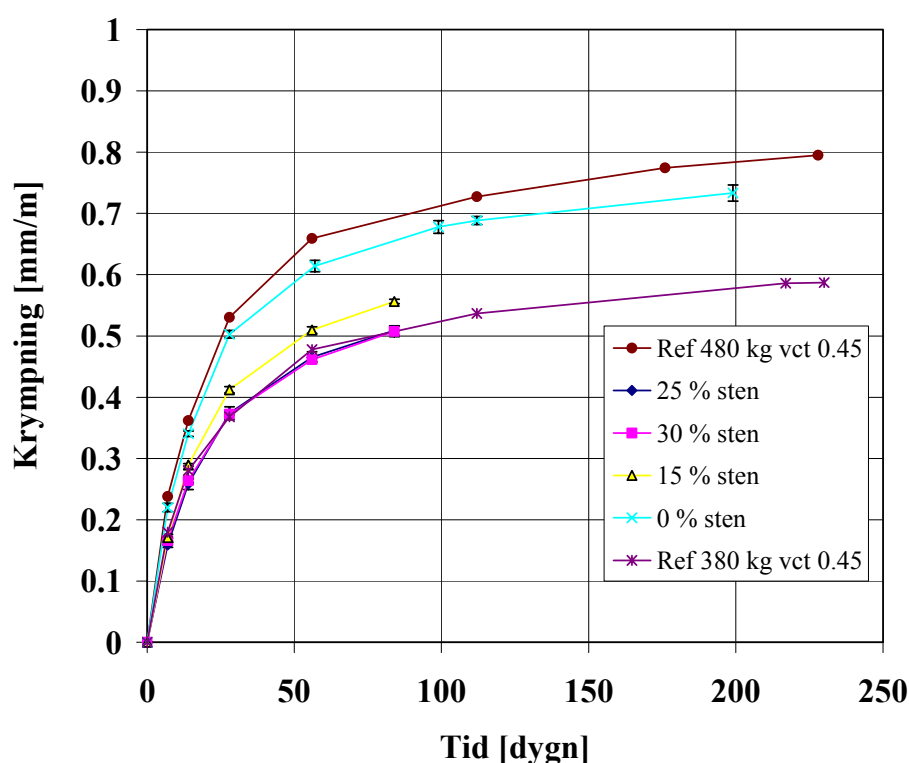
Shrinkage of mixed intended for shotcrete. No set accelerators.



Figur 4.36. Viktminskning hos laborietillverkade sprutbetonger utan accelerator.

Decrease in weight for concrete mixed intended for shotcrete.

I en serie undersöktes inverkan av betongens stenhalt på reologin. Även för dessa betonger göts balkar för mätning av uttorkningskrympningen. Betongernas sammansättning redovisades i tabell 4.5. I Figur 4.37 redovisas betongernas krympning fram till och med 200 dygns ålder. Av figuren framgår att krympningen för betongerna med inblandad sten (8/11 mm) krymper mindre än betongen utan sten (vct 0,50). Betongerna med 25 % och 30 % sten uppvisar samma krympbelopp som Ref. 3 (vct 0,45) trots det högre vattencementtalet. En tydlig skillnad mellan betongerna med olika stenhalt är att den erforderliga flytdosen för att nå ett specifikt sättmått varierade mellan 6,1 kg och 2,9 kg per kubikmeter betong. Det har observerats i tidigare arbeten att betonger med högt flytmedelsinnehåll kan ge större krympning. Orsaken är dock inte utredd. Det behöver således inte vara flytmedlet i sig som orsakar den större krympningen utan det kan finnas andra orsaker som även inverkar på betongens flytmedelsbehov.



Figur 4.37 Uttorkningskrympning hos betonger med 0 % till 30 % 8/11 mm sten. Betongerna med sten innehåller 380 kg cement och har ett vct på 0,50.

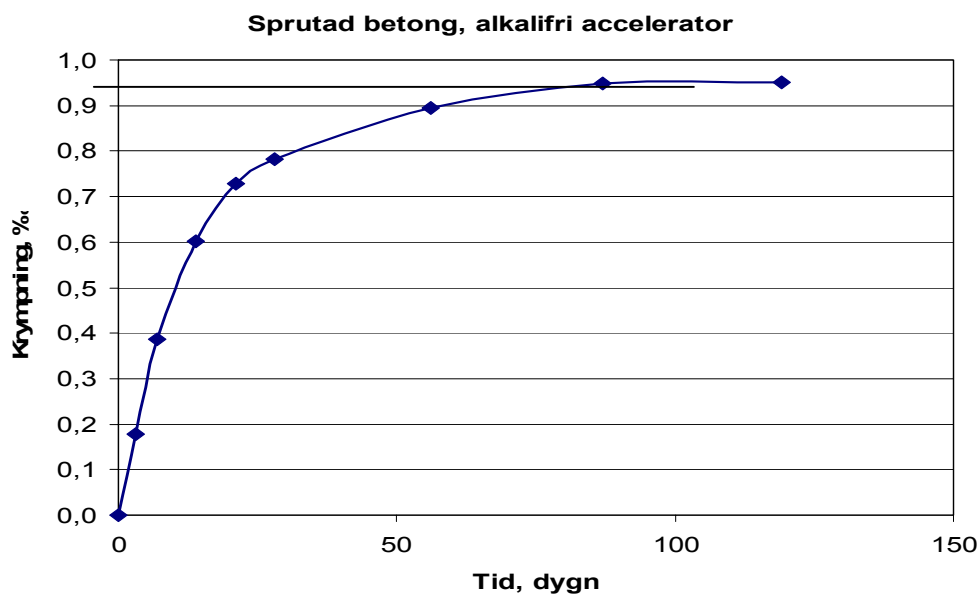
Drying shrinkage for concretes with 0 to 30 wt. % aggregate stone 8/11 mm. The concrete contains 380 kg of cement and have a w/c ratio of 0.50.

4.4.2.3 Sprutad betong

Krympmätningar har dels gjorts av betong som tagits från provsprutning i samband med verkliga sprutningar och från betong som sprutats speciellt i Vattenfall Utvecklings laboratorium i Älvkarleby.

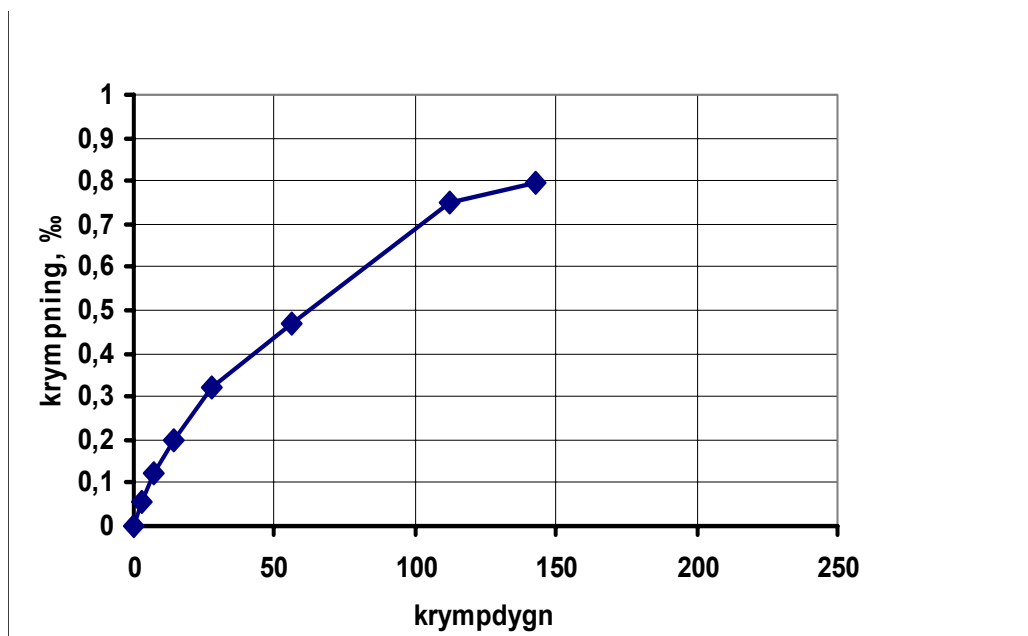
Verkliga fall

Den sprutade betongen har levererats till CBI i form av betong sprutad på provplattor i samband med tunnelsprutningar. Enligt uppgift har de hållits fuktiga fram till leverans. Den krympning som uppmäts borde därför vara uttorkningskrympning utan inslag av autogen krympning. På CBI har betongen sågats till prismor av dimensionen 100x100x400 mm. Dubbar har limmats fast på provkropparna och de har vattenlagrats i ett dygn innan första mätning och därefter placerats i klimatrums vid 20°C och RH 50 %. Prov har erhållits både från sprutningar med vattenglas, och med alkalifri tillstyvnadsaccelerator. Betongerna har en sammansättning liknande referens 1 i Tabell 3.3. Betongen med alkalifri tillstyvnadsaccelerator visar en krympning på 0,95 medan den med vattenglas visar en krympning på 0,80 ‰ efter ca 140 dygn. Som gjuten dvs. utan tillstyvnadsaccelerator visar denna betong en krympning på runt 0,75 ‰ efter motsvarande tid, se Figur 4.35. Enligt betonghandboken borde den ha krympt ca 0,70 ‰. Detta indikerar att sprutbetongen, även om man inte beaktar eventuell autogen krympning krymper mera än vanlig betong. Som också pastaförsöken indikerar så krymper betongen med alkalifri tillstyvnadsaccelerator mera än betongen med vattenglas.



Figur. 4.38. Krympningen för sprutad betong i fält. Alkalifri tillstyvnadsaccelerator.

Shrinkage for shotcrete from a real case. Alkali free set accelerator.



Figur. 4.39. Krympningen för sprutad betong i fält. Vattenglas accelerator.

Shrinkage for shotcrete from a real case. Water glass as set accelerator.

Experimentsprutningar

Sprutförsöken utfördes vid vattenfall Utvecklings laboratorium i Älvkarleby. Sågade provkroppar av dimensionen 100x100x400 mm sändes till CBI. Vid ankomsten försågs tre provkroppar med dubbar och krympmätning i 50 % RF påbörjades. Såväl längd- som viktförändringen registrerats och medelvärdet av tre provkroppar beräknades. Det är ännu för tidigt för att utvärdera resultaten från sprutningarna i Älvkarleby varför endast resultat från laboratorieblandningar redovisats här.

5 Diskussion

Sprutbetong skiljer sig från vanlig betong i flera avseenden. Sprutbetong blandas med en tillstyvnadsaccelerator i munstycket och man får en produkt som är styv på plats. Detta är inte en verklig styrka utan en falsk som beror på tillstyvnadsacceleratorn funktionssätt. Med den alkalifria acceleratoren bildas fina strålförmiga kristaller av ettringit som bildar en struktur mellan de olika partiklarna (cement och ballast). Denna struktur är relativt stabil fram tills den verkliga massiva cementshydratationen sätter igång. Cementshydratprodukterna utvecklas på ett liknande sätt som i vanlig betong men hydraten fälls ut i den av ettringit uppbyggda strukturen. Porositeten i cementpasta utgörs av vatten som inte bundits till cementshydrat. Kvicksilverporosimetri visar att strukturen inte är samma som i vanlig pasta. Den är grövre vilket även indikeras av att pasta med accelerator och betong torkar snabbare än vanlig gjuten betong.

Krympning är komplicerat. Det finns flera varianter beroende på betongens utvecklingsstadium. Normalt krymper en cementpasta när all cement är förbrukad ca 6-9 volym % beroende på typen av cement. Detta benämns kemisk krympning. Hela denna volymförändring resulterar dock inte i krympning. Istället byggs det upp en struktur som motverkar krympningen och den kemiska krympningen resulterar i ett undertryck. Denna krympning benämns autogen krympning. Med vanlig betong mäter man den autogena krympning från det att betongen är tillräckligt stel för att kunna hanteras. Den första krympningen ger sättning vid gjutning och är därför normalt utan praktisk betydelse. Sprutbetong däremot är momentant styv. Mätningar visar att den autogena krympningen hos sprutbetong är ca 0,5 % endimensionellt. (kapitel 3.4.1). Detta ger om inte direkta sprickor så i varje fall en spänning som pålagras av uttorkningskrympning. Sprutbetong måste därför vattenhärddas från början. Membran härdning ger en krympning på 0,5 % och tillåten uttorkning ett ännu större belopp.

Efter den autogena krympningen vidtar uttorkningskrympning. Denna beror på att kapillärsystemet tappar vatten vilket ger en miniskbildning som ger en hopdragning. Sprutbetong har inte samma struktur som vanlig betong. Speciellt pastan med alkalifri tillstyvnadsaccelerator är mera inhomogen och har ett grövre porsystem (Kapitel 4.1.2 & 4.1.3). Man kan även observera att pastorna (kapitel 4.4.2.1) från sprutbetong tappar vatten snabbare än den rena cementpastan. Krympbeloppet är också större. Verklig betong innehåller även ballast varför krympningen hos denna blir mindre. Alla proverna är ännu inte färdigmätta, men från dem som är klara kan man observera att sprutbetong med alkalifri accelerator krymper ca 15-20 % mer än vanlig gjuten betong med samma cementshalt och vct. Även betong med vattenglas krymper något mer än vanlig betong. Testerna med verklig betong verifierar resultaten från pastaproverna.

Krympningen beror på mängden pasta i betongen och vilken miljö den utsatts för. Ett sätt att minska krympningen är att minska mängden cementpasta, dvs. vid konstant vct minska mängden cement. Betongen måste emellertid fortfarande ha bra pumpbarhet och övriga egenskaper såsom låg återstuds etc. Sprutbetong innehåller

oftast endast naturballast i 0-8 mm fraktionen. Denna betong behöver mycket cementpasta. Ofta har man runt 480 kg cement per m³ med ett vct på runt 0,45. Med hjälp av anpassad filler och superplasticerare kan man minska halten till ca 380 kg dock med försämrade reologi (Kapitel 4.3.1.1). En höjning av vct till 0,50 ger en påtaglig förbättring av de reologiska egenskaperna. En annan åtgärd är att ersätta en del ballasten med fina luftporer. Detta minskar viskositeten markant. En kombination av luft och filler är intressant. Luften försvinner vid sprutningen varför den inte ger någon försvagning av betongen. Man kan till och med förvänta en bättre frostresistens. Vid inblandning av sten 8/11 kan man som förväntat minska mängden cementpasta och därmed krympningen.

En viktig aspekt framöver om man skall minska krympningen är att se om man utan några andra problem kan öka vct. Detta skulle även kunna ge ett töjningsmjuknande beteende vilket är önskvärt.

Försök visar att krympreducerare minskar uttorkningskrympningen radikalt. Betongförsöken indikerar att det är effektivt även här. Det enda problemet verkar vara att hydratationen försinkas något. Detta är värt att testa i praktiken.

6 Slutsatser och fortsatt arbete

Sprutbetong med alkalifri tillstyvnadsaccelerator ger en annan struktur än vattenglas. Krympbeloppet är avsevärt större och är antagligen en förklaring till varför man alltmer börjat observera sprickbildning. Delvis kan man minska krympningen genom att vattenhärda eller dimma sprutbetongen direkt efter sprutning. En membranhärdare räcker inte utan man måste tillföra vatten. En fältstudie med avseende på vad som verkligen gjorts behövs.

Försöken visar även att man kan minska krympningen genom att tillföra blandningen en krympreducerare (kommersiell produkt). Testning med sprutad betong behövs.

Krympningen är beroende på cementpasta och vattenhalt. Genom en mera noggrann proportionering kan man minska pastamängden men det är svårt att minska den till under 20 % utan att försämra reologin. Sambanden mellan reologi pumpbarhet och sprutbarhet är dock inte helt säkerställda varför experiment med verklig betong behövs för att få fram hur mycket man kan sänka vatten och pastamängd. Man bör även närmare se på vilket vct som den hårdnade sprutbetongen behöver. Tillsatts av stora mängder luft är ett effektivt sätt att minska mängden pasta. Detta ger dessutom en frostbeständig betong.

7 Referenslista

ACI Committee 506, "Guide to shotcrete", ACI 506R-90.

Aziz, S., Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong. TRITA-BKN. Examensarbete 227, KTH, Betongbyggnad 2005.

Armelin, H.S., Banthia, N., "Mechanics of aggregate rebound in shotcrete – (Part I)", *Materials and Structures*, vol. 31 (1998), s. 91-98.

Austin, S.A., Robins, P.J., Goodier, C.I., "The rheological performance of wet-process sprayed mortars", *Magazine of Concrete Research*, vol. 51 No. 5 (1999), s. 341-352.

Austin, S.A., Robins, P.J., Goodier, C.I., "Low-volume wet-processed sprayed concrete: pumping and spraying", *Materials and Structures*, 38 (2005), s. 229-237.

Ballou, M., "Shotcrete rebound – How much is enough?", *Shotcrete* vol. 5 no. 4 (2003), s. 32-33.

Betonghandboken, "Arbetsutförande, projektering och byggande", AB Svensk Byggtjänst och Cements AB, ISBN 91-7332-586-4.

Banfill, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete. *Concrete Plant International*, 2 - April (2004).

Beaupré, D., "Rheology of high performance shotcrete", PhD. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, (1994), ISBN 0-315-95309-8.

Beaupré, D., "Rheology of high performance shotcrete", PhD. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, (1994), ISBN 0-315-95309-8.

Beaupré, D., "Shootability of fresh shotcrete", *Production methods and workability of concrete*, edited by P.J.M. Bartos, D.L. Marrs and D.J. Cleveland, 1996, ISBN 0 419 22070 4.

Beaupré, D., Mindess, S., Morgan, D.R., "Development of high performance shotcrete", *Shotcrete for underground support VI, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Niagara-on-the-Lake, Canada, May 2-6, 1993*, s. 1-8.

Blindheim, O.T., Aagaard, O.T., "Frequently asked questions about sprayed concrete. Answers for the practitioner", *Second International Symposium on Sprayed Concrete*, Chapdelaine, F., Beaupré, D., "Pumping fiber-reinforced wet-mix shotcrete", *Shotcrete Magazine*, May 2000, s. 36-37.

Concrete: Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Gol, Norge, 1996, s. 31-40.

Browne, R.D., Bamforth, P.B., "Test to establish concrete pumpability", Journal of American Concrete Institute, Proceedings, 74 (1977), s. 193-207.

Chandra, P.U., Taketo, U., "Influence of the presence of paste layer on rebound of shot mortar", Proceedings of the 52th Annual Conference on the Japan Society of Civil Engineers, 5, 1997.

Cooke, T.H., "Concrete pumping and spraying: A practical guide", Thomas Telford Ltd, 1990, ISBN: 0 7277 1505 4.

Dove, P.M., Rimstedt, J.D., Silica-water interaction, i Reviews in mineralogi, Silica, physical behavior, geochemistry, and material applications, Ed. Heany, P.j., Prewitt, Gibbs, G.V., Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy. Vol 29, p 259-301, 1994.

Figueiredo, A.D., "Rheological behaviour of dry-mix shotcrete", High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures", Proceedings, Second CANMET/ACI International Conference, Gramado, RS, Brazil (1999), s. 113-128.

Armelin, H.S., Banthia, N., "Development of a general model of aggregate rebound for dry-mix shotcrete – (Part II)", Materials and Structures, vol. 31 (1998), s. 195-2

Fjällberg, L., Lagerblad, B., Cementbaserade injekteringsmedel-olika typer, cementreaktioner och flytförmåga, CBI rapport 1:2003, Stockholm 2003.

Fjällberg, L., Krympreducerares inverkan på cementbaserade materials krympning. CBI rapport 1:2002, Stockholm 2003.

Ghio, V.A., Monteiro, P.J.M., "The effects of polysaccharide gum additives on the shotcrete process", ACI Materials Journal, v.95 no. 2 (1998), s. 152-157.

Hammer, T.A., Test methods for linear measurements of autogeneous shrinkage before setting, in Autogeneous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the international Workshop organized by JCI, Hiroshima 1998, Ed; Tazawa, E., E&FN Spon, London & New York, 1999.

Holt, E.E., Leivo, M.T., Autogeneous shrinkage at very early ages. in Autogeneous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the international Workshop organized by JCI, Hiroshima 1998, Ed; Tazawa, E., E&FN Spon, London & New York, 1999.

Ghio, V.A., "The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process", PhD. Thesis, The University of California at Berkeley, (1993), UMI Dissertation Services, order nr 9407969.

Jolin, M., Beaupré, D., "Temporary high initial air content wet process shotcrete", Shotcrete Magazine, Feb. 2000, s. 22-23.

Jolin, M., Beaupré, D., "Understanding wet-mix shotcrete: mix design, specifications, and placement", Shotcrete vol. 5 no. 3 (2003), s. 6-12.

Justnes, H., Sellevold, E.J., Reyniers, B., Van Loo, D., Van Gemert, A., Verbowen, F., Van Gemert, D., The influence of cement characteristics on chemical shrinkage, in Autogeneous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the international Workshop organized by JCI, Hiroshima 1998, Ed; Tazawa, E., E&FN Spon, London & New York, 1999

Kim, Y.Y., Kong, H.J., Li, V.C., "Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting", ACI Materials Journal, vol. 100 no. 6 (2003), s. 511-518.

Melbye, T., Dimmock, R., Garshol, K.F., "Sprayed concrete for rock support", Division of Degussa Construction Chemicals Ltd (1994), www.degussa-ugc.com/NR/rdonlyres/59F1856C-87C4-4C92-A0E5-74BE6FAA08B9/0/SprayedConcrete.pdf.

Parker, H.W., Fernandez-Delgado, G., Lorig, L.J., "A practical new approach to rebound losses", Shotcrete for ground support: Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Tidewater Inn, Easton, Maryland, oktober 4-8, 1976, New York; Detroit, Michigan: ASCE, ACI, c. 1977, s. 149-187.

Pfeuffer, M., Kusterle, W., "Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete", Cement and Concrete Research 31 (2001), s. 1619-1625.

Schallom, R., Ballou, M., "What you need to know about wet-mix shotcrete", Shotcrete vol. 5 no. 1 (2003), s. 22-27.

Syrjänen, Pauli., "High strength shotcrete", Second International Symposium on Sprayed Concrete: Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Gol, Norge, 1996, s. 286-298.

Wallevik, O.H., Kompendium skriven för kursen "Rheology of Coarse Particle Suspensions, such as Cement Paste, Mortar and Concrete" som hölls på Cement och Betong Institutet den 30-31 oktober 2000.

Warner, J., "Understanding shotcrete – The fundamentals", Concrete International, vol. 17 no. 5 (1995), s. 59-64.

Wolsiefer, J., Dudley, R.M., "Silica fume in shotcrete", Concrete International no 4, april 1993, s. 34-38.

Wombacher, F.J., Maeder, U., Sommer, M., "Low cement content shotcrete: A comparison", Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 2003, ISBN: 0-87031-113

Xu, Q, Stark, J., Quantification of cement hydration when using an alkalifree setting accelerator, ZKG, vol 10, sid 74-80, 2005. Xu, Q, Stark, J., Quantification of cement hydration when using an alkalifree setting accelerator, ZKG, vol 10, sid 74-80, 2005.

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--86--SE

tblk.