

Livslängdsbedömning av sprutbetong i tunnlår

Björn Lagerblad

Cement och betong Institutet och KTH

Innehåll

1	Inledning.....	2
2	Vad är en sprutbetong.....	2
3	Cementsystemet i sprutbetong.....	3
3.1	Tillstyvnadsacceleratorer och betong.....	3
3.2	Tillstyvnadsacceleratorer.....	4
3.3	Vattenglas.....	5
3.4	Alkaliaccelerator.....	5
3.5	Alkalifri accelerator.....	6
4	Sprutbetongs beståndighet.....	7
4.1	Miljö och randvillkor.....	8
4.2	Naturliga omvandlings och nedbrytningsprocesser.....	8
4.2.1	Karbonatisering.....	8
4.2.2	Lakning.....	9
4.2.3	Erosion.....	10
4.2.4	Armeringskorrosion.....	10
4.2.5	Frost.....	10
4.2.6	Alkalisilikareaktionen.....	11
4.2.7	Yttre sulfatangrepp.....	11
4.2.8	Övriga reaktioner.....	12
4.3	Grundvatten och dess effekt på betong.....	13
5	Diskussion.....	13
6	Slutsatser och rekommendationer.....	14

1 Inledning

En livstidsbedömning baseras på funktionen, en konstruktion är slut när den inte längre kan uppfylla sin funktion. Sprutbetong används dels för att göra bärande konstruktiondelar dels för att cementera bergväggar för att förhindra ras. Detta medför att man måste göra olika livstidsbedömningar. Funktionen att ”mura” och stabilisera är den vanligaste applikationen i Sverige och denna rapport kommer huvudsakligen att behandla detta.

Sprutbetongen appliceras i relativt tunna lager på berg som dessförinnan är rösat och ofta bultat. Ofta speciellt i större tunnlar är sprutbetongen fiberarmerad. I de ”Telia” tunnlar som besökts i samband med detta uppdrag har betongen varit oarmerad och applicerad i tunna skikt.

Både för den tjockare fiberarmerade sprutbetongen och den tunnare sprutbetongen är funktionen slut när betongen släpper från berget

För att göra en livstidsbedömning måste sprutbetongen beaktas mot bakgrund av den miljö den utsätts för, eventuella nedbrytningsförlopp och de konsekvenser som detta medför.

Omvandlings- och nedbrytningsprocesserna är relativt kända för vanlig betong, men sprutbetong innehåller även en tillstyvnadsaccelerator vilket gör att den momentant blir stel på väggen. Detta gör att man har förändrat cementfasens sammansättning och struktur. Man kan därför inte direkt applicera den befintliga kunskapen om betong utan man måste även identifiera skillnaderna och ta hänsyn till detta.

2 Vad är en sprutbetong.

En sprutbetong är i grunden en vanlig betong som sprutats på en yta där den skall sitta kvar och hårdna. Skillnaden ligger i appliceringstekniken och att man tillför en tillstyvnadsaccelerator så att sprutbetongen inte ramlar av. Detta ger förändringar i den tidiga hydratationen och en annorlunda struktur, som i sin tur kan påverka den stelnade betongens egenskaper. Både appliceringstekniken och tillstyvnadsacceleratorerna påverkar strukturen. En vanlig betong är homogen vid blandning och är gjord för att fylla en form. Med hjälp av vibrering får man en god fyllnad och betongen som är flytande under vibrationsfasen nivellerar av sig själv.

En strutbetong appliceras mot en vägg. Kompakteringen sker genom att partiklarna sprutas först mot väggen och senare mot tidigare sprutbetong. På väggen skall de klibbas fast mot varandra vilket ställer krav på hastighet och på själva betongen. Normalt innehåller sprutbetong finare partiklar och innehåller relativt mycket cement. Sprutprocessen ger upphov till kaviteter. Homogeniteten bestäms av pumstryck och hur väl betongen, och tillstyvnadsacceleratorn blandas. Vid torr metoden gäller det också att vattnet tillförs jämnt så att vct blir samma i alla delar. När man analyserar sprutbetong finner man ofta en skiktning med större eller mindre mängd ballast. Vid närmare granskning finner man ofta att vissa lager har en struktur och kemi som tyder på att mängden tillstyvnadsaccelerator varit större när dessa skikt har bildats. Vi har även kunnat observera att man ibland får ett svagt skikt mot

bergvägg beroende på att man fått mera tillstyvnadsaccelerator i detta skikt vilket givit den mera porösa pastan. Dessa lager är ofta mera porösa vilket i sin tur påverkar beständigheten. Man kan anta att tryckhållfastheten kommer att vara olika i olika riktningar i betongen. Ofta tar man hållfastheten vinkelrät mot ytan/väggen vilket ger större hållfasthet än om man tog provet längs sprutbetongen. Mycket av detta är en konsekvens av utförandet. Det är svårt att kunna spruta så att man får ett homogent lager men man måste i en livstidsbedömning beakta att sprutning inte alltid är perfekt. Det är svårare att få en sprutbetong homogen än en vanlig betong.

Ett annat problem är tillstyvnaden och hårdnandet. En bergvägg i en tunnel är ofta relativt kall och sprutbetongen är tunn. Detta medför att själva hårdnandet tar lång tid. Med anläggningscement kan det ta flera dygn innan betongen är ordentligt hårdnad.

Sprutbetong kan antingen vara våt eller torrsprutad

Torrsprutad betong appliceras genom att en pulvermassa bestående av cement och ballast under tryck sprutas mot en vägg. I munstycket blandas den torra massan med vatten vilket gör att det bildas en betong på väggen. För att denna betong skall kunna sitta kvar blandas en tillstyvnadsaccelerator in antingen som ett torrt pulver pulvermassan eller i vattnet.

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.

3 Cementsystemet i sprutbetong.

En väsentlig skillnad mot vanlig betong är att sprutbetong i sitt bindemedelssystem innehåller en tillstyvnadsaccelerator. 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. 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. Det kemiska systemet och hur tillstyvnadsacceleratorerna fungerar är beskrivet i Lagerblad et al 2006. Därför följer endast en kort redogörelse av de livslängdsbedömningen relevanta faktorerna nedan.

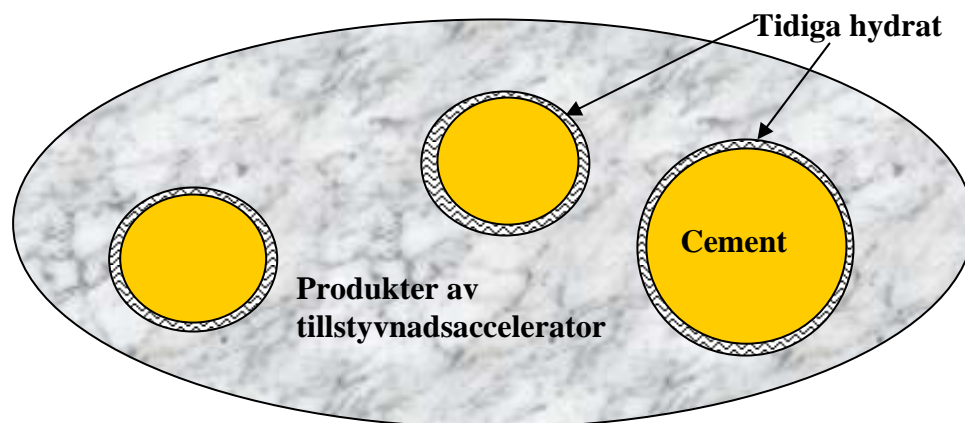
3.1 Tillstyvnadsacceleratorer och betong

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 tillstyvnas 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 1. 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.

3.2 Tillstyvnadsacceleratorer

På marknaden finns tre principiellt skilda typer av tillstyvnadsacceleratorer;

1. Vattenglas
2. Alkaliaccelerator
3. Alkalifri accelerator

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. Antagligen är de besiktigade "Telia" tunnlarna sprutade med torrmetoden och en alkaliaccelerator.

3.3 Vattenglas

Vattenglas som är den äldsta tillstyvnadsacceleratoren är alkalisilikat i vattenlösning. Det är en vattenlösning med alkali- och silikajoner. Vattenglas från början tillverkades genom att kvarts löstes upp i natronlut (NaOH). Detta beror på att silika är vattenlöslig vid höga pH värden.

Mekanismen för tillstyvnad bygger på att vid höga pH värden så är kalciumsilikat i motsats till natriumsilikat stabilt och bildar en fast fas. Den färska cementpastan innehåller Ca joner som fäller silikan och det bildas kalciumsilikathydrat (C-S-H), samma komponent som i cementgelen. Det är denna gel utfälld i porlösningarna som ger tillstyvnaden. Natriumhydroxiden ligger kvar och adderas på så sätt till porlösningen.



Ett problem med vattenglas är att det höjer alkalihalten och pH i porlösningarna så att risken för alkalisilikatreaktion ökar.

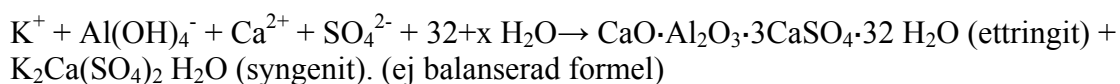
I anläggningar används ofta anläggningscement, som är ett lågalkaliskt cement, för att förhindra alkalisilikareaktionen. Detta motverkas av vattenglaset.

3.4 Alkaliaccelerator

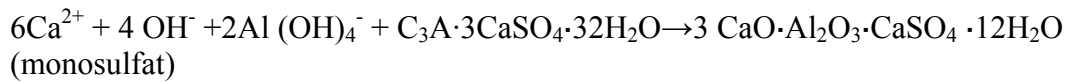
Den alkalihaltiga acceleratoren är en lösning vars huvudbeståndsdel är natrium- eller kaliumaluminat. Ofta innehåller den även en del vattenglas och ibland alkalikarbonater. Denna reaktion är besläktad med sulfatreaktionen i färsk betong och vid sulfatangrepp.

- Natriumaluminat $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$
- Kaliumaluminat $\text{K}[\text{Al}(\text{OH})_4]$

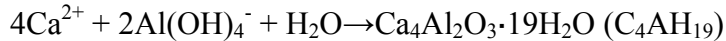
Vid kontakt med den unga cementporlösningen kommer alkalialuminaten att bilda ettringit med gipset från cementet.



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.

3.5 Alkalifri accelerator

Det finns olika varianter av den alkalifria acceleratoren. Huvudbeståndsdelen är aluminiumsulfat.

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

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 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.

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 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.

Försök med sprutade pastor indikerar att sprutbetong med alkalifri accelerator ökar krympningen väsentligt i jämförelse med vanlig pasta (Lagerblad et al 2006). Vi har även

funnit att porerna är grövre. Detta tyder på att man får en annan struktur som i sin tur påverkar beständigheten.

4 Sprutbetongs beständighet

En livstidsanalys/bedömning inkluderar både att projektera en betongkonstruktion så att den får en avsedd funktion under en förutbestämd brukstid och att kunna beräkna återstående funktionstid för en befintlig betongkonstruktion.

När det gäller att livstidsdimensionera för en ny konstruktion måste man analysera miljön, När det gäller att beräkna den återstående livslängden hos en befintlig konstruktion måste man ta hänsyn till de omvandlings och nedbrytningsmekanismer som man kan identifiera och vad dessa åstadkommer. Speciellt måste man kunna beräkna samverkan hur de olika nerbrytningsmekanismerna påverkar varandra. En korrekt reparation/rehabilitering kräver en korrekt diagnos.

I ett längre tidsperspektiv bryts alla material ner och betong är inget undantag. Hur snabbt det bryts ner beror på randvillkoren dvs. i vilket miljö den befinner sig och vad den utsätts för.

Korrekt sammansatt och anpassad till sin miljö är betong mycket beständig. För att vara detta måste dock ballasten anpassas till typen av cement (alkalisilikareaktion), luftporsystemet vara sådant att frostangrepp undviks, cementet anpassas till de i miljön förkommande kemikalerna (sulfatangrepp). Dessutom måste betong göras sprickfri eller åtminstone ha så tunna sprickor att de inte blir transportkanaler vilket i sin tur kan äventyra beständigheten.

Om betongen är korrekt sammansatt, sprickfri och anpassad till miljön kvarstår följande faktorer;

1. Karbonatisering
2. Lakning
3. Erosion
4. Armeringskorrosion

Skademekanismer som kan undvikas men måste beaktas är;

1. Frost
2. Alkalisilikareaktion (ASR)
3. Sulfatangrepp
4. Ballastreaktioner
5. Kemiska reaktioner
6. Försenad ettringit

I allmänhet för betongkonstruktioner är armeringskorrosionen livslängdsbestämmande. För armerade bärande konstruktioner bestäms ofta livstiden av när armeringsjärnen har rostat sönder så anses inte konstruktionen uppfylla sin funktion längre. När det gäller sprutbetong är den oftast inte bärande utan har sin funktion i att stabilisera berget. Funktionen är därför slut när bindningen mot berget släpper.

4.1 Miljö och randvillkor

För att förstå och kunna göra en livstidsbedömning måste vi först analysera det speciella med den miljö som sprutbetongen befinner sig i.

I tunnlar befinner sig sprutbetong i kontakt med berg. Berget verkar som en buffert som reglerar temperaturen. Detta ger konsekvenser för luftfuktigheten som i sin tur påverkar betongen och dess beständighet.

I en öppen tunnel så kommer under sommaren varmluft att kylas ner. Detta kommer att ge en höjning av RH. På vintern är det tvärt om kall luft kommer att värmas av tunnelväggarna vilket ger en sänkning av RH och en uttorkning av betongen.

I slutna tunnlar under berg kommer betongen att vara i kontakt med grundvatten och luften/betongen är därför fuktmättad. Temperaturvariationerna är små.

4.2 Naturliga omvandlings och nedbrytningsprocesser

4.2.1 Karbonatisering

Karbonatisering är en process där koldioxid från luft reagerar med cementpastan så att det bildas kalcit (karbonat). Mekanismen bygger på att koldioxid eller karbonatjoner diffunderar in i betongen där karbonatjonen faller kalciumjonen och bildar kalciumkarbonat. Atmosfärisk koldioxid kommer att lösas i vatten och bilda karbonatjoner som i sin tur reagerar med kalciumjoner i porlösningarna. Kalciumkarbonat är mera svårslösligt än kalciumhydroxid vilket medför att så länge nya karbonatjoner tillförs så kommer kalciumhydroxid att gå i lösning och fällas som kalciumkarbonat.

När all kalciumhydroxid är förbrukad kommer kalciumsilikathydraten (cementgelen) att avspjälka kalciumhydroxid och bli mera silikarisk. Slutresultatet blir en blandning av silikagel kalciumkarbonat och metallhydroxider. Den karbonatiserade betongen är fortfarande hållfast. I princip består de gamla romerska betongkonstruktionerna idag av mörk kalksten. Problemet med karbonatisering är därför huvudsakligen att skyddet för armeringsjärnen har försvunnit (de Romerska konstruktionerna innehöll inget järn).

Hur tjockt skydd armeringen har (täcksikt) och karbonatiseringshastigheten blir livstidsbedömande för armerade betongkonstruktioner. Hastigheten styrs av koldioxidekoncentrationen i luft, porositeten och betongens vattenmättnadsgrad. Karbonatjonen diffunderar långsamt i vatten varför gasdiffusion är den mest effektiva transportmekanismen, men karbonatiseringsprocessen kräver karbonatjoner varför man inte får någon karbonatisering i helt torr betong. Karbonatiseringshastigheten blir därför lägst för vattenmättad betong och högst för betong i medeltorr inomhusklimat.

För att kunna karbonatisera djupare delar måste karbonatjonerna passera redan karbonatiserat material. Det längre transportavståndet medför att hastigheten för karbonatisering avtar med

roten ur tiden. I allmänhet men man kan inte utgå från att en tät betong ger en tät karbonatiserad betong. En betong med lågt vct karbonatiserar därför långsammare än en med högt vct.

Table 1. Uppskattade k -värden (karbonatiseringshastigheter) i olika miljöer (Lagerblad 2005)

Hållfasthetsvärde	< 15 MPa	15-20 MPa	25-35 MPa	> 35 MPa
Vått/i vatten	2 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1.0 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0,75 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0,5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$
I mark	3 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1.5mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1.0 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0.75mm/ $\sqrt{\text{år}}$
regnutsatt	5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	2.5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1.5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1 mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Skyddad utomhus	10 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	6 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	4 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	2.5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Inomhus	15 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	9 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	6 mm/ $\sqrt{\text{år}}$	3.5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$

De tunnlas som besiktigats så är luftfuktigheten hög och betongen kan därför antas vara i det närmaste vattenmättad. Betongen sprutades på 1960-talet och är därför mera än 40 år. Om hållfastheten är ca 30 Mpa diffusionskoefficienten ca 2 mm (se ovan) och åldern 40 år bör karbonatiseringsdjupet vara ca 12 mm. Detta medför att delar av sprutbetongen är karbonatiserad. Hur detta påverkar bindningen till berget vet vi inte.

4.2.2 Lakning

Cemthydraten är lösliga i vatten och står i jämvikt med porlösningen. Betongporlösningarna domineras av alkali, kalcium och hydroxidjoner. Om dessa joner av olika orsaker tas bort kommer cemthydraten att gå i lösning för att återställa jämvikten, vilket i sin tur bryter ner betongen.

När det gäller lakning kan man skilja mellan diffusionstyrd lakning och transmissiv lakning. Den diffusionstyrda lakningen orsakas av jondiffusion (olika jonkoncentration) från porlösningen till omgivande vatten. I den transmissiva lakningen har man en tryckgradient som pressar vatten genom betongen vilket gör att porvattnet byts ut vilket ger en pastanedbrytning. Den diffusionsstyrda lakningen går mycket långsamt då man, liksom för karbonatisering, får ett lakat skikt som jonerna måste diffundera genom. Hastigheten avtar därför med roten ur tiden. I vatten kommer en betong med ett porositet motsvarande en K 40 betong att laka ca 10 mm på ett hundra år (Lagerblad 2001). En missuppfattning är att surt vatten kraftigt ökar lakningen. Den styrs emellertid av hur snabbt kalciumjonerna rör sig i koncentrationsgradienten och inte av pH. Det är först när pH sjunker till under 4-5 och när aluminatfaserna går i lösning som man får en accelererad lakning, ett surt angrepp (Lagerblad 2001).

I tunnlar är därför risken med penetrativ lakning allvarligast. I anslutning till sprickor kan man få en tryckgradient. I de undersökta tunnarlarna kunde man på sina ställen finna genomslag dvs.

utfällningar av lakprodukter (som karbonater) på ytorna. Den största risken är dock att man får lakning i anknytning till sprickor. Den penetrativa lakningen styrs av hydraulisk gradient, porositet och sprickighet. I sprickor med flöde får man diffusionstyrd lakning av sprickväggarna. Detta medför att sprickan ökar i vidd och därmed tillåter ett större flöde. Om man får ett flöde eller inte beror på trycket och sprickans vidd. I tunna sprickor får man ofta ett lågt flöde och utfällningar som självläker sprickan. Utan eller med lågt hydrauliskt tryck ligger ofta den kritiska sprickvidden vid ca 0,2 mm. Var den kritiska sprickvidden är i tunnlar är osäkert, men den bör vara mindre på grund av trycket från grundvatten.

4.2.3 Erosion

Erosion orsakas friktion mellan betong och omgivande media. Betongmaterial rycks loss från betongytan. Ett annat typiskt fall är i skvalpzonen där strömmande vatten på sommaren och isflak på vintern ger kraftig. Utloppsrännor vid vattendammar och störtsockakt i gruvor andra exempel.

Det är bara vid mycket kraftig erosion som betongen i sig angrips. I allmänhet är betong som på något sätt omvandlats och därmed blivit mjukare som eroderas. Lakning och yttre sulfatangrepp ger en mjuk yta som lätt eroderas. Vid många typer av angrepp bildas en produkt som skyddar det inre eller sänker hastigheten på angreppet (se lakning) varför erosionen är en faktor man måste ta med i beräkningen.

I allmänhet är erosion inte någon mekanism inte avgör livslängden för en betongkonstruktion. Man måste dock undersöka om det finns någon del av konstruktionen som utsätts för erosion.

4.2.4 Armeringskorrosion

I kontakt med syre och vatten korroderar stål. I betong sker dock ingen korrosion eftersom det höga pH-värdet stoppar reaktionen. Om betongen är karbonatiserad eller och kloridhalten i porvattnet är för högt får man korrosion.

I bärande konstruktioner är ofta korrosionen livstidsavgörande och är den faktor man räknar på för livstidsbedömning. Att bedöma detta ligger dock utanför ramen för detta arbete.

I tunnlar, och speciellt i större tunnlar, är sprutbetongen ofta stålfiberarmerad. Det föreligger dock en skillnad mellan armeringsjärn och stålfiber. Även om betongen är karbonatiserad så rostar inte stålfiberna speciellt mycket, antagligen beroende på då fibrerna ligger spridda utan kontakt, så bildas ingen elektrisk cell. Dessutom kommer rostprodukterna inte, då fibrerna är så mycket mindre, att ge samma sprängkraft.

Ett problem är dock fiber som överbrygger sprickor. Dessa fiber som är i mera direkt kontakt med luften rostar lätt sönder vilket medför att man tappar resterande böjdragförmåga vilket i sin tur ger problem.

4.2.5 Frost

Sprutbetong innehåller i allmänhet inte luftporbildare och har därför ett relativt dåligt frostskydd. Man kan tillsätta luftporer till våtsprutad betong men det kräver en kraftig

överdosering då mycket av luften går förlorad i sprutprocessen. Sprutbetong innehåller dock ofta en del kompakteringsluft som kan hjälpa till.

Frost är främst allvarlig i väg och järnvägstunnlar där trafiken drar in kall luft. En fördel med tunnlar är dock att under vintern så sjunker RH när kall luft dras in i tunnlar, vilket torkar betongen som därmed blir mindre frostbenägen. Hur det ser ut borde undersökas närmare.

4.2.6 Alkalisilikareaktionen.

Alkalisilikareaktionen (ASR) beror på att viss typ av reaktiv ballast löses upp av porlösningarna i betong. Produkten ett koncentrerat vattenglas är hygroskopisk, dvs. den suger upp vatten, vilket ger ett tryck som får betongen att svälla och därmed spricka.

Hur mycket alkalijoner och vilket pH man har i porlösningarna beror på typen av cement. Med anläggningscement som är ett lågalkaliskt cement får man ingen ASR men man får det med cement av typen byggcement eller Slite Std. Ett problem med sprutbetong är att både tillstyvnadsacceleratorer som vattenglas och alkalialuminat ger ett tillskott av både alkalijoner och en förhöjning av pH. Detta medför att risken för ASR är högre och att anläggningscement inte förhindrar ASR. Reaktionen fordrar ett tillskott av vatten, vilket dock nästan alltid finns i tunnlar.

Det är relativt vanligt med svagt reaktiv ballast i Sverige (Lagerblad & Trägårdh 1992). Om det är ett problem i tunnlar är inte känt antagligen beroende på att inget undersökt det.

Alkalisilikareaktionen ger en inre svällning, dvs. hela betongen sväller. Denna svällning ger i friliggande konstruktion upphov till sprickbildning som dels sänker hållfastheten dels öppnar upp för andra angrepp. En sprutbetong ligger i tunnlar som ett valv. Detta medför att svällningen ger ett tryck uppåt vilket om svällningen blir för stor kan ge en släppa. En mindre svällning behöver dock inte vara negativ då den kan kompensera för krympningen och trycka ihop sprickor.

4.2.7 Yttre sulfatangrepp

Mekanismen bakom sulfatangreppet är beskrivet i kapitel 3.4 (alkaliacceleratorer). Sulfatreaktionen beror på att ett tillskott av sulfat ger upphov till bildning av ettringit som i sin tur spräcker betongen. Bildningen av ettringit kräver ett tillskott av vatten vilket oftast finns i tunnlar.

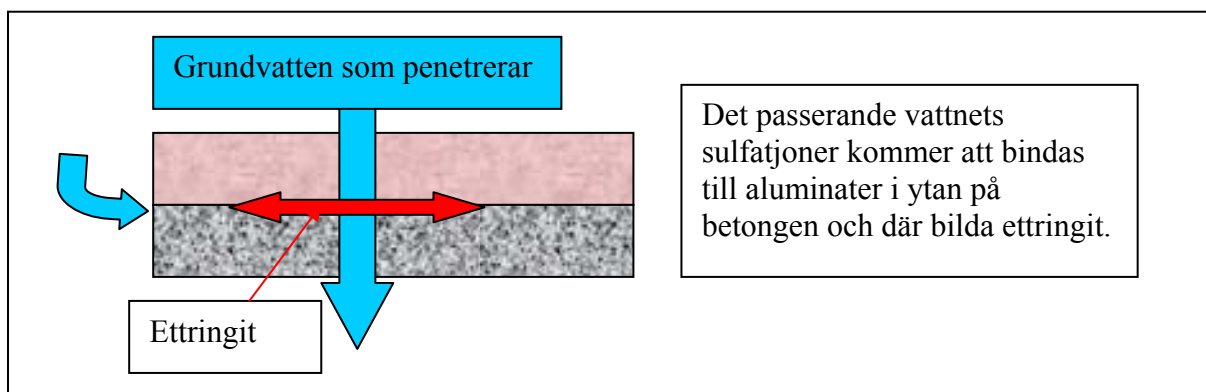
Till skillnad från ASR är sulfatangreppet ett yttre angrepp dvs. det startar från ytan och fortplantar sig inåt allteftersom ny sulfat tränger in till större djup. Mekanismen står beskriven i Lagerblad (1999). För att motverka ett sulfatangrepp används sulfatresistent cement, vilket i princip innebar att halten kalciumaluminat (C_3A) är lågt. Cementas anläggningscement är sulfatresistent och används i allmänhet idag för sprutbetong, men i äldre sprutbetong har antagligen all möjliga sorter av cement använts. Detta vet vi från tillståndsbedömningar av marina konstruktioner på västkusten där sulfatangrepp är vanligt. Ett problem är också att alkalialuminat som tillstyvnadsaccelerator ger ett tillskott av aluminat som gör sprutbetongen benägen för sulfatangrepp.

Eftersom reaktionen är beroende av tillskott av sulfat måste man se på var den kan komma ifrån. Grundvatten kan ibland hålla höga halter. Detta gäller framför allt om man har sulfidjordar eller i vissa marker som förorenats av industriutsläpp.

Det viktigaste för en livstidsbedömning att kunna beräkna konsekvenserna av ett angrepp. Man kan förmoda att det allvarligaste sulfatangreppet sker i kontaktytan mellan sprutbetong och berg. Om angreppet sker på tunnelväggarna kommer man främst att få en uppmjukning av ytan. Valveffekten tar också bort de negativa effekterna av svällningen. Med sulfathaltigt vatten kommer man också att få ett angrepp på betong i golvhöjd men det kommer framför allt att ge en uppmjukning av ytan.

När grundvatten penetrerar sprutbetong kommer det antingen att ske i sprickor eller vid penetration av betongen. I de undersökta "Telia" tunnarna med ett tunt lager av sprutbetong ser man ofta utfällningar i samband med sprickor men man kan även se genomslag där grundvatten penetrerat betongen och givit utfällningar på utsidan. I sprickor kommer sulfatangreppet att leda till ettringitbildning i sprickor vilket i bästa fall kommer att leda till självläkning. Det stora problemet är antagligen om sulfathaltigt vatten penetrerar längs kontaktzonen eller penetrerar betongen. Detta kommer att leda till ettringitbildning i kontaktzonen, vilket i sin tur leder till att bindningen mellan berg och betong släpper.

Normalt behöver man ganska höga halter av sulfat i vattnet för att det skall ge skada. När det gäller sprutbetongen och bindningen behövs det dock mindre eftersom sulfatreaktionen kommer att filtrera grundvattnet. Med tunna sprickor kan man även förvänta att en viss del av vattnet går åt sidan övergångszonen. Om så är fallet borde undersökas genom att se på utfällningar i övergångsfasen i bompartier.



4.2.8 Övriga reaktioner

Förutom de ovan beskrivna reaktionerna kan betong innehålla svällorer, magnetkis etc som kan ge problem. Detta kan dock undvikas genom att använda kontrollerad ballast men det är något som måste beaktas vid analys av speciellt äldre sprutbetong. En process som kan komma är thaumansitreaktionen. Den är ett resultat av att karbonatballast kan ge en variant av ettringit. Det är en variant av ettringit där aluminaten har byts mot karbonationer. Detta medför att betong med sulfatresistent cement inte längre är sulfatresistent. Reaktionen sker vid låga temperaturer i fuktig miljö. Detta är ofta fallet i tunnlar. Man bör därför inte använda kalkfiller i betongen i denna miljö.

4.3 Grundvatten och dess effekt på betong

I de flesta fall är grundvatten i det närmaste dricksvatten och ställer inte till med problem. Det finns dock fall speciellt i industriområden och i anslutning till saltvatten där salthalterna kan vara höga. Salterna förekommer i vatten i form av joner. Exempel på joner som kan förekomma är kalcium, natrium, kalium, magnesium, järn, mangan, som katjoner och klor, karbonat, silika, sulfat och sulfid som anjoner. Det är salter av dessa som man ser vid sprickor och på golvet i tunnlar. Problemet är om dessa salter kan torka ut i övergångszonen då detta kan ge upphov till kristallsprängning och förlust av bindningen till berg. Normalt är emellertid tunnarna så fuktiga att uttorkning och kristallbildning sker på utsidan och på golvet. Det mesta av utfällningarna är kalcium och mangan som karbonatiserat. Magnesium ger en viss ersätter kalcium i cementpastan och ger en viss försvagning. Järn och mangan passerar utan att bindas. Kloridjoner ställer inte till med problem förutom när det finns järn närvarande. Rikligt med karbonatjoner kan ge kalcitutfällning i övergångszonen. Silikajoner förekommer i låg halt utom om grundvattnet är mycket basiskt vilket är ovanligt. Problemet är framför allt sulfatjonerna. Sulfidjoner i sig ställer inte till med problem, men de kan lätt oxideras till sulfat men detta kräver kontakt med luft och kan därför endast ge problem på tunnelväggarna.

5 Diskussion

Sprutbetong har delvis andra egenskaper än vanlig betong, dels beroende på applikationstekniken dels på tillstyvnads och hårdnandeförloppet. Strukturen skiljer sig från vanlig betong, hur den skiljer sig beror på vilket typ av tillstyvnadsaccelerator man använder. Sprutbetong är något mera krympbenägen än vanlig betong då den oftast innehåller mera cement. Med den alkalifria och antagligen även alkaliacceleratoren ger en något större krympning. Detta gör att man relativt lätt kan få sprickor speciellt om bindningen till underlaget är dåligt.

Vattenglas- och alkaliacceleratoren ändrar ändrar bindemedelssammansättningen så att sprutbetongen blir mera benägen för expansiv alkalisilikareaktion. Med alkaliacceleratoren blir sprutbetongen mera benägen för sulfatreaktion. Miljön i tunnlar är normalt fuktig varför båda dessa reaktioner kan ske. Om så är fallet kan endast bekräftas genom en systematisk provtagning och analys av skadad betong. Den reaktion som kan ställa med problem och sätta ner livslängden är antagligen sulfatreaktionen. Speciellt känslig är antagligen kontakt zonen då den expansiva sulfatreaktionen här kan spjälka loss betongen. Om man beaktar filtrering kan man få en sulfatreaktion med relativt lite sulfat i grundvattnet.

För en livstidsbedömning måste man först definiera vilken funktion betongen har och när den inte längre uppfyller sitt syfte. Den mesta sprutbetong, och den som jag besiktigat, har främst som syfte att stabilisera berg. Dess funktion är slut när betongen släpper från berget och inte längre stoppar sten från att falla ner. Ett annat syfte är ofta att hindra vatten i transmissiva zoner i berget. I båda fallen har betongen tappat sitt syfte när den släpper i kontaktzonen. Detta sker antagligen främst som en konsekvent av lakning eller sulfatreaktion. Krympningen kan hjälpa till genom att ge upphov till sprickor i vilka vatten kan penetrera. I transmissiva zoner kommer en kraftig vattengenomträngning att ge upphov till urlakning. Studiebesöket i ”Telia” tunnarna i Stockholm påvisade också ett annat fenomen. Vid de transmissiva zonerna var betongen svagare. Detta beror antagligen på att man vid dessa zoner ökade mängden tillstyvnadsaccelerator för att betongen skulle styvna till snabbare vilket resulterar i en

svagare betong som därmed blir mindre beständig. En annan aspekt man måste beakta är att många sprutbetonger är pålagda i relativt tunna skikt och att skiktjockleken varierar. Antagligen är de betonger som har besiktigats delvis karbonatiserade ända in till berget. Vilken konsekvens detta ger är osäkert.

När betongen används som bärande element blir förhållandena andra. Här måste man även beakta armeringskorrosion. Nere i tunnlarna är det ganska fuktigt varför karbonatiseringen blir ett mindre problem men man måste beakta kloridanrikning och armeringskorrosion. Kloridanrikningen blir en funktion av salthalt i grundvattnet och RH i tunnlarna.

6 Slutsatser och rekommendationer

Sprutbetong har delvis olika egenskaper som vanlig betong men man kan ändå använda den kunskap man har om vanlig betong och dess beständighet på sprutbetong. För att kunna göra detta måste man emellertid få ett bättre grepp om sprutbetongs speciella egenskaper och speciellt dess porsystem och krympningsegenskaper. Detta fodrar att man gör en systematisk undersökning av befintlig sprutbetong för att verifiera skillnaderna och dess beständighet.

En livstidsbedömning och en analys av nedbrytningsförlopp fodrar en bättre förståelse för randvillkoren. Man måste ha ett grepp om klimatet och då speciellt fuktförhållandena. Man behöver också bättre kunskap om kemin i grundvatten och hur denna varierar. Speciellt viktigt är det att få ett bättre grepp om sulfathalterna. Även detta fodrar en systematisk genomgång av miljön i befintliga tunnlar. Om man fick ett bättre grepp om detta skulle man kunna anpassa sprutbetongen så att den bättre klarade den speciella miljön. I en del fall skulle det vara önskvärt att kunna använda ett annat cement än Cementas anläggningscement då detta är för långsamt.

Denna rapport är huvudsakligen baserad på teoretiska resonemang. För att få en klarare bild om de verkliga förloppen behövs ett antal studiefall både av betong som är dålig och som är bra. Betongen och miljön behöver studeras i ett sammanhang bör att klara få fram vad som bestämmer sprutbetongs nedbrytning och livstid.

7 Referenser

Lagerblad, B., & Trägårdh, J., Alkalisilikareaktioner i svensk betong, CBI-rapport 4:92, 1992

Lagerblad, B., & Trägårdh, J. Slowly reacting aggregates in Sweden-Mechanism and conditions for reactivity in concrete, Proceedings, 9th International Conference on Alkali-aggregate Reactions, London 1992.

Lagerblad, B., & Trägårdh, J. Ballast för Betong-egenskaper, karaktärisering beständighet och provningsmetoder, 78 pp, CBI-rapport 4:95

Trägårdh, J. & Lagerblad, B., Influence of ASR cracking on the frost resistance of concrete-microscope observations, water absorption and freeze-thaw testing, CBI rapport 1:96, 1996.

Lagerblad, B., & Jakobsson, B., Smectite clays and concrete durability, Proceedings of 19th international conference on cement microscopy, Cincinnati, Ohio, USA pp 151-163, 1997.

Lagerblad, B., Long term test of concrete resistance against sulphate attack. Sulphate Attack Mechanisms, Eds Marchand J., Skalny, J. P, in Materials Science of concrete (special volume), published by The American Ceramic Society, Westerville OH, USA, 1999

Lagerblad, B. Leaching performance of concrete based on samples from old concrete constructions, SKB TR-01-27, Report series of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO 2001

Lagerblad, B., Leaching performance of Concrete based on Studies of Old Submerged Concrete, Sixth CanMet/ACI International conference on durability of Concrete, Thessaloniki, Greece 2003. Supplementary papers , pp 195-211, 2003.

Lagerblad, B., Carbon dioxide uptake during concrete life cycle- State of the art. CBI report 2:2005, 2005.

Lagerblad, B., Holmgren, J., Fjällberg, L. & Vogt, C., Hydratation och krympning hos sprutbetong. SweBeFo Rapport K24, 2006.