



STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

HYDRATATION OCH KRYMPNING HOS SPRUTBETONG

Arbetsrapport

Björn Lagerblad

Jonas Holmgren

Leif Fjällberg

Carsten Vogt

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

Hydratation och krympning hos sprutbetong

Arbetsrapport

Björn Lagerblad, Avd. Betongbyggnad, Inst Byggvetenskap, KTH

Jonas Holmgren, Avd. Betongbyggnad, Inst Byggvetenskap, KTH

Leif Fjällberg, Cement och Betong Institutet

Carsten Vogt, Cement och Betong Institutet

Hydratation och krympning hos sprutbetong.

Björn Lagerblad
Jonas Holmgren
Leif Fjällberg
Carsten Vogt

Avd. Betongbyggnad, Inst Bygghvetenskap, KTH
Avd. Betongbyggnad, Inst Bygghvetenskap, KTH
Cement och Betong Institutet
Cement och Betong Institutet

Arbetsrapport

Denna arbetsrapport är resultatet av en inledande studie för att klarlägga skillnader i krympningsegenskaper hos sprutbetong jämfört med gjuten betong. Resultaten är baserade på ett begränsat antal försök i laboratorieskala och ska till vidare ses som indikationer och en utgångspunkt för fortsatta undersökningar för att få en mera fullständig bild av krympningsförloppen och deras betydelse vid användning av sprutbetong vid bergförstärkning.

Arbete har finansierats av SveBeFo samt Avd för Betongbyggnad, Vägverket och Cement och Betong Institutet, med Jonas Holmgren som projektledare och Björn Lagerblad som ansvarig för genomförande av försök, tolkning och rapportering. En referensgrupp bestående av Tommy Ellison, Besab, Tomas Franzén, SveBeFo, Bo Malmberg, WSP, Lars Malmgren, LKAB, Kjell Windelhed, VV, och Arvid Taube, BV, har följt arbetet.

Innehållsförteckning

1	Orientering	1
2	Sprutbetong, kemiska systemet	1
2.1	Portlandcement och dess hydrataion	1
2.2	Tillstyvnadsacceleratorer och betong	3
2.2.1	Tillstyvnadsacceleratorer	4
2.2.2	Alkaliaccelerator	5
2.2.3	Alkalifri accelerator.....	6
2.3	Krympmekanismer i betong	7
3	Undersökningar	9
3.1	Hydratationsförloppet.....	9
3.2	Krympning	9
3.2.1	Stora sprutan.....	9
3.2.2	Lilla sprutan.....	10
3.2.3	Försök i Törnskogstunneln.....	11
4	Resultat	13
4.1	Hydratationsförlopp	13
4.1.1	Sammansättning	13
4.1.2	Reaktionsförlopp	13
4.1.3	Diskussion av reaktionsförloppet	16
4.2	Krympning	17
4.2.1	Stora sprutan.....	17
4.2.2	Lilla sprutan.....	19
4.2.3	Törnskogsleden	19
4.2.4	Diskussion krympning.....	20
5	Slutsatser och fortsatt arbete	22
6	Referenser	23

Sammanfattning

Denna undersökning är föranledd av att man speciellt vid dräner funnit att sprutbetong uppvisar en onormalt stor uppsprickning. Undersökningen genomfördes för att bättre kunna förstå vad det är för skillnad på vanlig gjutbetong och sprutbetong när det gäller krympning. Utredningen innehåller dels en teoretisk betraktelse av hur de olika tillstyvnadsacceleratorerna påverkar betongens struktur dels mätningar av hydratationsförloppet och krympbelopp.

Vid betongsprutning tillsätts normalt en tillstyvnadsaccelerator i munstycket. Tillstyvnadsaccelerator skiljer sig från andra accelerators genom att den inte påskyndar cementhydratationen utan bygger upp en falsk struktur, en struktur i vilken sedan de massiva cementhydratationerna som ger den hårda betongen sker. Detta medför att de flytrörelser som sker i vanlig betong under öppethållandetiden måste ske i en fast struktur vilket ger en annan slutprodukt.

Försök visar att sprutbetongen under öppethållandetiden när styrkan endast är några MPa är mycket känslig för fuktrörelser. Vid uttorkning sker en kraftig krympning medan det vid fuktillförsel sker en mindre expansion. Även vid förhindrad vattenavgång sker en signifikant krympning. Detta medför att det är mycket väsentligt att sprutbetong fukthärdas noga.

När den hårdnade sprutbetongen utsätts för torkning sker en krympning med åtföljande uppsprickning. Försök med cementbruksprismor jämfört med gjutna prismor visar att krympningen är ca 30 % större för alkalifri- och ca 10 % större för vattenglasbaserad tillstyvnadsaccelerator. Vattenavgången från den sprutade pastan är betydligt snabbare och större än för den gjutna pastan vilket tyder på att den förra har en betydligt grövre porositet vilket kan vara en av förklaringarna till skillnaden. Om man även betänker att en sprutbetong normal innehåller mindre sten och större mängd cementpasta än vanlig sprutbetong är risken för krympsprickor betydligt större. Man bör därför undersöka närmare om man kan ändra betongreceptet eller med hjälp av krympreducerare eller fiber kan minska respektive sprida sprickorna bättre.

Detta är en preliminär första undersökning som visar på tendenserna. För att helt klarlägga fenomenen krävs en större undersökning med verkligt sprutbetong och mera sofistikerade materialanalyser.

1 Orientering

Våtsprutad sprutbetong är i grunden vanlig betong men med något högre cementhalt och med mindre D-max. Skillnaden ligger i själva applikationen där sprutbetongen blandas med en tillstyvnadsaccelerator i sprutmunstycket så att den styvnar momentant på den applicerade ytan. Detta kan förväntas ge förändringar i den tidiga hydratationen och en annorlunda struktur, som i sin tur kan påverka den stelade betongens egenskaper.

Det finns anledning att förmoda att sprutbetong inte krymper på samma sätt som vanlig betong. Detta har indikerats av stora krympsprickor på framför allt dräner i Södra Länken och på andra ställen.

För att få fram skillnaderna har cementsystemet med tillstyvnadsaccelerator granskats och försök gjorts för att klarlägga skillnaderna mellan sprutbetong och vanlig betong. Syftet med undersökningen är att klarlägga mekanismerna så man har ett underlag för eventuella åtgärder för att förbättra sprutbetongs egenskaper i konstruktioner för bergförstärkning samt vid reparation.

2 Sprutbetong, kemiska systemet

Tillstyvnadsacceleratorer är kemikalier som samverkar med de kemiska reaktioner som bidrar till den vanliga cementshydratationen, men som momentant får cementpastan och därmed betongen att styvna. Den blandas med betongen i munstycket på sprutan och reagerar med cementpastan redan på vägen mellan sprutan och underlaget. 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 acceleratorer. Dessa har olika verkningssätt, men för att förstå verkningssättet måste man förstå cements tidiga hydratation.

2.1 Portlandcement och dess hydratation

Huvudbeståndsdelen i portlandcement är kalksten och lera i bestämda proportioner som bränts vid ca 1500°C så att cementklinker bildats. Cementklinkern har efter kylning malts och blandats med gips. I kontakt med vatten reagerar cementet under värmeutveckling så att det bildas en hårdnad cementpasta, limmet i betong.

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

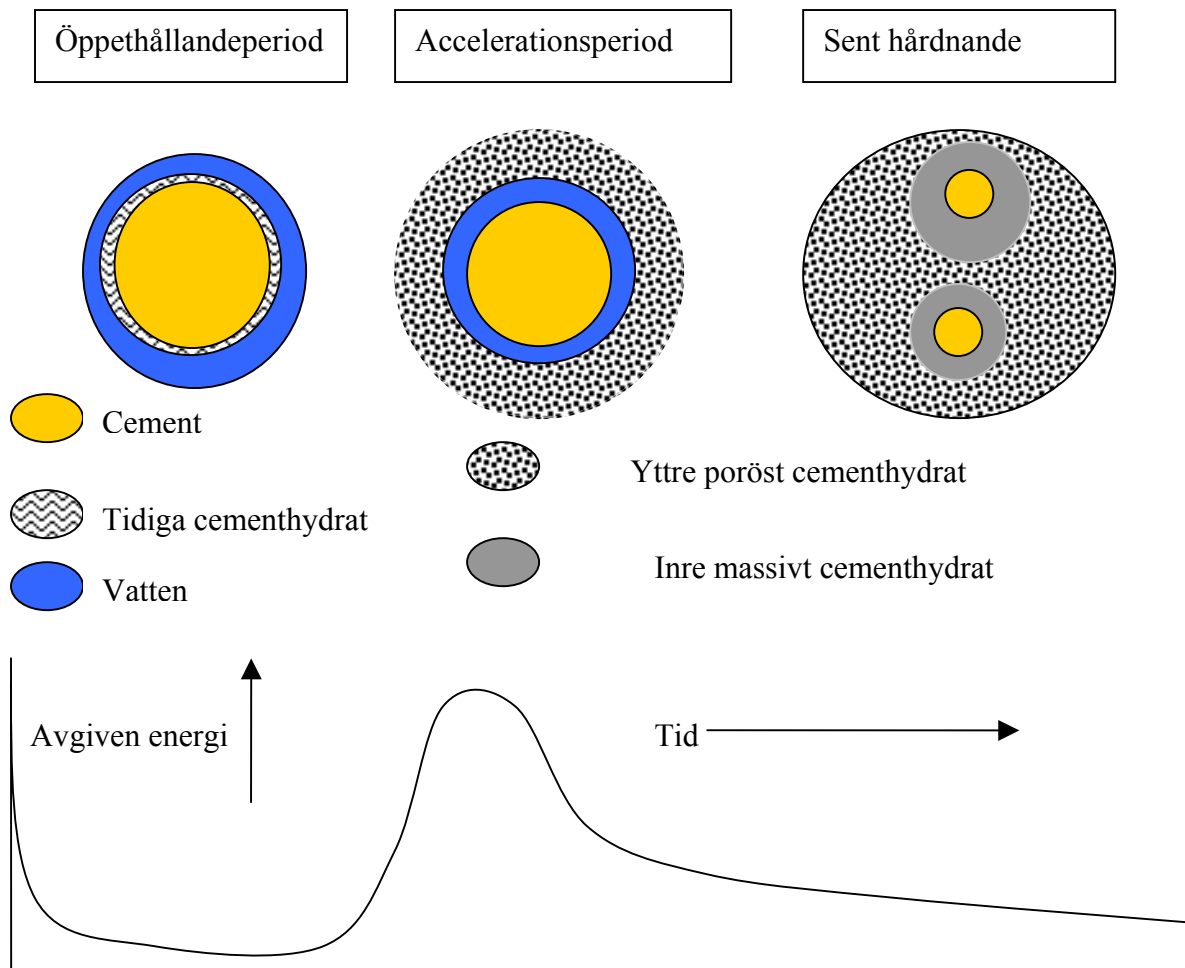
styra tillstyvnad och rörlighet. Det är även viktigt att reglera gipsens löslighet så att den motsvarar mängden frigjord aluminat.

Under sitt tillstyvnande genomgår cementpastan, betongens bindmedel, fyra stadier (figur 1).

1. I det första stadiet väts cementet. Detta ger en tunn hinna av cementhydrat som skyddar cementkornet och förhindrar/fördröjer fortsatt hydratation. Skalet/hinnan består av en blandning av primitiv C-S-H och ettringit.
2. Under steg två hindrar de tidiga hydraten massiv reaktion men det sker omlagringar i hydratationsprodukterna som möjliggör steg 3. Perioden benämns öppethållande-perioden 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 hydratationen tar fart. De nya hydratprodukterna avsätts utanför de tidigare bildade hydratprodukterna 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/sulfat kvot. En långsammare hydratationsprocess av återstående cement vidtar. Man får även en omstrukturering av cementgelen (C-S-H) som blir mera regelbundet uppbyggd.

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 denna rapport behandlas endast våtsprutad betong, dvs. vanlig betong som är flytande och kan pumpas. Den enda metod med våtsprutad betong som inte använder en tillstyvnadsaccelerator är ”luftmetoden”, som baseras på en styv betong som gjorts rörlig genom att blanda in stora mängder luft. Vid själva sprutningen försvinner största delen av luften vilket ger en styv betong.



Figur 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.

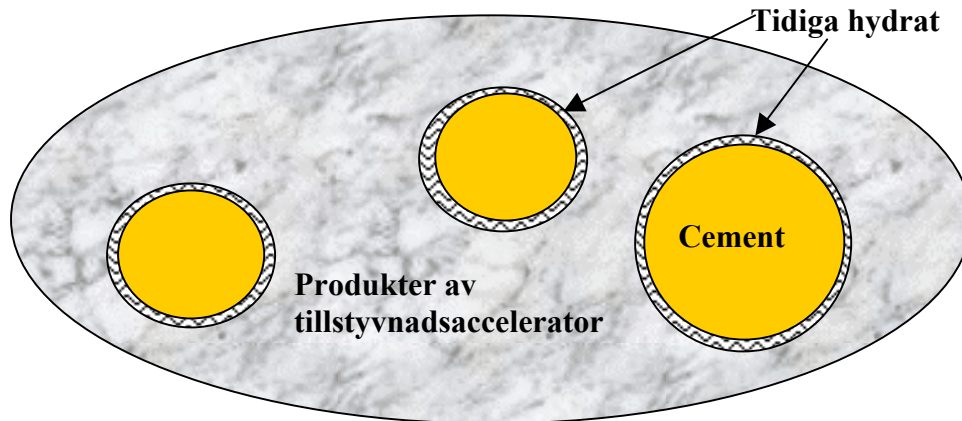
2.2 Tillstyvnadsacceleratorer och betong

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 ger 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 tillstyvnadsacceleratorn givit.

I vanlig betong beror tillstyvnade 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 tillstynar 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. I en sprutbetong fylls porvätskan under öppethållandeperioden med produkter från tillstyvnadsacceleratorn, vilket ger den struktur som håller betongen på plats. I denna struktur sker sedan accelerationen och det sena hårdnandet.

2.2.1 Tillstyvnadsacceleratorer

På marknaden finns tre principiellt skilda typer av tillstyvnadsacceleratorer;

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

Av dessa tre är den alkalifria acceleratorm, av olika orsaker, mest vanlig idag.

2.2.1.1 Vattenglas

Vattenglas som är den äldsta tillstyvnadsacceleratorm är alkalisilikat i vattenlösning. 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 alkalin (hög 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 förkommer 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 fodras emellertid en hög ytladdning, dvs. ett högt (pH > 10-11). Utan kalciumjoner stiger lösligheten med stigande pH.



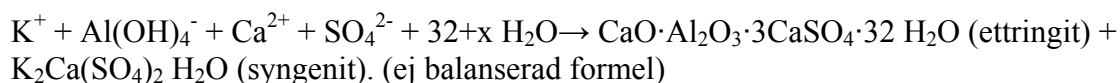
I kontakt med kalciumjoner bildas primitiv C-S-H av samma typ som på cementklinkerkornen. Vid cementreaktionen frigörs SiO_4^{4-} från alit och belit och reagerar med Ca^{2+} från porlösningarna. Skillnaden är att när det gäller vattenglas så sker reaktionen i porlösningarna, vilket ”geler” cementpastan 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.

2.2.2 Alkaliaccelerator

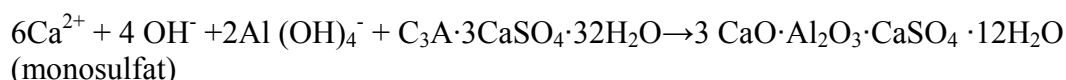
Den alkalihaltiga acceleratoren är en lösning vars huvudbeståndsdel är natrium- eller kaliumaluminat. Ofta innehåller den även en del vattenglas och alkalikarbonater.

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

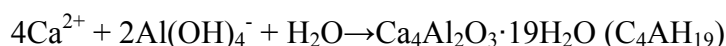
Vid kontakt med den unga cementporlösningen kommer alkalialuminaten att bilda ettringit med gipset från cementet.



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.

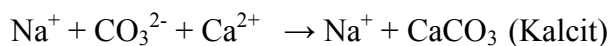


Sulfathalten är dock i allmänhet för låg för att binda all alkalialuminat varför det i stället bildas kalciumaluminathydrat samma som vid falsk bindning.



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 alkaliacceleratorn att göra blandningen känslig för sulfatangrepp. Dessutom ger alkaliacceleratorn 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.

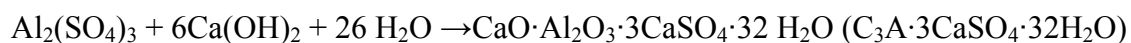
2.2.3 Alkalifri accelerator

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

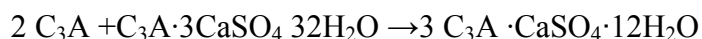
- Amorf aluminiumhydroxid Al(OH)₃
- Aluminiumsulfat Al₂(SO₄)₃
- Aluminiumklorid AlCl₃

I grunden bygger den alkalifria acceleratoren på kalcium-aluminat-sulfat reaktionerna liksom alkaliacceleratorn. 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 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 nätverkliknande 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 olika produkter och i vilken proportion som tillstyvnadsacceleratorerna innehåller 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

Man får olika typer av krympning under de tre olika stadierna i betongs tillstyvnad; färsk betong, ung betong 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 brukar tillföra vatten (härdning).

I 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 nivellering. Även under det plastiska stadiet, om betongen är förseglad, en svag krympning, autogen krympning. Vid vattentillförsel sker en svag svällning.

Om betongen tappar vatten när en struktur har börjat byggas upp får man en plastisk krympning som kan ge en kraftig sprickbildning. Vid tillförsel av vatten ger samma betong en svag svällning. När ung betong förlorar vatten får man i den unga betongen en plastisk krympning som i den hårdnade betongen övergår till en uttorkningskrympning. Cementpastan är porös och när vatten lämnar betongen drar porerna ihop sig vilket får betongen att krympa. När det gäller vanlig betong vet man ganska väl hur mycket betongen krymper och hur man motverkar/minimerar krympningen.

Konsekvenserna av de olika typerna av krympning beror på betongens fysikaliska status. Den färska och unga betongen kan i viss utsträckning deformeras plastiskt, vilket medför att man inte får några konsekvenser. Vid för stark uttorkning kan man dock få plastisk uttorkning och uppsprickning. Generellt kommer betong att torka efter att vattenhärdningen upphört. Hur mycket den kommer att torka beror på RH och temperatur vid konstruktionen. Det beror dessutom på porstrukturen som i vanlig betong huvudsakligen beror på relationen mellan cement och vatten, vct.

Sprutbetong skiljer sig från vanlig betong genom att tillstyvnadsacceleratorerna momentant bygger upp en struktur i porlösningen mellan cementkornen. Man måste också beakta volymförändringarna när tillstyvnadsacceleratorerna reagerar. När den verkliga hydratationen påbörjas under accelerationsperioden kan man förvänta en annan struktur och ett annat por/kapillärsystem vilket i sin tur påverkar krympningen.

Man måste också beakta att kalcium/aluminat/sulfatsystemet innehåller vattenrika mineral och att dessa kan omvandlas vid uttorkning/vätning. Exempelvis ger bildning av ettringit i hårdnad betong upphov till en svällning som kan spräcka betong (sulfatreaktion och försenad ettringit). En nedbrytning av ettringit till monosulfat ger en volymminskning som om den sker kan ge en krympning.

Då uttorkningskrympningen beror på porsystemet och då detta inte är likadant som i gjutbetong kan man inte förvänta samma krympning. Man behöver veta hur krympningen ser ut från att sprutbetongen sitter på ytan och hur den kommer att krympa efter att vattenhärdningen upphört. Detta medför att man för sprutbetong måste ha information om volymförändringar från sprutningen och framåt. Man kan inte som för vanlig betong börja mätningarna i hårdnad betong.

3 Undersökningar

Den här undersökningen har framför allt inriktats på två variabler, påverkan av tillstyvnadsacceleratorerna på cementshydratationen och krympningen mätt på färsk sprutbetong.

3.1 Hydratationsförloppet

Hydratationsförloppet kan mätas genom den värme som hydratationen avger. I vanlig betong får man en första värmepuls när cementet väts och de första hydratprodukterna bildas på cementkornen (se Fig. 1) Under öppethållandeperioden är aktiviteten låg medan accelerationsperioden kan registreras som en kraftig värmeutveckling. Efter ett värmemaximum avtar aktiviteten successivt. Accelerationsperioden sammanfaller med hydratationen av kalciumsilikaterna och tillstyvnandet/hårndandet av betongen.

Kalorimetern (isoterm kalorimetri) mäter värmeutvecklingen vid 20°C. Metodiken bygger på att mäta den energi som måste ledas bort för att behålla temperaturen. Vid sprutning mot berg kommer emellertid betongen att snabbt kylas ner till bergtemperaturen vilket gör att tiderna inte blir helt relevanta. Därför gjordes även temperaturmätningar med termoelement på betong som placerats i kylrum vid runt 8-10°C (skall likna bergets temperatur).

Dessutom har tryckhållfastheten hos små provkroppar av sprutad betong undersökts efter ett och två dygn.

För att undersöka hydratationsutvecklingen har fyra acceleratorer, tre alkalifria och vattenglas testats. Dessa benämns i fortsättningen

1. Af -1
2. Af -2
3. Af -3
4. Vg

Hydratationsförloppet har undersökts med olika doseringar i samma blandning (95 % cement, 5 % silikastoft, vbt 0,38). Det har gjorts kalorimetri på både på handblandad och sprutad betong.

Enligt produktbladen innehåller alla de alkalifria acceleratorerna aluminiumsulfat som huvudkomponent. För att finna de övriga komponenterna gjordes en röntgendiffraktionsundersökning av intorkade prover. Diagram finns redovisade i bilaga 1.

3.2 Krympning

3.2.1 Stora sprutan

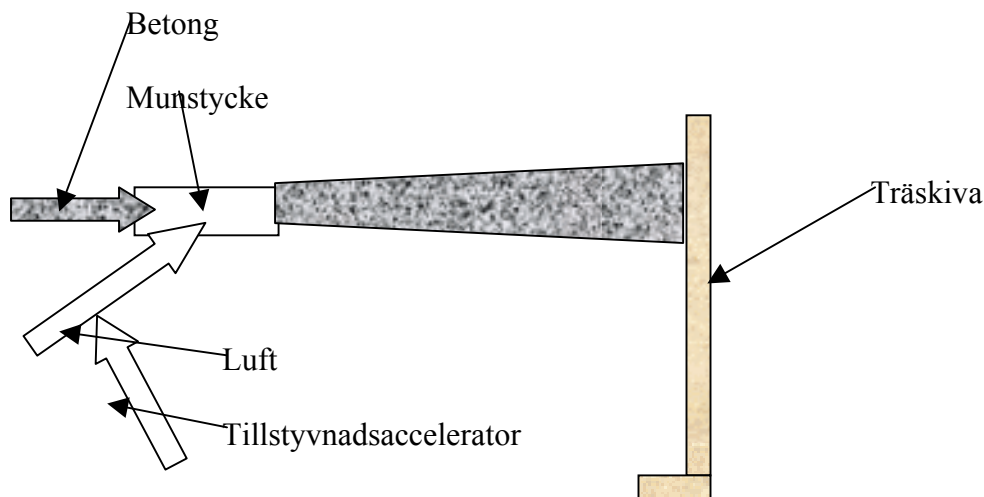
Vanlig betong med ballast tillverkades.

Recept i kg substans per kubikmeter betong

Ballast 0-4 mm	1540	
Anläggningscement	500	
Silikastoft	25	
Vatten	236	vct=0,47, vbt=0,45
SP Glenium 51	1,5	

Denna betong pumpades i en större spackelspruta mot vertikalt stående träformar. Tryckluft tillfördes i munstycket. Tillstyvnadsacceleratorn pumpades in i luftströmmen och mängden avpassades så att man fick en bra tillstyvnad på träytan. Denna uppställning medger inte att man får fram någon exakt mängd tillstyvnadsaccelerator utan endast en uppskattad mängd.

Sprutningen gav en kaka av sprutbetong. Ur denna kaka sågades och frigjordes prismor på vilka mätdubbar placerades i uppborrade hål och limmades fast. Mätningarna gjordes med en extensiometer med manuell avläsning. Den första mätningen gjordes inom en timme. Därefter placerades mätkropparna i kylrum vid 8 °C med ett RH på 70 %. Under hela första perioden hölls provkropparna fuktiga med våta handdukar. Prismorna hölls under de första 7 dyggen våta med hjälp av handdukar som hölls fuktiga. Därefter tilläts de att torka ut.



Figur 3. Försöksuppställning med stora sprutan.

3.2.2 Lilla sprutan

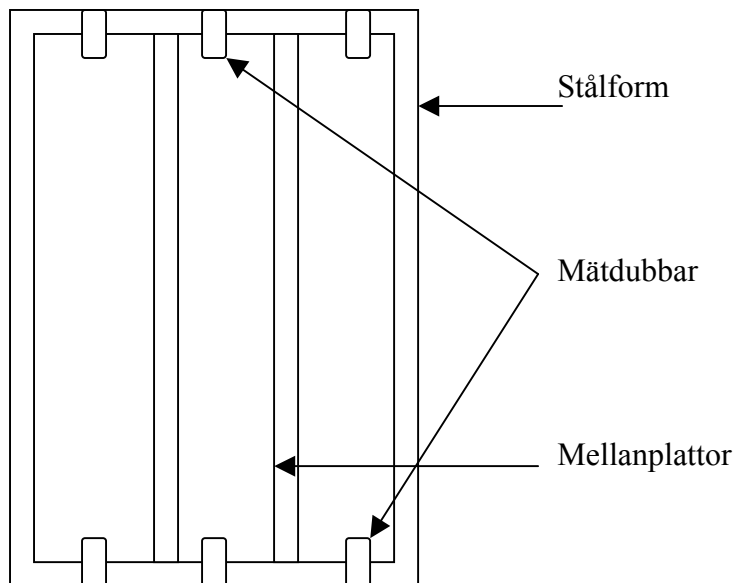
Då försöksuppställningen gav problem med mätningar och uttorkningen blir mycket långsam gjordes även en serie accelererade prov med ren cementpasta. Cementpasta är sammansatt av 1 kg anläggningscement, 50 gram silikastoft och 400 gram vatten. Detta ger ett vct på 0,40 och ett vbt på 0,38. Den lilla sprutan är en modifierad spackelspruta för små arbeten. Den kan endast spruta en cementpasta. Uppställningen är samma som för den stora sprutan.

Tillstyvnadsacceleratoren pumpas in i luftströmmen och blandas med cementpastan i munstycket.

Mätningarna gjordes på fasta provkroppar med ingjutna mätdubbar i ändorna (Fig.4), vilket ger en bättre mätnoggrannhet

Cementpastan sprutades i vertikalt stående stålformar med från början fastsatt mätdubb. Direkt efter sprutningen slogs mellanplattor in, så att cementpastan stelnade i form av prismor. Stålformarna placerades i fuktkammare.

Prismorna avformades efter 18-20 timmar och en första mätning gjordes. Med detta förfarande missar man de tidiga rörelserna, men man får en större precision. Efter avformning förvarades provkropparna först 7 dygn i fuktrum varefter de placerades i klimatkammare vid 20°C och RH 65 %. Detta förfarande liknar till del SS 137215 som stipulerar att krympningen påbörjas efter 1 vecka i vattenbad. Då försöken utförts på tunna kroppar med ren pasta blir detta en accelererad test.



Figur 4. Uppställning för lilla sprutan. Mellanplattorna trycks in efter sprutning och betongen jämnas ut med spatel.

3.2.3 Försök i Törnskogstunneln

Vid försöken sprutades plastfiberarmerad betong med alkalifri tillstyvnadsaccelerator mot träskivor. Försöken finns beskrivna i ett examensarbete av Aziz (2005). Vid dessa försök gjordes även mätningar av krympning (ref). Mät-dubbar i ett mätmönster sattes fast på provsprutade ytor. En första mätning gjordes inom ett par timmar. Proven härdades under plast, dvs. man kan anta att vattenavgång förhindrades. Efter ca ett dygn flyttades provkropparna från Törnskogstunneln till en sidotunnel i Södra Länken där, en andra mätning gjordes. Därefter vattenlagrades proven ca 1 vecka varefter en tredje mätning gjordes. Efter

detta förvarades provkropparna i den miljö som är i sidotunneln, vilket tyvärr råkade vara 99 % RH varför uttorkningen blev mycket liten.

4 Resultat

4.1 Hydratationsförlopp

4.1.1 Sammansättning

Röntgendiffraktion identifierar kristallina komponenter. Tillstyvnadsacceleratorerna är vattenlösningar och genom att dunsta in dem bildas kristallina salter som kan identifieras. Alla de tre alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna hade efter indunstning en torrhalt på något över 50 vikt %.

Af-1 och Af-2 innehåller båda huvudsakligen som förväntat aluminiumsulfatföreningar. Dessutom innehåller de $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{16}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ och $\text{Al}(\text{OH})_3$. I Af-1 finner man dessutom $\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH})\cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

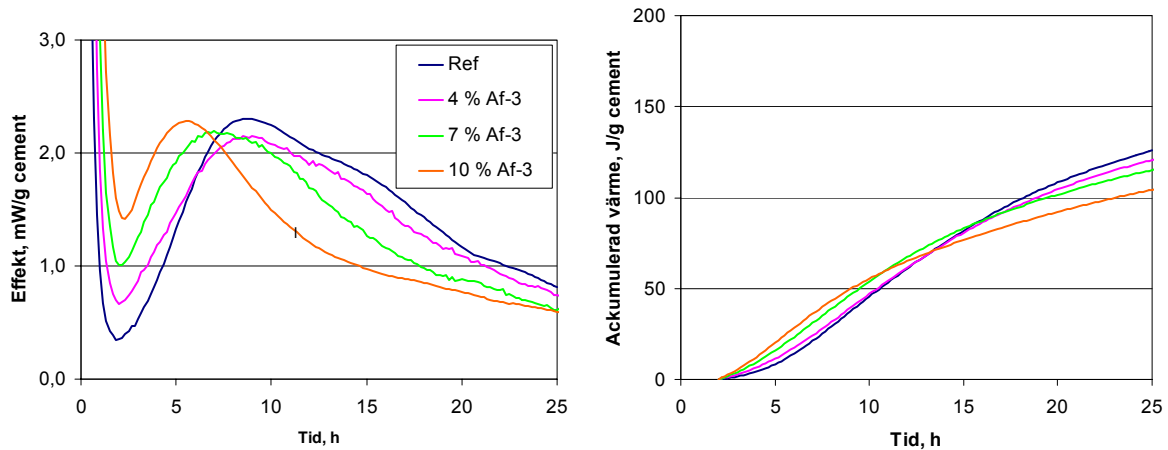
Komponenterna i Af-3 kristalliserade inte. Antagligen innehåller det någon komponent som förhindrar kristalltillväxt.

4.1.2 Reaktionsförlopp

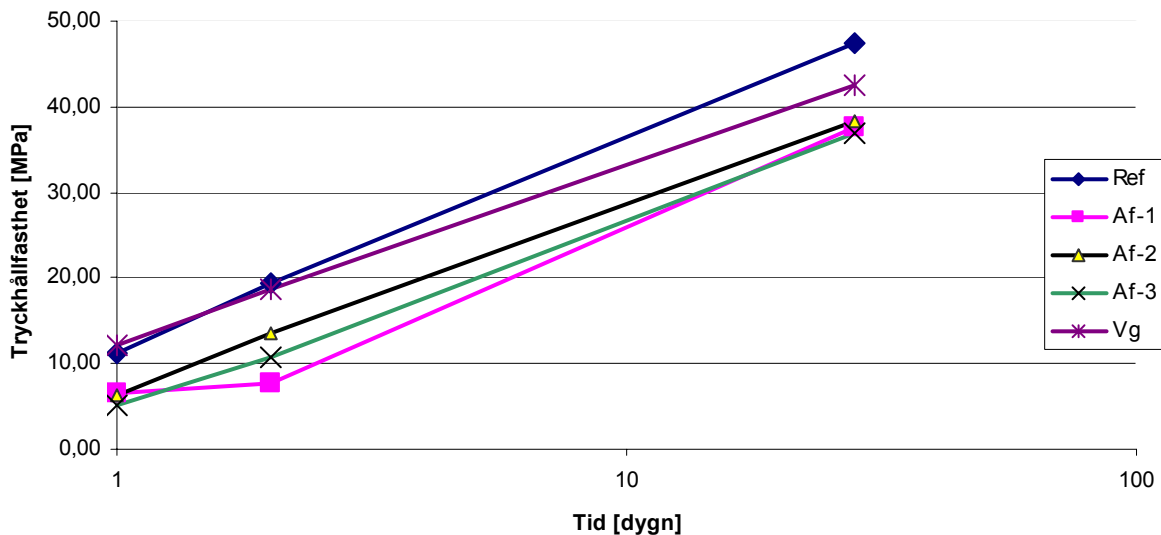
4.1.2.1 Af-3

Figur 5 visar kalorimetriresultaten från inblandning av Af-3 i laboratorium. Proven innehåller ren cementpasta med ett vbt på 0,4. Diagrammen visar en kraftig värmeutveckling i början. Den är så kraftig att kalorimetern inte hinner ta bort allt värme i början. Den falska bindningen sker under de första timmarna. I det kumulativa diagrammet har värmeutvecklingen från de första två timmarna tagits bort för att ge en bättre bild av själva cementreaktionen. Ökad inblandning av Af-3 verkar inte påverka accelerationsperiodens start. Toppen för värmeutvecklingen under accelerationsperioden avslutas allt tidigare med högre halter. Det gjordes även kalorimetri på sprutbetong med ballast som togs efter sprutning och de indikerar samma tendens. Den tidiga toppen är högre för Af-3 än de andra alkalifria acceleratorerna vilket tyder på en högre mängd reaktiv substans. Ett karakteristiskt drag för Af-3 vid högre dosering är att det reagerar snabbt och att det ger återstuds vid hög dosering.

Proven av hållfasthetsutvecklingen visar något olika resultat. Ett-dygns är liksom två-dygns hållfastheten klart lägre än för den gjutna pastan (utan tillstyvnadsaccelerator).



Figur 5. Kalorimeterresultat för Af-3 i olika doseringar. Till höger ackumulerad avgiven värme från två timmar och framåt (energin från vätning och tillstynnadsacceleratorn borttaget).



Figur 6. Tryckhållfasthetsdata 1, 2 och 28 dygn för sprutad cementpasta. Standardprisma för cementprovning (40x40x160mm).

4.1.2.2 Af-1

Liksom för Af-3 får man kraftig värmeutveckling i början. Man kan med Af-2 observera att det retarderar cementshydratationen, speciellt i högre doseringar. Man kan även observera en minskning av reaktiviteten och värmeavgivningen från den massiva cementshydratationen vilket indikerar en långsammare hållfasthetstillväxt.

Hållfasthetsutvecklingen indikerar emellertid att hållfasthetsutvecklingen är samma som för Af-3 och Af-2 under de första 24 timmarna.

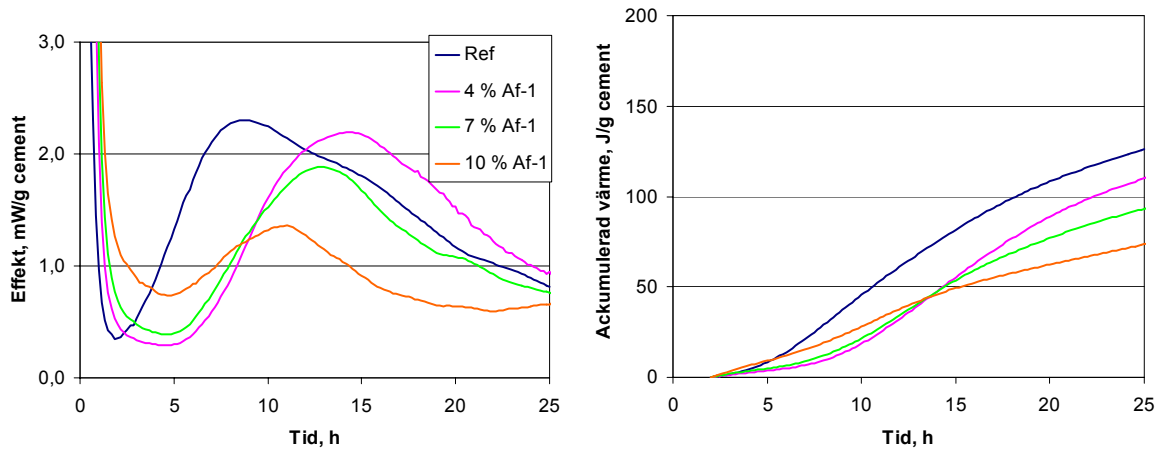
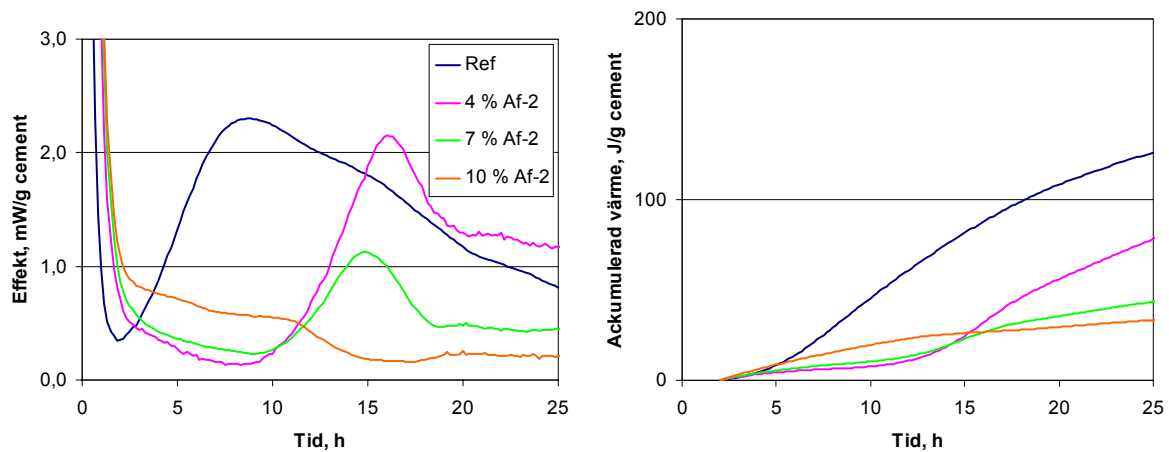


Fig. 7. Kalorimeterresultat för Af-1 i olika doseringar. Till höger ackumulerad avgiven värme från två timmar och framåt. Energin från vätning och tillstyvnadsacceleratoren är borttagen

4.1.2.3 Af-2

Af-2 visar samma tendens som Af-1 men den är ännu känsligare för överdosering. Med en överdosering (10 % inblandning) verkar den vanliga cementshydratationen nästan försvinna. Detta märks på den kumulativa energikurvan.

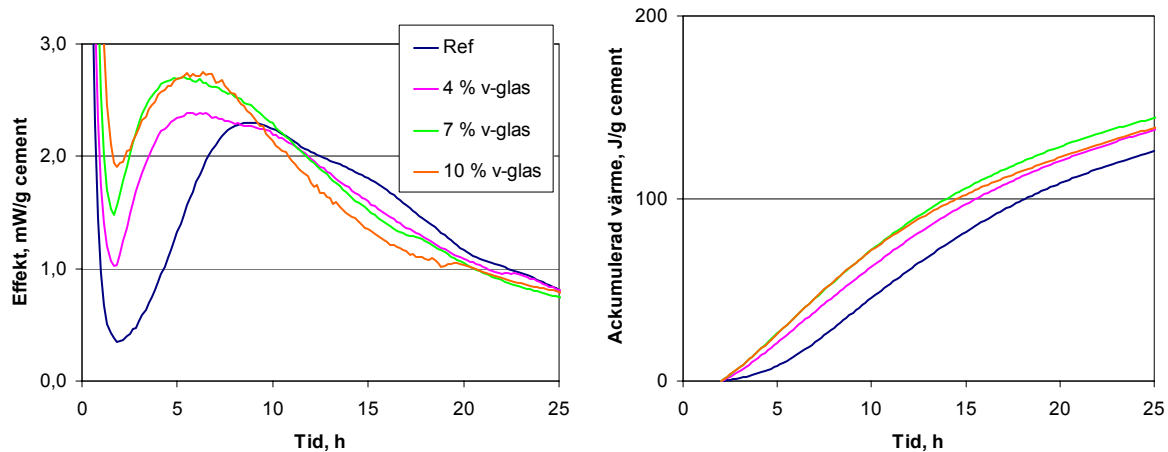
Hållfasthetsutvecklingen indikerar emellertid att hållfasthetsutvecklingen är samma som för Af-3 under de första 24 timmarna.



Figur. 8. Kalorimeterresultat för Af-2 i olika doseringar. Till höger ackumulerad avgiven värme från två timmar.

4.1.2.4 Vattenglas

Med vattenglas verkar man få en acceleration av hydratationsförloppet. Detta indikeras också av hållfasthetsutvecklingen under det första dygnet, som är klart snabbare för vattenglas.



Figur 9. Kalorimeterresultat för vattenglas i olika doseringar. Till höger ackumulerat avgivet värme från två timmar och framåt (energin från vätning och tillstyvnadsacceleratorn borttagen).

4.1.3 Diskussion av reaktionsförloppet

Denna undersökning är inte komplett och systematisk men man kan observera vissa trender och signifikativa resultat.

En kalorimeter visar det värme som de exoterma reaktionerna genererar. Vi antar att reaktionerna kommer att vara samma i en cementpasta som i en betong. Man kan klart se att tillstyvnadsacceleratorerna reagerar med produkterna från de tidiga cementreaktionerna och att detta ger en kraftig värmeutveckling. Sedan får man som med vanlig betong en lugn period som avspeglar öppethållandetiden som avslutas med en värmeutveckling orsakad av de massiva cementreaktionerna.

Vattenglas reagerar som ett resultat av det höga pH-värdet och med de kalciumjoner som vätningen av cementkornen givit. Detta verkar inte förkorta tiden tills de massiva cementreaktionerna kommer igång. När det gäller hållfasthetsutvecklingen under de första dygnet blir den ungefär samma som för vanlig betong. Detta tyder på att vattenglas inte på något signifikativt sätt förändrar hydratationskinetiken eller hållfasthetsutvecklingen. Detta kan bero på att silikaterna direkt deltar i hydratationsprocessen och att slutprodukten blir en vanlig C-S-H. Mängden kalciumhydroxid måste dock minska något och man kan förmoda att porlösningarna blir rikare på alkalijoner. Den förhöjda alkalihalten gör att betongen blir mera känslig för alkalisilikareaktioner.

När det gäller de alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna påverkar dessa hydratationsförloppet. Med både Af-1 och Af-2 får man en kraftig retardation av de massiva cementreaktionerna medan Af-3 inte verkar påverka de tidiga reaktionerna. Energiutvecklingen återspeglas inte helt i hållfasthetsutvecklingen under de första dygnet, då Af-3 trots den högre värmeutvecklingen inte ger någon snabbare hållfasthetsutveckling. För att förstå detta måste vi se på den struktur som byggs upp. Bildningen av ettringit sker också i vanlig cementpasta/betong men i mycket mindre omfattning. Detta gäller speciellt anläggningscement som är sulfatresistent och därmed har låga halter C_3A vilket medför att mängden ettringit är låg. För att förstå detta måste man beakta vilken struktur.

ettringitbildningen ger och hur detta påverkar cementporlösningarna och den vanliga cementshydratationen.

Vid kontakt med de tidiga cementporlösningarna bildas ettringit. Denna ettringit faller först som kortprismatiska kristaller som sedan successivt omkristalliserar till längre prismatiska kristaller (Xu, Q, Stark, J. & Stark 2005). Ettringit är stabil först vid ett pH-värde över 10,5. Detta medför att utfällningen gynnas av höjt pH-värde och tillgång till kalciumjoner från den tidiga vätningen av cementet. Höga halter av C_3A i vanligt cement ger en ettringitbildning på cementytorna som påskyndar accelerationsperioden men med tillstyvnadsacceleratorerna får man en motsatt effekt. Detta måste bero på att med de alkalifria acceleratorerna så sker ettringitbildningen huvudsakligen i porlösningen där ett nätverk av kristaller byggs upp, vilket i sin tur är varför man får tillstyvnaden. Man måste också beakta att ettringitbildningen konsumerar stora mängder vatten vilket i sin tur reducerar mängden vatten som är tillgänglig för cementshydratationen. Undersökningar av Xu och Stark (2005) visar att halten av Ca-joner i porlösningarna med accelerator är högre men mängden hydroxidjoner (pH) är lägre än i en referensbetong. Det beror på att de alkalifria acceleratorerna från början har ett lågt pH-värde (runt 3) och att processerna för att få bilda ettringit kräver mycket hydroxidjoner. Då det även kräver Ca-joner blir konsekvensen att det bildas relativt mindre portlandit. Denna förändring i porvattensammansättning kommer att påverka uppbyggnaden av skalet runt cementkornen vilket i sin tur påverkar när de massiva cementreaktionerna kommer igång.

Generellt ökar de alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna öppethållandetiden. Det är uppenbart att en överdosering kan ge en störning i form av kraftigt fördröjd accelerationsperiod. Detta kommer att förvärras av de låga temperaturer man ofta har på bergytor, exempelvis i tunnlar. Sammansättningen av de alkalifria acceleratorerna skiljer sig åt även om grundkonceptet är samma. I jämförelse med Af-1 och Af-2 ger Af-3 ingen fördröjning i kalorimetern, men om man i stället mäter hållfasthetsutvecklingen ger även Af-3 en försenad hållfasthetstillväxt. I samband med accelerationsperioden sker omvandlingar av ettringit och man kan förmoda att detta även påverkar hållfasthetsutvecklingen. Man kan förmoda att det finns ett samband mellan cementpastastruktur och hållfasthet. Det som ger cementpastan styrka är bildningen av C-S-H. Denna kommer att växa, inte runt cementkorn i porlösningarna, utan i ett nätverk av ettringit vilket inte ger samma struktur.

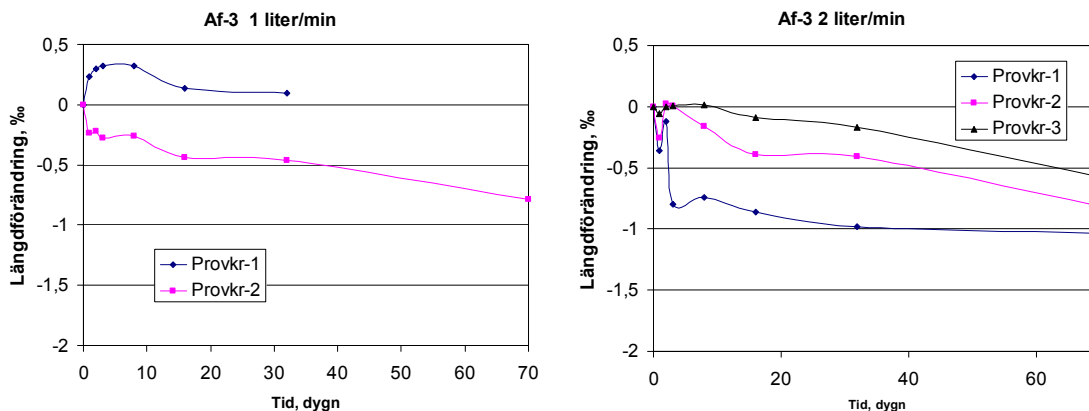
4.2 Krympning

4.2.1 Stora sprutan

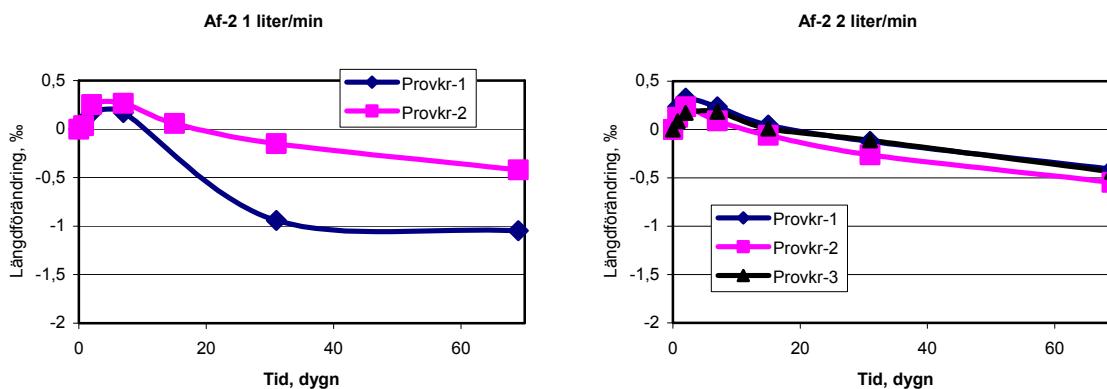
I detta försök ville vi mäta den fria krympningen från direkt efter applicering. Vi lyckades med sprutningen som sådan men trycket var för lågt för att ge en homogen stark betong.. Likväl kan man observera tendenser. Efter sprutning sågades ett antal provkroppar på vilka mät-dubbar limmades fast. Under första dygnet skedde en svällning. Beloppet är osäkert beroende på tekniska problem med mätningarna men verkar uppgå till ca 0,2 ‰. Även senare kan man observera en viss svällning som med tiden övergår till en krympning.

Krympningen kommer först igång när de fuktiga handdukarna tagits bort. Efter 70 dygn har provkropparna krympt cirka 0,5 ‰ (mm/m). Beloppet är osäkert och fuktavgången liten då temperaturen är låg och RH relativt hög. Man kan anta att krympningen inte är avslutad och krympbeloppet kommer att öka. Det mest intressanta fenomenet är att man vid vattentillförsel

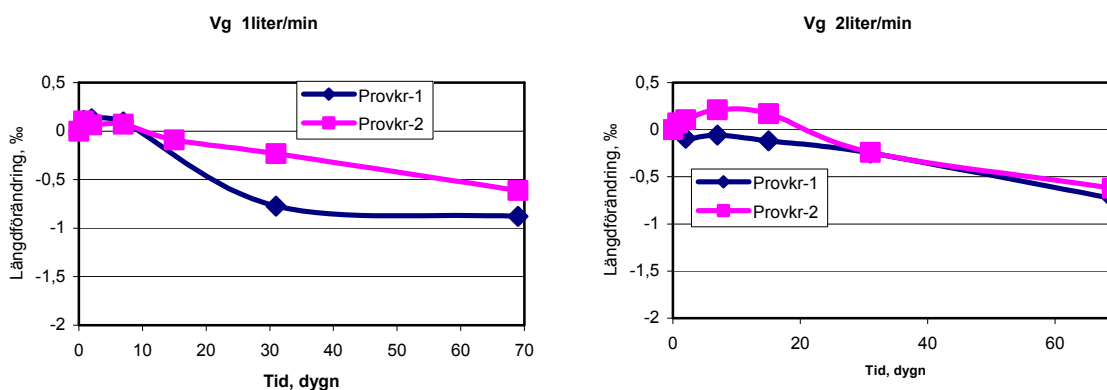
får en svällning under den första tiden innan de massiva cementreaktionerna satt igång och styrkan hos sprutbetongen beror på den falska bindningen. Då man vet att betongen vid vätning sväller under den första perioden så kan man börja krympmätningarna efter hårdnandet. Även efter hårdnandet så sväller betongen så länge som man tillför vatten.



Figur 10. Krympresultat för sprutbetong i försöket med stora sprutan. Af-3 i två doseringar, 1 och 2 liter per min. Mätning på flera utsågade prismor.



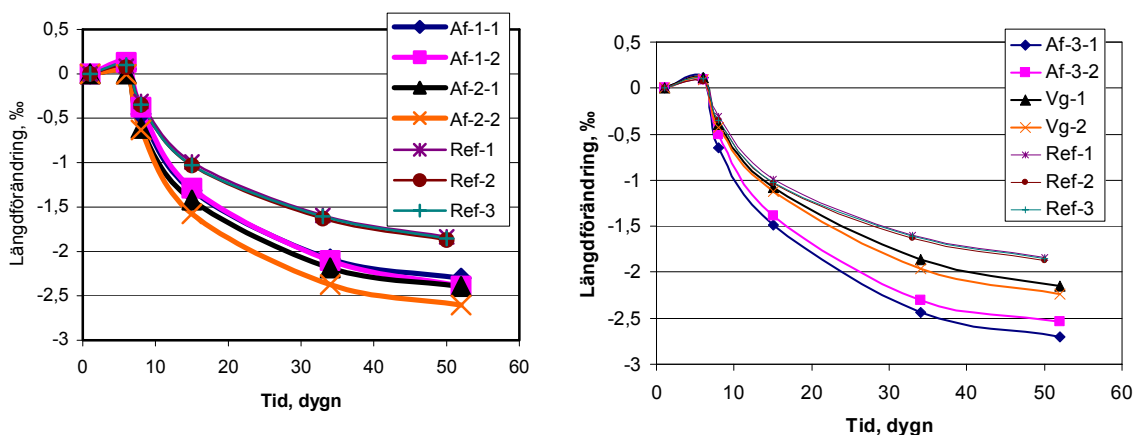
Figur 11. Krympresultat för sprutbetong med Af-2 i två doseringar, 1 och 2 liter/min.



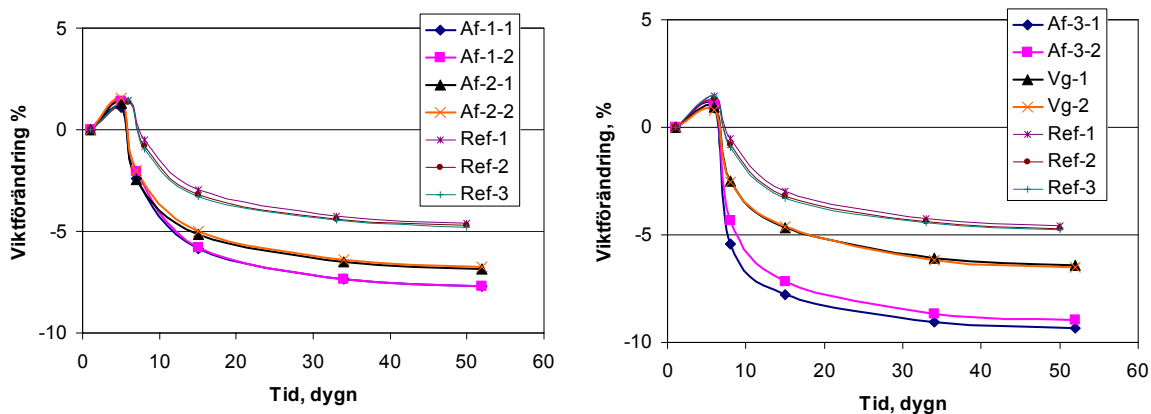
Figur 12. Krympresultat för sprutbetong med vattenglas i två doseringar, 1 och 2 liter per minut

4.2.2 Lilla sprutan

Vid försöken med den lilla sprutan påbörjades mätningarna först när de massiva cementreaktionerna påbörjats och sprutbetongen fått en verklig styrka. I provserien ingår även en vanlig cementpasta utan tillstyvnadsaccelerator vilket inte är möjligt vid försöken i den stora sprutan. Resultaten visar att vid fuktlagring så får man en viss svällning. Detta bekräftar resultaten från försök med den stora sprutan att svällning pågår även efter att sprutbetongen fått sin verkliga hållfasthet. Även referensprovet ger en viss svällning. Efter att proven placerats i torkrum påbörjades en kraftig krympning. Det är signifikant att alla proven med alkalifria accelerator krymper mera än referensen och provet med vattenglas.



Figur 13. Krympresultat för sprutad cementpasta med olika tillstyvnadsacceleratorer som utsatts för torkning vid RH 60 %.

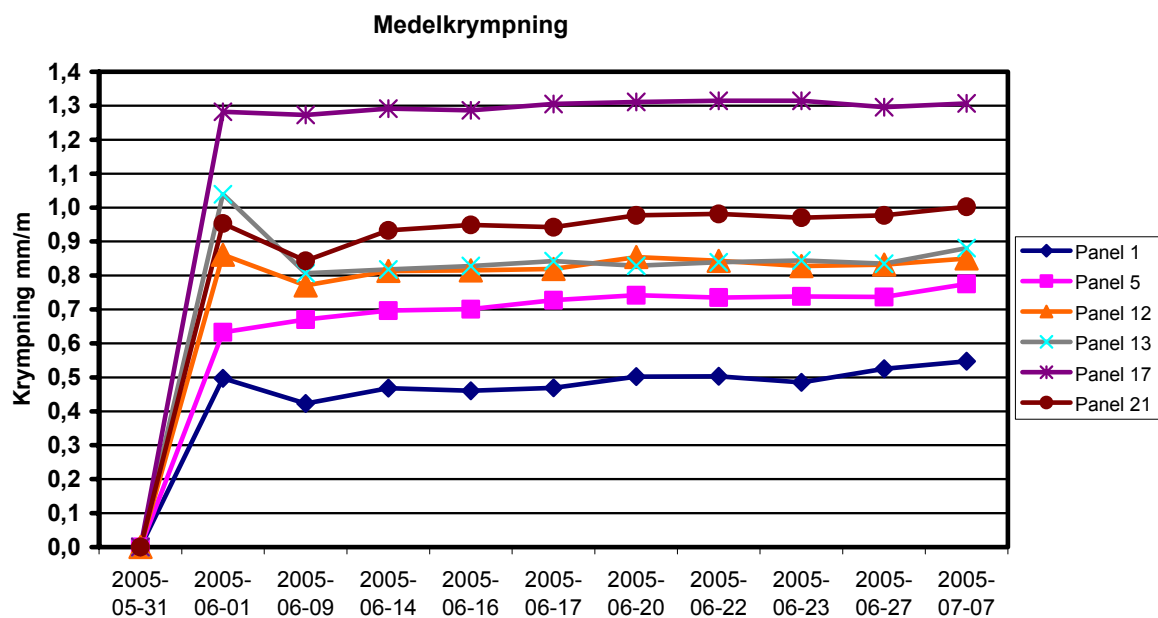


Figur 14. Viktförändring för sprutad cementpasta med olika tillstyvnadsacceleratorer som utsatts för torkning vid RH 60 %.

4.2.3 Törnskogsleden

I dessa försök inleddes mätningarna efter några timmar då hårdnandet var beroende av tillstyvnadsacceleratorn. Därefter täcktes de med plast för att förhindra vattenavgång. Under det första dygnet innan provkropparna placerats i vatten skedde en stark krympning på

närmare 0,5 ‰. En viss längdförändring kunde observeras under vattenlagringen. Det verkar i de flesta provkroppar ha skett en liten svällning men den är inte signifikant. Därefter har det skett en krympning men den är liten då uttorkningen är svag. Ett intressant fenomen är att i denna försöksserie har provkropparna krympt under den falska bindningen medan de svällt vid försöken med den stora sprutan. Skillnaden är att provkropparna från den stora sprutan har tillförts vatten vilket i sin tur visar att härdningen efter sprutning är mycket viktig.



Figur 15. Medelkrympning för sprutbetongpaneler från Törnskogstunneln. Från Fig. 6.2 i Aziz 2005. Det stora krympbeloppet i början härrör från första dygnet när styrkan är beroende av tillstyvnadsacceleratorn.

4.2.4 Diskussion krympning

Betong består av cementpasta och ballast där cementpasta binder ihop ballasten till produkten betong. Ballasten fyller ca 70-80 % av volymen. Ballast skall vara, och är oftast, volymsstabil och kemiskt inert vilket medför att det är cementpasta som ger problem med krympning. Generellt skall en betong innehålla så lite cementpasta som möjligt för att förhindra krympning eller svällning. Två försöksserier utfördes en med betong och en med cementpasta. Detta medför att sväll- och krympbeloppen kommer att bli mycket större i försöksserien med ren cementpasta.

Mätningarna visade att prismorna svällde under hela perioden då de hölls fuktade. Betongen sprutad med den stora sprutan visade svällning både före och strax efter det verkliga hårdnandet. Svällningen efter det verkliga hårdnandet bekräftades av cementpastaprismorna från ”lilla sprutan”. Detta medför att efter sprutning så sker en svällning men då svällbeloppet är relativt litet och då det sker medan betongen har plastiska egenskaper ger det antagligen inga konsekvenser. Under förutsättning att betongen fukthärdas sker hårdnandet under svällperioden. Detta medför att det inte finns behov att mäta krympning under den första perioden. Man kan utföra mätningarna på hårdnad betong. Mätningarna från

Törnskogstunneln visade att den unga sprutbetongen ger en kraftig autogen krympning. Skillnaden mellan resultaten av betongsprutning med den ”stora sprutan” och proven från Törnskogstunneln visar att sprutbetongen under det unga stadiet före det verkliga hårdnandet är mycket känslig för fukt och uttorkning. Styrkan är tillräckligt hög för att ge krympsprickor, vilket gör fukthärdning viktig. Membranhärdning är inte tillräcklig, det behövs fukttilförsel. Ytterligare undersökningar av konsekvenserna borde utredas närmare.

Vid 8-10 °C sker uttorkning men fuktavgången och uttorkningskrympning blir mycket långsam, varför det tar lång tid innan man får ett slutvärde. Sprutbetongen från Törnskogstunneln förvaras vid för låg temperatur och för högt RH för att ge ett bra värde på slutkrympningen. Därför måste vi tills vidare förlita oss på prismorna från den lilla sprutan. Dessa prismor visar att speciellt bruken med de alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna ger ett signifikant högre krympbelopp. Vattenglas ger även en ökad krympning men skillnaden mot referensen är inte signifikant. Alla sprutbetongerna visar en större viktförlust än gjutbetongen (referensen). Vi vet inte om detta beror på om betongen från början är mera grovporös som ett resultat av sprutningen eller om det beror på skillnader i kapillärporositeten. Många frågor återstår men de större krympbeloppen hos sprutbetong kan förklara varför den har en förhållandevis stark benägenhet att spricka.

För att förstå detta måste man se på skillnaden i struktur mellan resultatet av vattenglas och de alkalifria acceleratorerna. Med vattenglas får man normala cementhydrat medan de alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna ger en struktur med rikligt med ettringit. Ettringit är ett mineral som är rikt på vatten (se ovan). En intressant aspekt är därför om uttorkningen leder till att ettringit bryts ner vilket skulle ge en kraftig krympning. Man måste också beakta om det finns något samband mellan förändringen i porstrukturen och krympbeloppet med alkalifri tillstyvnadsaccelerator.

5 Slutsatser och fortsatt arbete

Detta är en relativt enkel undersökning som syftar till att öka förståelsen för hur olika tillstyvnadsacceleratorer påverkar sprutbetongs egenskapsprofil och hur sprutbetong skiljer sig från vanlig betong. För att verifiera resultaten och om det föreligger någon signifikant skillnad mellan de olika kommersiella produkterna fordras ett mera ingående arbete.

Cementreaktionerna undersöktes med hjälp av isothermal kalorimetri. Detta utfördes på ren cementpasta som blandats med olika tillstyvnadsacceleratorer. Detta visade att speciellt de alkalifria acceleratorerna åstadkommer en viss retardation av de massiva cementreaktionerna som bygger upp den verkliga styrkan. Resultaten visar att de olika tillstyvnadsacceleratorerna ger olika resultat men detta behöver inte nödvändigtvis betyda att den ena sorten är bättre än den andra utan kan bero på att manuell inblandning ger ett annat resultat än blandning i spruta. Vattenglas verkar ge en begränsad retardation. Detta beror på att de alkalifria har en helt annan mekanism för tillstyvnad än de baserade på vattenglas. Effekten av de olika tillstyvnadsacceleratorerna har även undersökts genom provtryckning av sprutade prismor. Detta bekräftar resultaten från kalorimetrin att de alkalifria acceleratorerna ger en försening i hårdnandet i förhållande till referens och provet med vattenglas.

Slutsatserna och resonemanget är baserade på resultat från cementpasta. För att få säkra resultat bör man även undersöka vid olika temperaturer och med verklig sprutad betong.

Sprutbetong skiljer sig från vanlig betong genom att man med hjälp av tillstyvnadsacceleratorer givit sprutbetongen en momentant fast struktur. Därför måste man när det gäller sprutbetong även ta hänsyn till denna period där styrkan är baserad på reaktioner givna av reaktioner mellan cementpasta och tillstyvnadsacceleratorn. Denna struktur är svag och porös och därför mycket känslig för vattenrörelser. Resultaten visar att under den falska tillstyvnaden och perioden närmast därefter så sväller betongen ca 0,3 ‰. I förseglat tillstånd får man en krympning på ca 0,5 ‰ och kan anta att krympningen blir större om betongen tillåts torka. En slutsats från detta måste vara att det är väsentligt att vattenhärda sprutbetong åtminstone tills den fått en verklig styrka vilket sker först efter att cementreaktionerna börjat på allvar. En annan slutsats är att, förutsatt vattenhärdning, så kan man beräkna uttorkningskrympningen från hårdnade kroppar.

Uttorkningskrympningen i de provkroppar som förvarats i kylrum uppgår efter 70 dygn till ca 0,5 ‰. Då kropparna förvarats kallt och relativt fuktigt är detta långt från ett slutkrympningsbelopp. För att få snabbare resultat tillverkades mindre provkroppar av cementpasta som utsattes för en starkare uttorkning. Dessa mätningar ger trots att det inte är verklig betong mera exakta mätningar och de ligger närmare slutkrympningen. I denna serie har det även ingått en normalt gjuten pasta vilket ger en jämförelse.

Resultaten visar att alla de sprutade pastorna krymper mera än referenspastan. De krymper ca 25 % mera. Viktförlusten som anger hur mycket vatten pastan har förlorat visar att pasta med alkalifria tillstyvnadsacceleratorerna förlorar mellan runt 40 och 80 % mera vatten än referenspastan medan den vattenglasbaserade förlorar ca 30 % mera än referenspastan. Dessutom förlorar de sprutade pastorna sitt vatten betydligt snabbare än referenspastan. Detta tyder på att den sprutade pastan har en större och grövre porositet vilket kan förklara den

större krympningen. Då betong består av pasta och ballast kan man förmoda att detta slår igenom på betong om än i mindre grad då halten cementpasta blir lägre. För att verifiera detta behövs mera exakta mätningar av porositeten genom exempelvis kvicksilverporosimetri, tunnslip och svepelektronmikroskopi. Man behöver också mera exakta mätningar på verkligt sprutad betong.

Man kan anta att pastorna reflekterar skeenden i vanlig betong. Detta tyder på att sprutbetong har en större benägenhet för uttorkningskrympning än vanlig betong. Detta i sin tur innebär att man exempelvis för sprutning på dräner behöver modifiera betongen. Mängden cementpasta i betongen behöver minskas och man borde undersöka om krympreducerande medel eller fiber kan reducera problemet.

6 Referenser

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

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.

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

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 • Fax 08-651 13 64
info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--K24--SE

tbk.