

Inverkan av fukthärdning och relativ fuktighet på sprutbetongens krympning

Johannes Hansson
Tomas Lindström

Luleå tekniska universitet
Civilingenjörsprogrammet
Väg- och vattenbyggnadsteknik
Institutionen för Samhällsbyggnad
Avdelningen för Geoteknologi

Förord

Detta examensarbete på 30 poäng ingår som avslutande del i utbildningen civilingenjör i Väg- och vattenbyggnadsteknik med inriktning mot jord- och bergbyggnadsteknik vid Luleå tekniska universitet.

Arbetet initierades tillsammans med Arvid Taube och Peter Lundman vid Banverket, efter studenternas egna initiativ och erfarenhet från 7-månaders praktikperiod under utbildningen. Studierna påbörjades våren 2007.

Vi vill härmed tacka de personer som har hjälpt oss med detta arbete. Ett stort tack riktas till Arvid Taube och Peter Lundman, Banverket för att de har ställt upp och avsatt tid till att hjälpa till med det här arbetet. Ett stort tack riktas också till Björn Linde, Botniabanan och SKANSKA på entreprenaden vid Namntalltunneln för att ni vänligt ställt upp och gett oss support då vi för detta arbetet utförde våra försök i fält.

Till Jenny Svanberg, vår handledare och examinator, riktas ett speciellt stort tack för hennes engagemang och rådgivning under arbetet.

Ett slutligt tack riktas till våra familjer och vänner som har trott på oss under alla studieår.

Luleå, April 2008

Johannes Hansson & Tomas Lindström

Sammanfattning

Efterbehandling på sprutbetongen skall enligt regelverk som BV-tunnel och Tunnel 2004 ske direkt efter sprutning. Fukthårdning av sprutbetongen behöver tillämpas då den relativa luftfuktigheten understiger 90 % vid betongytan. Fukthårdning skall då utföras så att betongytan ständigt är fuktig, under hela härdningsperioden fram tills att betongen har fått tillräcklig hållfasthet.

Då cementet hydratiseras bildas olika kristaller som ger cementmaterialet dess hårdhet och hållfasthet. Med krympning menas här rörelser i betongen som orsakas av vattenavgång i form av avdunstning från betongen och genom kemiska reaktioner i hydratationsprocessen.

Syftet med denna rapport har varit att studera effekten av varierande fukthårdning på sprutbetongen. Arbetet har bedrivits som en litteraturstudie, därutöver har också provkroppar tillverkats i fält som sedan fukthärdats i laboratoriemiljö. Sprutbetongens krympning studeras med syftet att mäta skillnaden mellan olika fukthårdningar på sprutade betongprismor i labbmiljö, från ingen vattenbegjutning alls till kontinuerligt upprepande vattenbegjutningar i två olika relativa luftfuktigheter.

Försöket med fukthårdning av sprutbetongen har resulterat i två slutsatser. Den första är att fukthårdning ger effekt på betongens krympning genom att den minskar omfattningen av den. Den andra slutsatsen är att vattenbegjutning under sju dygn inte kan ersätta en högre relativ luftfuktighet i omgivande luft.

Abstract

Treatment of shotcrete according to regulations such as BV-tunnel and Tunnel 2004 shall be performed immediately after the operation is done. Curing is required when the relative humidity fall short of 90% at the concrete surface. The curing shall then be performed so that the surface is constantly moist, during the whole hardening process until it has gained sufficient strength.

When the cement hydrates different types of crystals are created that gives the cement material hardness and strength. Shrinkage is defined as caused by water leaving the material through evaporation through the surface, or consumed during the hydration process.

The purpose of this report was to study the effect of curing shotcrete with different intensity. The study has been divided into a literature study and labexperiment where specimens have been created in field environment and then been cured in a lab environment. The shrinkage is studied by measuring prisms of shotcrete in lab environment, from no watering of the shotcrete to continuous repeated watering in two different relative humidities.

The study of curing shotcrete has resulted in two conclusions. The first is that the curing of shotcrete gives a positive effect by reducing shrinkage. The other conclusion is that the curing during seven days cannot replace a high relative humidity in the surrounding air.

Innehållsförteckning

1	Inledning	2
1.1	Bakgrund	2
1.2	Syfte	3
1.3	Mål	3
1.4	Avgränsningar.....	3
1.5	Metod och genomförande.....	3
1.6	Målgrupp	4
1.7	Studenternas Referensram.....	4
1.8	Rapportens disposition	4
2	Sprutbetong	6
2.1	Betong	6
2.2	Sprutbetong.....	6
2.3	Historik.....	7
2.4	Ingående material.....	8
2.5	Applicering	15
2.6	Hållfasthetsutveckling hos sprutbetong	16
3	Betongens fuktegenskaper	18
3.1	Portlandcementets hydratation	18
3.2	Fukt i luften	18
3.3	Fuktegenskaper	19
4	Krympning	20
4.1	Definition av krympning	20
5	Bestämmelser	22
5.1	BKR.....	22
5.2	BV Tunnel	22
5.3	Tunnel 2004.....	22
5.4	BBK 04.....	22
5.5	Anläggnings AMA 98, Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten.....	23
6	Sammanställning av tidigare försök	23
6.1	Sören Rolund – ”Krympningens inverkan på sprutbetongens vidhäftning mot berg”	24
6.2	Sara Aziz – ”Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong”.....	26
7	Provuppställning.....	28
7.1	Mål med försöket	28
7.2	Val av metod.....	28
7.3	Utrustning	30
8	Utförande.....	35
8.1	Provkroppstillverkning.....	36
8.2	Mätning av krympning	39
9	Resultat.....	42
9.1	Krympning.....	42
9.2	Relativa fuktigheten i betongen under försöket.....	52
9.3	Jämförelse med andra försök.....	53
10	Diskussion	56
11	Slutsats och förslag till fortsatt arbete.....	57
12	Forskningsprocessen	58

Innehållsförteckning

12.1	Första stadiet.....	58
12.2	Andra stadiet.....	59
12.3	Tredje stadiet	60
13	Referenser.....	61

Bilaga 1 Betongrecept

Bilaga 2 Produktblad Meyco SA 170

Bilaga 3 Mätvärden från försöket i RH 62%

Bilaga 4 Mätvärden från försöket i RH 78%

Bilaga 5 Mätvärden över relativ fuktigheten i sprutbetongen från försöket i RH 62%

Bilaga 6 Mätvärden över relativ fuktigheten i sprutbetongen från försöket i RH 78%

Ordlista och förklaring

Sprutbetong	Sprutbetong är i grunden en vanlig betong med något förändrade egenskaper som gör att den kan sprutas på en vertikal yta.
Krympning	Den volymminskning en materia har får till följd av ihopdragning
Svällning	Den volymökning en materia har får till följd av utvidgning
Fri krympning	Ihopdragning av materialet får ske fritt utan mothållande krafter
Förhindrad krympning	Ihopdragning av materialet får inte ske fritt utan förhindras av mothållande krafter
Autogen krympning	Självkrympning orsakat av att den kemiska processen i cementen i sig själv konsumerar vatten
Uttorkningskrympning	Krympning som orsakas av att vatten diffunderar till omgivningen
Plastisk krympning	Krympning som sker i ett material som fortfarande är plastiskt.
Relativ fuktighet	Förhållandet mellan det aktuella fuktinnehållet och fuktinnehållet då materialet är mättat
RH	Relative Humidity; luftens aktuella fuktinnehåll (relativ fuktighet)
Fukthårdning	Ökning av materialets fuktinnehåll genom fuktning
Vattenbegjutning	Ökning av materialets fuktinnehåll genom vattning på betongytan
Hydratation	De kemiska reaktioner som sker mellan vatten och cement
Tillstyvnadsaccelerator	Accelerator som ger momentan tillstyvnad till cementen
Cement	Ett hydrauliskt bindemedel i pulverform
V _{ct}	Vattencementtal, förhållandet mellan cement

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Banverket är den myndighet som ansvarar för järnvägen i Sverige och som ska arbeta för att de transportpolitiska målen som regeringen fastställt uppnås. Enligt regeringens instruktioner ska Banverket skärskilt verka för att bland annat:

- Järnvägstransportsystemet är tillgängligt, trafiksäkert, framkomligt, effektivt och miljöanpassat.
- Samhällsmotiverad forskning inom järnvägssystemet genomförs och sprids.

Banverket sköter förvaltningen av infrastrukturen för den statliga järnvägen. En del i detta ansvar innefattar underhåll och om- och tillbyggnad av järnvägen. Av de järnvägsinvesteringar som regeringen har beslutat om är 107.7 miljarder kronor avsett för nyinvesteringar i järnvägsnätet över perioden 2004 – 2015 ([Banverket 2006](#)).

I tidigare aktuella tunnelprojekt som exempelvis Södra Länken, har sprickor bildats i sprutbetongen där dräner för vatten- och frostsäkring har installerats. Mot denna bakgrund har Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) genomfört två delprojekt med syfte att förstå de grundläggande mekanismerna för krympningen hos sprutbetongen. Studien genomförs gemensamt av KTH Bygghälsa, avdelningen betongbyggnad och Cement och Betong Institutet (CBI) på uppdrag av SveBeFo och med Banverket, SKB och SBUF som huvudfinansiärer ([Fjällberg et al. 2006](#) & [Ansell et al. 2006](#)).



Figur 1-1 Sprutbetong över en dränmatta

Efterbehandling på sprutbetongen skall enligt regelverk som BV-tunnel och Tunnel 2004 ske direkt efter sprutning. Fukthårdning av sprutbetongen behöver tillämpas då den relativa luftfuktigheten understiger 90 % vid betongytan. Om detta sker skall W-metoder användas enligt [Boverket 2004](#), vilket innebär att betongen ska få tillgång till vatten under hela härdningsperioden fram tills dess att denna har fått tillräcklig hållfasthet.

Då cementet hydratiseras bildas olika kristaller som ger cementmaterialet dess hårdhet och hållfasthet. Under denna hydrationsprocess krymper betongen på grund av vattenavgången vilken ökar om vattnet får avdunsta. Denna krympning går inte att få bort helt. Betongens omgivning som exempelvis en berggrund, krymper dock inte vilket orsakar en förhindrad krympning av betongen och den kan spricka.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att studera effekten av varierande fukthårdning på sprutbetongen och dess krympning. Sprutbetongens krympning studeras med syftet att mäta skillnaden mellan olika fukthårdningar på sprutade betongprismor i labbmiljö, från ingen fukthårdning alls till kontinuerligt upprepande fukthårdningar i två olika relativa luftfuktigheter.

1.3 Mål

Målet för examensarbetet är att undersöka om kvalitén på sprutbetongen (krympningen) kan höjas märkbart genom att vattenbegjuta under hårdningstiden samt i hur stor grad krympningen i sprutbetongen påverkas av olika relativa fuktigheter. Målet är att ge Banverket mer information i form av försök och mätresultat vad det gäller sprutbetongens krympning samt verifiera fukthårdningens inverkan på krympningen i det unga stadiet hos sprutbetong.

Målet är också att göra en sammanställning av de krav som finns på fukthårdning i de olika regelverken t.ex. BBK 04, Anläggnings AMA 98, BKR , BV-tunnel och Tunnel 2004 vid sprutbetong användning i bergtunnlar.

1.4 Avgränsningar

Studien är avgränsad till fiberarmerad sprutbetong med naturballast som är våtsprutad med alkalifri accelerator. Samtliga försök har genomförts på små provkroppar som betongsprutas i fält och fukthärdas i laboratoriemiljö med två olika relativa luftfuktigheter. Inga storskaliga försök har utförts under arbetets gång. Den unga sprutbetongen fukthärdades med varierande intervall enbart i sju dygn varefter den avslutats och krympningen kontrollerades fram tills dygn 81 efter sprutningen.

1.5 Metod och genomförande

Inledningsvis gjordes en litteraturstudie som inriktades på sprutbetongen och dess olika krympmekanismer samt betongens fuktegenskaper i ett tidigt stadium, för att förstå uppkomsten av krympsprickor.

En försöksplan arbetades fram för att mäta krympningen under de sju första dyggen. För försöket blev vi tilldelade en tunnel på Botniabanan där testprismor sprutades. Prismorna transporterades sedan till Luleås tekniska universitets Complab där de placerades i två separata konditioneringsutrymmen. I konditioneringsutrymmet fukthärdades prismorna och mätning av krympning utfördes på dessa under sju dygn. Fukthårdningen avslutades efter sju dygn men mätning av krympning utfördes vidare för att studera hur betongen betedde sig efter avslutad fukthårdning. Detta pågick fram till 81 dygn efter utförd sprutning hade passerat, då försöket avslutades. Mätresultaten analyserades och jämfördes med andra tidigare genomförda försök för att få en helhetsbedömning av resultaten.

1.6 Målgrupp

I första hand är detta examensarbete riktat till Banverket som vi genomför dessa undersökningar åt. Försöket och mätresultaten i examensarbetet kommer också förhoppningsvis att användas för vidare studier av sprutbetongens krympning.

1.7 Studenternas Referensram

Vi som tillsammans genomfört detta examensarbete är Johannes Hansson och Tomas Lindström. Detta examensarbete på 30 poäng ingår som avslutande del i utbildningen civilingenjör i Väg- och vattenbyggnadsteknik med inriktning mot jord- och bergbyggnadsteknik vid Luleå tekniska universitet. Vi har båda också genomfört en praktikperiod på 7 månader under utbildningen då vi var på Boliden Mineral AB i Garpenberg gruvan respektive tunnelprojekt på Botniabanan, då vi kom i kontakt med sprutbetong och dess användning och utförande.

1.8 Rapportens disposition

I dispositionen beskrivs rapportens uppbyggnad för att underlätta för läsaren att sätta sig in i problemställningen och följa försöksupplägget i examensarbetet. Kapitlen är indelade enligt följande:

Kapitel 2

Här beskrivs kortfattat historiken bakom sprutbetong, samt vilka ingående material som används för sprutbetong och hur dessa kan påverka betongens egenskaper. Även vilka metoder för att applicera sprutbetongen som finns tas upp.

Kapitel 3

En sammanfattning om hur vatten påverkar och är nödvändig för betongen, från att betongen blandas tills att den har härdat och intagit sin slutgiltiga form.

Kapitel 4

I detta kapitel behandlas krympning i betong i olika stadier, vilket kan orsaka krympsprickor i betongkonstruktioner om inte fri krympning tillåts.

Kapitel 5

En kort sammanställning över gällande riktlinjer som används vid tunnelbyggen i dagsläget och hur de beskriver utförandet av betongsprutningen.

Kapitel 6

Här kommer tidigare liknande genomförda försök och examensarbeten att beskrivas för att kunna bedöma om resultatet från de försök som har genomförts här är rimliga.

Kapitel 7

En beskrivning hur provformarna tillverkades samt vilken mätutrustning som tillhandahölls under försöken.

Kapitel 8

Här ges en beskrivning av arbetsutförandet och under vilka förhållanden vi sprutade våra prover. I kapitlet beskrivs också mätningförfarandet under hela försöket.

Kapitel 9

I detta kapitel presenteras de resultat försöket har gett samt en jämförelse med resultat från de andra försöken som tagits upp i kapitel 6.

2 Sprutbetong

I detta kapitel beskrivs kortfattat historiken bakom sprutbetong, vilka ingående material som används i betong och sprutbetong samt hur dessa kan påverka betongens egenskaper. I kapitlet tas det även upp vilka metoder som finns för att applicera sprutbetongen.

2.1 Betong

Vid sammanblandning av sten, sand, cement, vatten och eventuellt kemiska tillsatsmedel erhålls byggnadsmaterialet betong. Betongen är till en början en formbar massa som efter ett tag styvnar och bygger upp en betydande hållfasthet. Betongen är uppbyggd av två delar, ballast och cementpasta. Cementpastan består av vatten och cement som har till uppgift att binda ihop ballastmaterialet. Ballastens syfte är att fylla ut och ge ett relativt billigt byggnadsmaterial. Om enbart cementpastan skulle användas i betongen blir den väldigt känslig för fukt- och temperaturändringar, vilket kan medföra problem. Cementpastans egenskaper beror till stor del av förhållandet mellan cement och vatten och benämns vattencementtal, vct. Detta värde styr hur tät och hållfast betongen blir och beräknas enligt formeln nedan:

Formel 2-1 Vattencementtalet ([Burström 2001](#))

$$vct = \frac{W}{C} \text{ där :}$$

W är mängden blandningsvatten [kg]

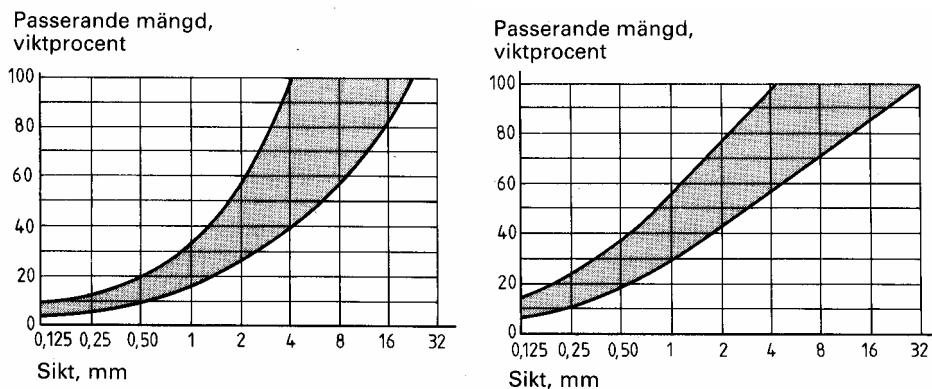
C är mängden cement [kg]

När för mycket vatten i förhållande till bindemedel tillsätts blir betong lättarbetad, nackdelen med detta är att hållfastheten och tätheten då blir lägre. Om däremot mindre vatten tillsätts kommer en mer svårarbetad betong erhållas och detta vägas upp av en hög hållfasthet och täthet. Det finns dock en minsta mängd vatten som krävs för att all cement skall reagera ([Almgren 2007](#))

2.2 Sprutbetong

Sprutbetongen och gjutbetongen har till viss del lika beståndsdelar. Jämfört med den vanliga gjutbetongen modifieras sprutbetongen för att kunna få de extrema egenskaper som krävs. Sprutbetongen skall bland annat kunna pumpas fram till munstycket, där den sedan skjuts mot en vertikal appliceringsyta och där bygga upp ett tillräckligt tjockt lager utan att falla isär ([Fjällberg et al. 2006](#)).

Förhållandet mellan cement och vatten är oftast större i sprutbetong än i traditionell gjutbetong ([Ansell et al. 2006](#)). Största skillnaderna mellan betong och sprutbetong är cement/ballast förhållandet och den större andelen finmaterial i ballasten som visas i sikt kurvorna (se fig. 2-1). Förhållandet cement/ballast i sprutbetong skall vara mellan 1:3 och 1:4 ([AB Svensk byggtjänst 2004](#)) vilket betyder att man tillför större andel cement jämfört med vanlig betong. Dessa två är kopplade till varandra genom att den högre andelen finmaterial bidrar till en större specifik yta på ballasten, som cementkornen måste binda.

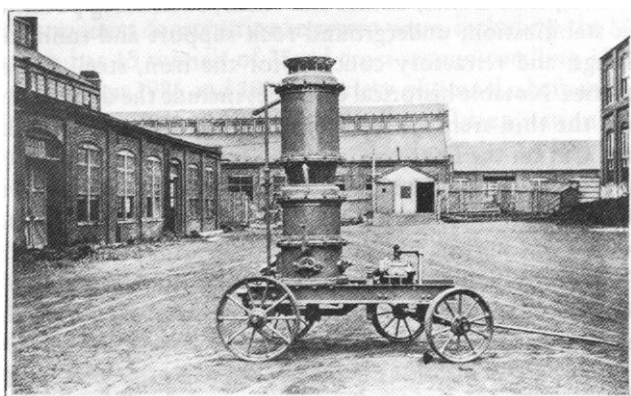


Figur 2-1 Siktcurvor för våtsprutning(vänster) och torrsprutning(höger) (Lagerblad 1995).

Vid applicering av sprutbetongen på en nästan vertikal yta tillsätts tillstyvnadsacceleratorer till sprutbetongen vid munstycket, för att få en momentan tillstyvnad vid vidhäftning till underlaget (se kapitel 2.4.5). Tillstyvnadsacceleratorerna ger en tillstyvnad men inte något verkligt hårdnande och brukar därför ofta kallas för en falsk struktur eller falsk tillstyvnad (Fjällberg et al. 2006).

2.3 Historik

Uppfinnaren Carl E. Akeley (1864-1926) var den som först började experimentera med tryckluft för att applicera murbruk. Han använde denna metod för att göra modeller av djur. Vid sekelskiftet utvecklades detta genom inblandning av cement i murbruket. 1911 fick Carl E. patent på både metoden och utrustningen. Utrustningen, "the cement gun" (se fig. 2-2) bestod av ett kärl som innehöll cement och sand. Genom tryckluft fördes sedan blandningen till munstycket där vatten tillsattes, denna metod kallas torrsprutning.



Figur 2-2 Carl E. Akeley's uppfinning "the cement gun" (Austin och Robins 1995).

Senare tillsattes även större fraktioner ballast i blandningen och runt 50-talet började uttrycket sprutbetong användas. En annan metod för sprutbetong utvecklades där färdigblandad betong transporteras med pump till ett munstycke, tryckluft tillsätts sedan för att skjuta iväg betongen mot ytan den skall appliceras på, denna metod kallas våtsprutning.

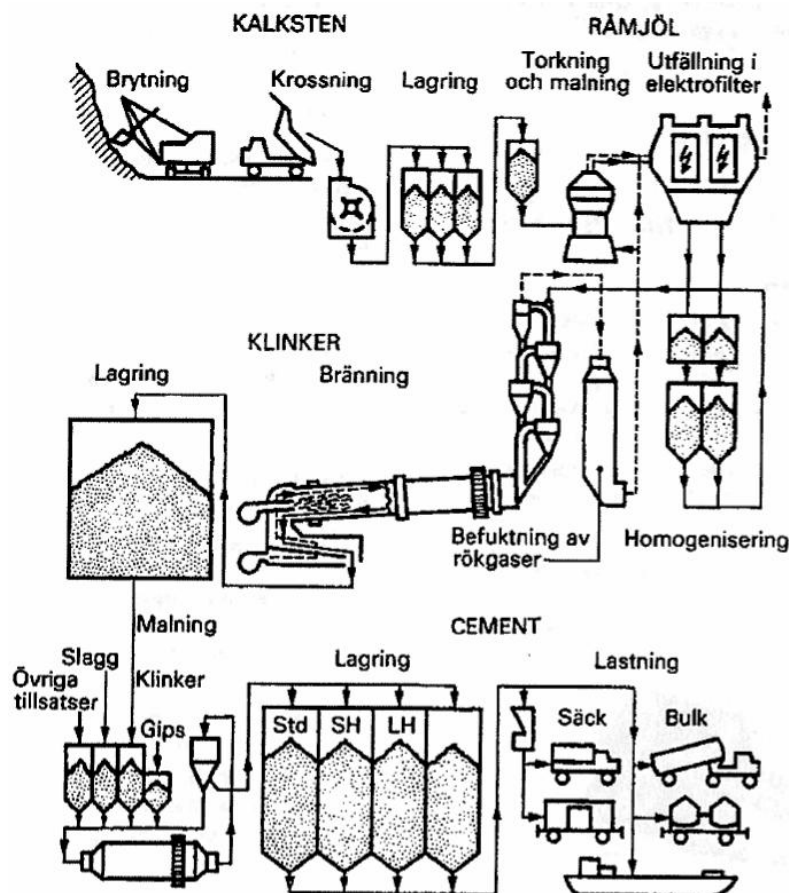
Eftersom sprutbetong är en så enkel och flexibel metod har den fått många användningsområden allt från nybyggnad till renovering av äldre betongkonstruktioner, bergstabilisering, tunnel och underjordsförstärkning (Austin och Robins 1995).

2.4 Ingående material

2.4.1 Cement

Definitionen av cement är att det är ett hydrauliskt bindemedel i pulverform. I Sverige var portlandcement det vanligaste bindemedlet för betong fram till mitten på 1990-talet. Portlandcement framställs av kalksten och lermineral och den har fått sitt namn på grund av likheten med en stenart som finns på halvön Portland i England. Byggcement är idag det vanligaste använda cementet, ca 90 % av konsumtionen består av detta portlandkompositcement.

Vid framställning av cement (se fig. 2-3) blandas finmalen kalksten och lermineral som bränts vid ca 1500°C i bestämda proportioner. Efter bränningen fås en cementklinker som efter kylning mals till ett finkornigt pulver som blandas med gips. Gips har till uppgift att reglera cementens bindning så att denna inte går allt för snabbt. Nu har materialet intagit formen av det hydrauliska bindemedlet cement.



Figur 2-3 Principschema för tillverkning av cement (Almgren 2007)

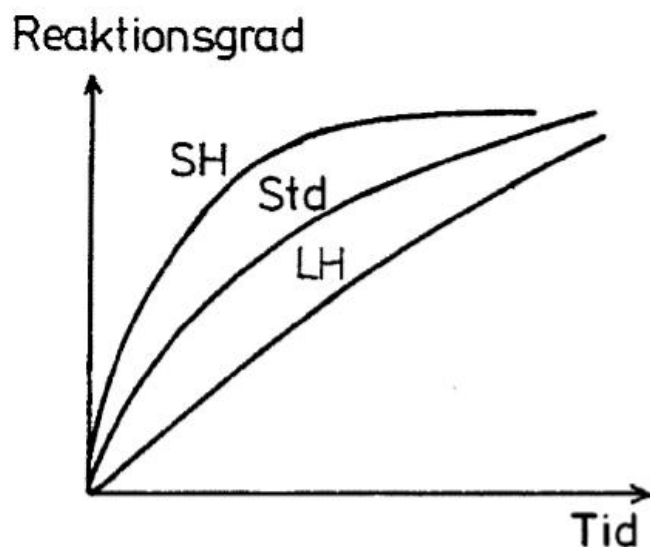
När betongens delmaterial blandas börjar omedelbart vissa kemiska reaktioner mellan cement och vatten, en hydrationsprocess. Hydrationsprocessen beskrivs mer i detalj i kapitel 3

(Betongens fuktegenskaper). När det hydrauliska bindemedlet reagerar med vatten bildas en hårdnad produkt.

I Sverige indelas cement i tre produktbeteckningar;

- snabbt hårdnande (SH)
- standard (Std)
- långsamt hårdnande (LH).

Dessa har olika reaktionshastigheter (se fig. 2-4) som beror på varierande kemisk sammansättning och storleken på cementpartiklarna.



Figur 2-4 Reaktionsgrad för olika cement. (Almgren 2007)

Snabbt hårdnande cement har en hög korttidshållfasthet och detta medför en stor värmeutveckling. Detta kan vara fördelaktigt vid tidig formrivning t.ex. vid gjutning vintertid och för betongvaruindustrin.

Långsamt hårdnande cement kan vara att föredra vid grova konstruktioner eftersom höga temperaturer orsakas av cementreaktionen; En hög temperatur som när det svalnar kan ge upphov till stora sprickor.

Svensk anläggningscement är bra för grövre konstruktioner på grund av sin låga värmeutveckling. Andra fördelar med anläggningscementet som är framtaget för utomhuskonstruktioner är;

- Bättre frostbeständighet
- Skydd mot sulfater och havsvatten
- Mindre risk för skadliga ballast reaktioner.

För betongkonstruktioner och sprutbetong i tunnel skall enligt BV-tunnel cementen ha liknande egenskaper som anläggningscement har (Banverket 2005).

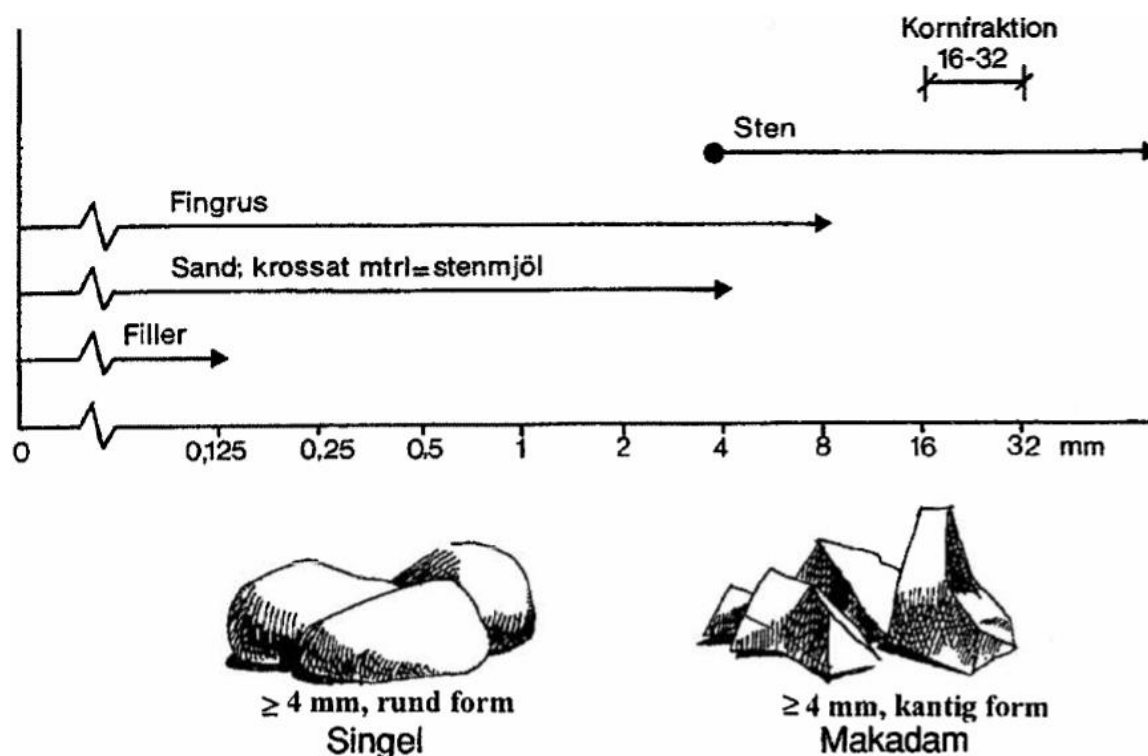
2.4.2 Vatten

För att hydratationen ska åstadkommas behövs vatten till cementen. Som tumregel duger vatten som är drickbart också som blandningsvatten i betong. När betongen sedan skall fukthärdas, kan samma kvalitetskriterier som för blandvattnet tillämpas. Föroreningar som lerpartiklar och material med organiskt ursprung har ingen negativ inverkan på betongen. Däremot är havsvatten kloridhaltigt och skadligt för armerade konstruktionen, detta eftersom ung betong är permeabelt för kloridjoner. Surt vatten och marmoraggressiv kolsyra är för betong utpräglat aggressivt och bör inte användas som härdningsvatten ([AB Svensk Byggtjänst 1992](#)).

2.4.3 Ballast

I betong utgör ballasten ca 60-80 % av volymen och är därmed det dominerande delmaterialet. I [AB Svensk Byggtjänst 1992](#) definieras ballast som ett samlingsnamn på bergartsmaterial som används i betongtillverkning. Svenska akademins ordlista menar att ballast kommer från ordet barlast, vilket har innebörden ”en last som ger nödvändig stadga”, dessa två är en bra sammanfattning på ballast och dess uppgift.

Ballast kan komma både från naturen men även vara speciellt tillverkat eller en restprodukt från industrin ([Lagerblad 1995](#)). Ballast i betong bör ha en jämn fördelning på material i olika storlekar, detta för att kunna styra betongens egenskaper i det färska och härdnade stadiet. Material delas upp efter storlek i fraktioner enligt fig. 2-5. Singel är naturballast från 4 mm och uppåt. Makadam har samma storlek men är krossat material ([Almgren 2007](#)).

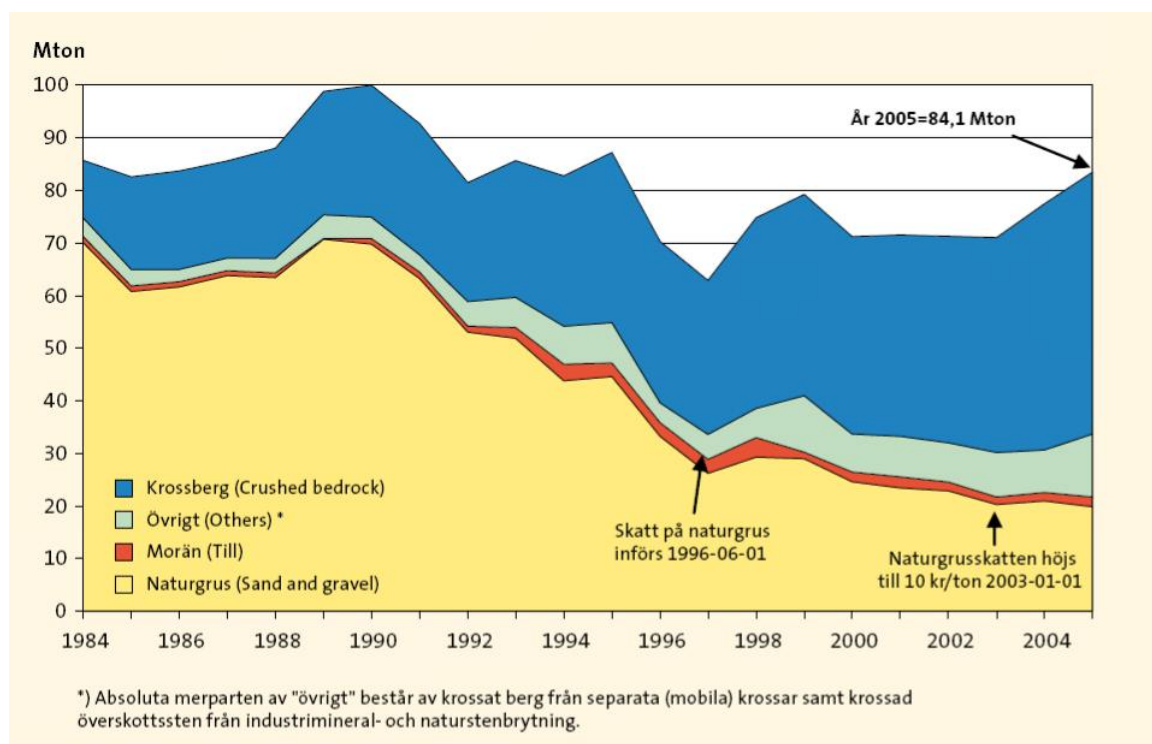


Figur 2-5 Uppdelning av ballastmaterial i storlek och fraktioner. ([Almgren 2007](#))

Naturballast

Den största delen naturballast i Sverige har bildats under istiden som inträffade för ca 10000 år sedan. Naturballasten kommer i huvudsak från isälvsavlagringar i form av rullstensåsar där man har en botten av sten och block som mot ytan blir allt finare material. I vissa fall kan iskanten ha stannat upp av någon anledning och bildat isälvsdeltan, dessa är väl sorterade och består oftast av finare material som sand, mo och fingrus (Lagerblad 1995).

Eftersom naturgrus är en ändlig resurs som är mycket viktig för t.ex. rening av vatten, har mål satts upp för att begränsa användandet av naturballast. Riksdagen har bestämt att år 2010 skall naturgrusanvändningen ha reducerats till 12 Miljoner ton, år 2005 hade man kommit strax under 20 miljoner ton. Fig. 2-6 visar utvecklingen hur krossat material ersatt naturgrus (SGU 2005).



Figur 2-6 Leverans av ballast uppdelat i materialslag åren 1984-2005 (SGU 2005)

Ballast inverkan på betong

I det färskaste stadiet är det mest flytegenskaper och arbetbarhet som ballasten påverkar genom kornstorleksförändring och kornform. Även kornens mikrotopografi och ytegenskaper inverkar. Den sistnämnda kan påverkas genom tillsats av vattenreducerare eller flyttillsatsmedel, kornen får då en laddning som gör att de stöts från varandra och betongen blir lättare att arbeta med.

När betongen har kommit in i det unga stadiet är det mest ytkemiska egenskaper som påverkar hydratationsutvecklingen och bindningsegenskaperna. Med kalciumrika mineraler i ballasten påskyndas hydratationen. Föroreningar i ballast har också en betydande roll, som när organiska ämnen såsom humus och kol följer med ballasten och försämra betongens

tillstyvnande. Även sulfater stör reaktionsförloppet, i naturballast är detta ofta inget problem eftersom de till största del är bortspolade.

I normal betong behöver ballasten inte speciellt hög hållfasthet, detta eftersom cementpastan oftast har lägre hållfasthet och brister först. För betong som skall vara starkare och styvare eller utsätts för nötning, såsom vägens slitbanor, är det oftast högre krav på ballastens kvalitet.

Om ballasten är porös och inte är volymbeständig kan detta ge upphov till problem med frostsprängning. Krympning i ballast kan ge stora skador när fasgränserna släpper och man får ökad permeabilitet, detta medför då att betongens hållfasthet sänks.

Helst skall ballast vara inert dvs. reaktionströgt så att den inte reagerar kemiskt med cementens porlösningar. För de flesta ballastmaterial är dessa reaktioner så långsamma att det inte behöver beaktas ([Lagerblad 1995](#)).

2.4.4 Tillsatsmaterial

Cementliknande material

Det finns en rad olika cementliknande material som blandas i betongen för att höja kvalitén på olika sätt, exempel på detta är flygaska och microsilica. Tillsatsmaterialen innehåller SiO_2 som reagerar med kalciumhydroxid, detta är den svagaste och mest vattenlösliga hydratiseringsprodukten i betong. Tillsammans bildar dessa ett stabilt kalciumsilikathydrat, som ger en ökad hållfasthet. Skillnad mellan microsilica och flygaska är delvis storleken på partiklarna, där microsilica är ungefär 100 gånger mindre än flygaskan. Även den procentuella mängden SiO_2 är större i microsilica.

Fördelar vid användning av microsilica är att det ger en högre hållfasthet, bättre beständighet och en lägre permeabilitet vilket ger en mer homogen betong. För sprutbetong finns de främsta fördelarna för den färska betongen, där fästförmåga och partikelsammanhållningen ökas. Detta gör det lättare att spruta tjocka skikt och återslag reduceras, vilket ger microsilica en klar fördel mot andra cementliknande material ([Austin and Robins 1995](#)).

Fibrer

Som för alla cementbaserade material har betong mycket låg deformationsförmåga vid dragning. När betongen krymper av uttorkning eller av temperaturrörelser överstigs ofta töjningsförmågan, sprickbildningar uppstår då eftersom fri rörelsemöjlighet ofta inte finns. Med den begränsade töjningsförmågan följer även en mycket dålig lastbärande förmåga vid dragning.

För att lösa detta används oftast armeringsjärn i den del som kommer att utsättas för dragning, så att betongen bara behöver ta upp de tryckkrafter som uppstår. I vissa fall kan armeringsarbetet vara besvärligt och ta allt för lång tid, man kan då använda sig av fiberarmerad betong. Denna verkar genom små armeringselement som är jämt spridda över sektionen. Det kan beskrivas som en komposit med fibrer som är inbäddad i en matris av betong. Fibrernas uppgift är att förbättra tøjbarhet, draghållfasthet och sprickkontroll, medan matrisen ska ge styvhet, tryckhållfasthet och kontinuitet ([AB Svensk Byggtjänst 1992](#)).

Stål, glasfiber och plast (Polypropen) är material som används för fibertillverkning, utformning finns i en mängd varianter från raka till helt oregelbundna. Det hittills dominerande materialet är stål där fibrerna oftast har en längd på mellan 18 till 30mm och kan se ut som i fig. 2.7 (Austin och Robins 1995).



Figur 2-7 Dramix fibrer

2.4.5 Tillsatsmedel

Tillsatsmedel används för att ändra betongens egenskaper i såväl färskt som hårdnat tillstånd. Några tillsatsmedel som är aktuella för sprutbetong är:

- Tillstyvnadsacceleratorer
- Retarderande
- Luftporbildande
- Vattenreducerande

(AB Svensk Byggtjänst 1992)

Tillstyvnadsacceleratorer

Acceleratorer tar man hjälp av för att åstadkomma en momentan tillstyvnad när betongen sprutats på en yta, då kan tjockare skikt av betong byggas upp utan att falla sönder. Eftersom acceleratorerna ger en omedelbar tillstyvnad åt betongen, tillsätts dessa i munstycket innan betongen skjuts iväg.

Acceleratorer som brukar användas vid betonggjutning påverkar öppethållandeperioden (se kapitel 3.1) för denna genom att minska den. Denna process är för långsam för sprutbetongen som måste stelna direkt då den träffar ytan på de sprutade områdena. Ur SveBeFo Rapport 86, *"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"* (Lagerblad et al. 2007).

Det finns i princip tre acceleratorer som används till sprutbetong i dag, dessa är vattenglas, alkaliaccelerator och alkaliefri accelerator.

Vanligast är den alkaliefria acceleratoren som består av olika mängd:

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

Den accelererande effekten fås ur en kalcium-aluminat-sulfat reaktion. Ett problem har tidigare varit att lösa tillräckligt med aluminiumsulfat i vatten. Tillverkarna löser detta på olika sätt, som oftast är affärshemligheter ([Fjällberg et al. 2006](#)).

Retarderande tillsatsmedel

Ett retarderande tillsatsmedel fördröjer tillstyvnande samt starten för hållfasthetstillväxten, fördröjningen kan vara upp till flera dygn, utan någon inverkan på hållfasthetstillväxtens hastighet. En retarder är i lösning när den blandas i betongen, mängden som skall blandas i beror på faktorer som bl.a. fabrikat, utspädning, cementsort.

Dessa medel är till hjälp när betongen måste transporteras långa sträckor, då kan tillstyvnanden hindras tills betongen kommit på plats. Andra ändamål kan vara att hindra gjutfogar samt kunna styra tillstyvnandet vid glidgjutningar och undervattensgjutningar ([AB Svensk Byggtjänst 1992](#)).

Luftporbildande tillsatsmedel

Det finns två anledningar att använda luftporbildande tillsatsmedel; att få bättre frostbeständighet och gjutbarhet. Några andra fördelar som erhålls i det färska stadiet (se avsnitt 2.6.1) är:

- Långsammare vattenseparation.
- Arbetbarheten blir bättre, men konsistensen ändras inte nödvändigtvis.
- Vattenreducerande egenskaper, vattenbehovet kan sänka med ca 1-4% per procent tillförd luft.

Sedan betongen har hårdnat får den en annan uppsättning egenskaper pga. luftporerna. Betongen får bra skydd mot frostangrepp, medan hållfastheten sjunker 3-5 % per procent inblandad luft. Krypningen blir normalt 10 % större för en betong med luftporbildare än en referensbetong ([AB Svensk Byggtjänst 1992](#)).

Vattenreducerande tillsatsmedel

Vattenreducerande tillsatsmedel består av ytaktiva ämnen som påverkar cementkornen så att dessa fördelar sig jämt i betongmassan. På så sätt fås en mer lättflytande betong och cementen utnyttjas bättre.

För att få en mer lättflytande betong med samma betongsammansättning kan vattenreducerande medel tillsättas. Även om konsistensen skall vara densamma kan vattenreducerare tillsättas för att få lägre vct och därmed bättre kvalitet på betongen.

Andra egenskaper vattenreducerare medför är större eller mindre vattenseparation beroende på vilket medel som används. Oftast fås en retarderande verkan som ökar vid låga temperaturer och högre dosering.

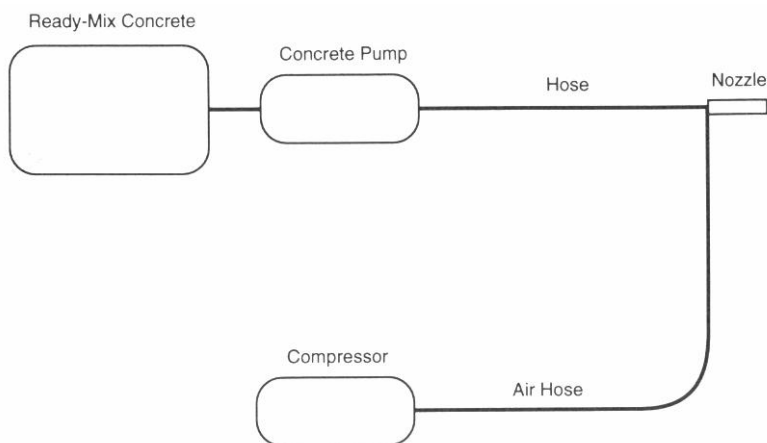
För den hårdnade betongen förskjuts hållfasthetstillväxten på grund av den retarderande inverkan. När man behåller konsistensen och tillsätter vattenreducerande medel, kommer vct minska vilket ger en högre hållfasthet och en bättre beständighet. Man får en något större tidig krympning (ca 0,05 ‰) när vattenreducerare används ([AB Svensk Byggtjänst 1992](#)).

2.5 Applicering

2.5.1 Våtsprutning

Vid våtsprutning (se fig. 2-8) har man blandat ihop de flesta ingående materialen, som cement, ballast och vatten, för att sedan med hjälp av en pump transportera betongen till munstycket. Det finns två sätt att göra detta; den hydrauliska metoden och tryckluftsmetoden (se avsnitt 2.5.2).

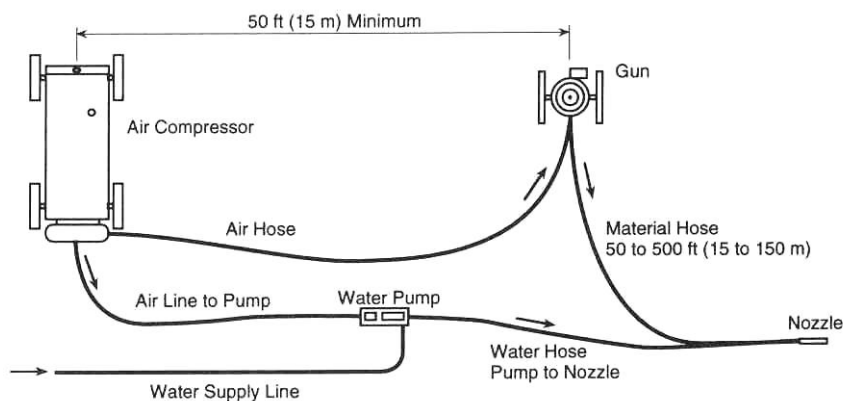
Den hydrauliska metoden bygger på att den färdigblandade betongen transporteras med hjälp av en hydraulisk pump. Betongen går sedan genom en slang som vanligtvis har en diameter på 5-10cm, för att tillslut når fram till munstycket. Tryckluft tillsätts då i munstycket för att skjuta iväg betongen med en hastighet av 10-30m/s. Munstycket är ofta trattformar med hål inuti där tryckluften och eventuellt acceleratörer tillsätts (Austin och Robins 1995).



Figur 2-8 Principschema för våtsprutning (Austin och Robins 1995)

2.5.2 Torrspirutning

Torrspirutning (se fig. 2-9) är en annan metod för applicering av sprutbetong, här blandas först cement, ballast och eventuella tillsatsmaterial. Tryckluft transporterar sedan det torra materialet till munstycket där vatten och eventuellt acceleratörer tillsätts, för att sedan skjuta iväg betongen. Färdigblandat material går att köpa förpackat där den vanligaste storleken är 25 kg säckar.



Figur 2-9 Principschema för torrspirutning (Austin och Robins 1995)

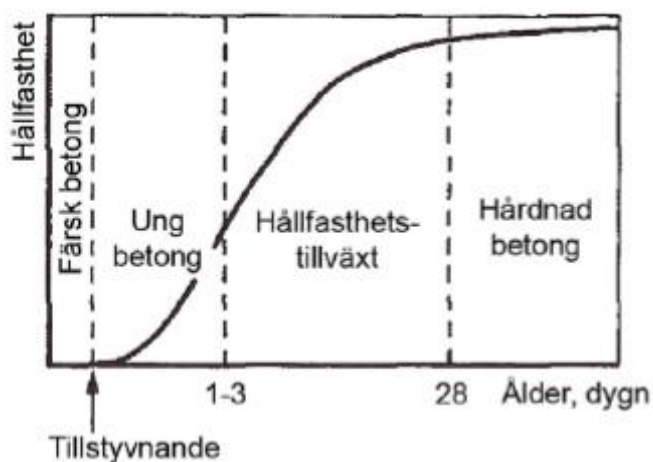
2.5.3 Tryckluftsmetoden

Tryckluftsmetoden är en blandning av våt och torrspirutningsmetoden, den färdigblandade betongen förs fram med hjälp av tryckluft. För att kunna få detta att fungera måste stora mängder luft tillsättas, upp till 20 m³/min (Austin och Robins 1995).

2.6 Hållfasthetsutveckling hos sprutbetong

2.6.1 Hållfasthetstillväxt

Hydratationen och hållfasthetsutvecklingen kan delas in i fyra olika stadier; färsk betong, ung betong, hållfasthetstillväxt och hårdnad betong (Burström 2001).



Figur 2-10 Schematisk bild av betongens hårdnande (Burström 2001)

Under den första fasen (se fig. 2-10) med färsk betong sker en viss tillstyvnad av betongen men vanlig gjutbetong kan fortfarande lätt formas och vibreras.

I det tidiga stadiet med ung betong (se fig. 2-10) sker hårdnande av betongen och den kan då inte längre formas. Betongen är mycket känslig för uttorkning, temperatur och belastning under denna fas vilket kan påverka betongens långvariga hållfasthet om kraftig avdunstning från betongens fria yta får ske (Agostinacchio 2004). Den färska och unga betongen bör därför hanteras på ett korrekt sätt för att uppnå önskad slutprodukt. En nygjuten eller nysprutad betong påverkas i hög grad av det omgivande klimatet.

I stadiet ”Hållfasthetstillväxt” (se fig. 2-10) då betongen har fått upp en betydande hållfasthet och en fast struktur påverkas den i lägre grad eller inte alls av yttre omständigheter som temperatur och relativ luftfuktighet. Den har också i detta stadiet liknande mekaniska egenskaper som den hårdnande betongen, om än inte fullt utvecklat (Burström 2001).

2.6.2 Den slutliga hållfastheten

Tillstyvnadsacceleratorerna påverkar den fasta strukturen i sprutbetongen och det går därför inte att utgå från att hållfasthetstillväxten och strukturen blir den samma som i vanlig gjuten betong (Fjällberg et al. 2006).

För vanlig sprutbetong som är våtsprutad kan en hållfasthet på 20-45 MPa fås efter 28 dagar när vct på 0,7-0,45 används. För att få högre hållfastheter kan microsilica, plasticerare och vattenreducerare medel tillsättas, som då med lätthet kan ge en hållfasthet på 60MPa. För att mäta tryckhållfasthet på sprutbetong borras en kärna ur testpaneler eller in-situ, dessa trycktestas sedan för att få fram hållfastheten.

Vid jämförelse av hållfastheten efter 28 dagar på sprutbetong och formgjuten betong, framgår det att hållfastheten följer varandra med varierande vattencementtal. Blandas normala mängd fibrer (60-80kg/m³) i betongen ändras tryckhållfastheten generellt inte nämnvärt (Austin och Robins 1995).

3 Betongens fuktegenskaper

I detta kapitel ges en sammanfattning av betongens hydratation. Då vattnet har en central roll i hydratationen under en lång period är betongen känslig för uttorkning. Därför beskriv också i detta kapitel den mängd vatten som kan bindas till luften och kan påverka betongen genom avdunstning, så kallad diffusion.

3.1 Portlandscementets hydratation

Hydrat är en kemisk förening som bildats genom upptagande av vatten. Med hydratation avses här de kemiska reaktioner som sker mellan vatten och cement. Det är dessa reaktioner som bygger upp och ger betongen dess hårdnande ([Burström 2001](#)).

Vid hydratation sker flera olika kemiska reaktioner med cementmineralen. Huvudmineralen i cementklinker är alit (C_3S), belit (C_2S), aluminat (C_3A) och ferrit (C_4AF). Vid reaktion med vatten bildas en extremt finporös gel på cementkornens ytor. Cementgelen som bildas är reaktionsprodukter från klinkermineralen alit och belit som vid reaktion med vatten bildar kalciumsilikathydrat ($CaO+SiO_2+H_2O$) respektive kristaller av kalciumhydroxid ($CaO+H_2O$). Då gelen är porös och innehåller kemiskt bundet vatten, kommer dess volym att vara större än den av det reagerade cementkornets ursprungliga volym. När reaktionen mellan cement och vatten fortgår, kommer därför alltmer av det ursprungliga porutrymmet mellan cementkornen att fyllas av cementgel. Detta ger en cementpasta som blir allt tätare och alltså starkare ([Fjällberg et al. 2006](#)).

Hydratationsprocessen i cementpastan (portlandcement) kan delas upp i fyra olika stadier med olika reaktionsprocesser. I det första stadiet då vattnet kommer i kontakt med cementen bildas det en tunn hinna av kalciumsilikathydrat som fördröjer den fortsatta hydratationen av cementkornet.

Det andra stadiet kallas för ”öppethållandeperioden”. Det som händer i det andra stadiet är att den tidiga hydratationen av ytan på cementkornet förhindrar en fortsatt reaktion men en omlagring sker av produkterna som senare möjliggör en fortsatt hydratationsprocess.

Det tredje stadiet kallas för ”accelerationsperioden”. Det som händer i detta stadiet är att hydratationsprocessen sätter fart igen då omlagringen har skapat ett mellanrum mellan cementkornen och de tidigt bildade hydraten. Vatten kan då komma i kontakt med cementpartiklarna igen. De nya hydratprodukterna avsätts utanför de tidigare bildade produkterna och mellanrummen mellan cementkornen fylls med cementhydrat vilket bygger upp betongen och ger dess hårdnande.

I det fjärde och sista stadiet sker hydratationsprocessen mycket långsammare ty allt större del är kalciumsilikathydrat som bildar ett skyddande skal mot fortsatt hydratation. Det sker också en omstrukturering av cementgelen som blir mera regelbundet uppbyggd och ger en mer strukturerad porstruktur ([Fjällberg et al. 2006](#)).

3.2 Fukt i luften

Luften innehåller alltid en viss mängd vattenånga och vid varje specifik temperatur finns det ett högsta möjliga värde på hur mycket vattenånga luften kan bära innan vattnet fälls ut. Den aktuella vattenånghalten betecknas v och uttrycks i kg ånga per m^3 luft. Det maximala värdet

för vattenånghalten i luft kallas mätnadsånghalten v_s och betecknas med samma enhet som ovan.

Mätnadsånghalten vid olika temperaturer kan beräknas med uttrycket:

Formel 3-1 Mätnadsånghalten (AB Svensk Byggtjänst 1992)

$$v_s = e^{\frac{a-b}{273,2+T}} \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

där $a = 20,11$ och $b = 5061$ för $T \leq 0^\circ\text{C}$

Luftens aktuella fukttinnehåll uttrycks oftast genom begreppet relativ fuktighet som betecknas RH (Relative Humidity). Relativ fuktighet är förhållandet mellan det aktuella fukttinnehållet v och maximala värdet för vattenånghalten i luft kallas mätnadsånghalten v_s .

Formel 3-2 Relative Humidity (AB Svensk Byggtjänst 1992)

$$RH = \frac{v}{v_s} \cdot 100 \quad (\%)$$

Luft med en temperatur på 20°C som upplevs torr kan innehålla mer vattenånga jämfört med en kallare luft som upplevs som mycket fuktig (AB Svensk Byggtjänst 1992).

Fuktförhållandena i betongen och dess porsystem har stor inverkan på många processer i hydratationen. Om hydrationsprocessen får ske i ett torrare klimat än 80 % RH (relativ fuktighet) blir inte reaktionen fullständig då stor vattenförlust sker genom fukttransport från betongen till luften. För istället processen ske vid högre fuktighet än 80 % blir den mer fullständig (AB Svensk Byggtjänst 1992).

3.3 Fuktegenskaper

Cementpastans egenskaper beror till stor del av förhållandet mellan cement och vatten, vilket benämns vattencementtal, vct (se formel 2-2).

Uttorkningen av vanlig gjutbetong kan delas in i två separata förlopp, uttorkning utåt (diffusion) och självuttorkning. Många faktorer påverkar dessa två processer och har inverkan på betongens uttorkningstid eller uttorkningshastighet. Nedan är de viktigaste faktorerna för vanlig gjutbetong sammanställda (Andersson och Lundgren 2007).

- Vattencementtal, vct
- Cementtyp
- Temperatur hos betong och omgivning
- Relativ fuktighet hos omgivning
- Tillsats av mineraliska tillsatsmaterial (silikastoft, flygaska, slagg.)
- Härdningsmetod
- Acceleratorer

När en betongkonstruktion är nygjuten eller sprutad är dess ånghalt förhållandevis hög. Om den omgivande luften har en lägre relativ fuktighet än betongen sker en fukttransport från betongen till luften, så kallad diffusion (Burstrom 2001).

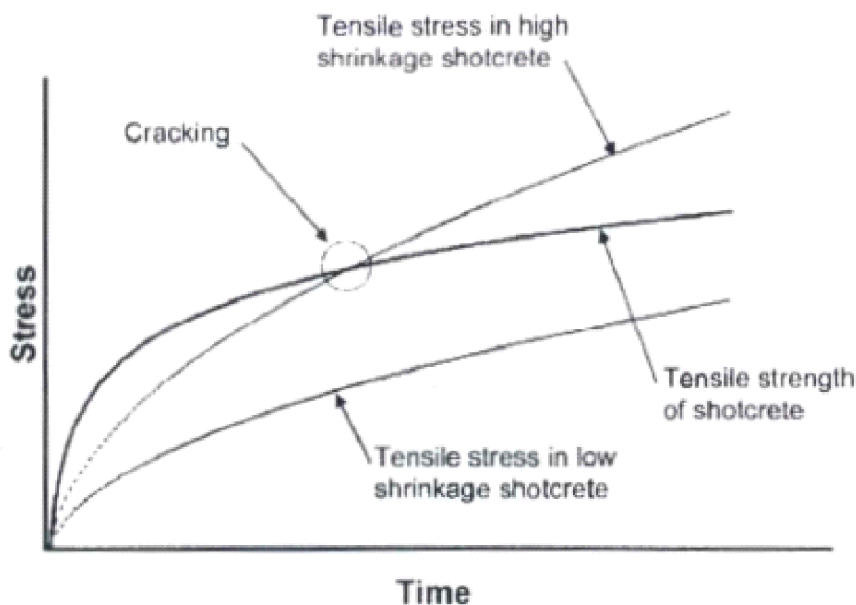
När en betongkonstruktion torkar sker uttorkningen utifrån och in dvs. betongen torkar först vid ytan medan mitten av konstruktionen har en högre fuktighet. Det finns därför ingen jämn fuktfördelning i betongkonstruktionen då den torkar. Genom fukttransport i betongens porsystem uppnås dock slutligen jämvikt i betongens fuktfördelning (Andersson och Lundgren 2007).

4 Krympning

I detta kapitel behandlas krympning i betong i olika stadier, vilken kan orsaka krympsprickor i betongkonstruktioner om inte fri krympning tillåts.

4.1 Definition av krympning

Krympning är en materialrörelse som orsakas av en minskning av den ursprungliga volymen, motsatsen till svällning. Om denna volymförändring får ske fritt utan mothållande krafter som påverkar materialet inifrån eller utifrån, kallas detta en fri krympning. Motsatsen till fri krympning är förhindrad krympning och är när materialets volymminskning hindras. Detta kan ske då en konstruktion består av flera olika material med olika krympegenskaper. Gjutbetong påverkas exempelvis av omgivande konstruktioner eller gjutformar samt av armeringsstänger inuti betongen, som inte har samma krympegenskaper som betongen. Sprutbetong som är applicerad på t.ex. en bergyta utsätts för mothållande krafter och är därför också en förhindrad krympning. Förhindrad krympning leder ofta till att betongen spricker på grund av volymminskningen och de mothållande krafterna. Vid förhindrad krympning kan det antingen bildas små mikrosprickor genom hela materialet eller en stor spricka vid ett svagt parti.



Figur 4-1: Krympning sker då dragspänningen överskrider sprutbetongens draghållfasthet (Morgan och Chan 2001).

Forskning och praktiska försök har visat att de flesta acceleratorerna som används i betongen, ökar betongens benägenhet att krympa, speciellt vid tidig ålder (Morgan och Chan 2001). Mätresultat från tidigare gjorda krympningsförsök visar att stål och syntetiska fibrer inte kan förhindra vattenavdunstningen från betongen men att de kan reducera krympningen (Agostinacchio 2004). Stål och syntetiska fibrer i betongen behöver inte nödvändigtvis reducera mängden krympningssprickor i betongen men är ändå fördelaktiga för att kontrollera och eventuellt minska sprickvidden på grund av plastisk- och uttorkningskrympning (Morgan och Chan 2001). I tidigare utförda försök med fiberarmerad betong har dock inga observationer gjorts av att den fria krympningen minskar (Malmgren et al. 2005).

Krympningens definition enligt Betonghondboken kapitel 15: ”Med krympning och svällning avses här de rörelser i betongen som orsakas av vattenavgång eller vattenupptagning i den hårdnande betongen.” (AB Svensk Byggtjänst 1992). Det finns olika typer av krympning under de fyra olika stadierna som betongen genomgår då den hårdnar. Krympningen i de fyra olika stadierna beror på om vattenmängden minskar i betongen, om den är förseglad eller om den torkar i de alla de fyra tillstånden (Ansell et al. 2006). Den primära orsaken till krympning är förlusten av vatten på grund av avdunstningen från den fria betongytan (Morgan och Chan 2001). Den totala krympningens storlek beror på materialet, temperaturen, den relativa fuktigheten, betongens ålder då uttorkningen påbörjades och betongkropparnas storlek och form (Fjällberg et al. 2006). Den fria krympningen har exempelvis visat sig vara mindre vid tjockare betongtjocklek på provkroppar än i tunna (Malmgren et al. 2005). Hårdningen av betongen i en mycket stor konstruktion sker under en väldigt lång tid och krympningsförloppet avtar med tiden men kan pågå i flera 10-tal år efter gjutning. Krympningen är ett långvarigt förlopp men cirka 70 % sker under de första tre månaderna efter det att cementet har blandats med vatten (Fjällberg et al. 2006).

4.1.1 Autogen krympning

Autogen krympning (självkrympning) orsakas av att cementhydratationen i sig själv konsumerar vatten i den kemiska processen. Om betongen skulle förseglas helt och inte tillåtas få någon tillförsel eller förlust av vatten från omgivningen, skulle den ändå genomgå en autogen krympning eller kemisk krympning (Ansell et al. 2006). Den autogena krympningen kan uppgå till så mycket som 0,1 % vilket enligt Ansell et al. 2006 motsvarar ca 10 % av den totala krympningen på grund av långtidsuttorkning. Den autogena krympningen pågår hela tiden så länge som det finns cementkorn som inte har hydratiserats.

4.1.2 Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning är den största och viktigaste krympningen av betong och orsakas av att fukt diffunderar till omgivningen och volymen av betongen minskar på grund av vattenförlust i porerna. Uttorkning av betongen sker redan från det att den relativa luftfuktigheten är mindre än 95 %.

4.1.3 Plastisk krympning

Plastisk krympning sker i den färska betongen då denna fortfarande är formbar (plastiskt tillstånd). Plastisk krympning sker normal under betongens fem första timmar. Det rekommenderas därför starkt att vattenhärda betongen innan hårdningen, hydratationen, sätter igång för att minimera att sådan krympning sker i betongen (Bransch et al. 2002). Tidig sprickbildning orsakad av plastisk krympning påverkar i hög grad konstruktionens livslängd

och är den farligaste krympningen då den oftast är den största (Agostinacchio 2004). Den plastiska krympningens orsak beror på tre individuella faktorer som i kombination ökar den plastiska krympningen och risken för uppsprickning. De tre individuella faktorerna är, sättning i materialet, avdunstning (uttorkning) och autogen krympning (kemisk krympning) (Olek och Weiss 2003). Den största orsaken till plastisk krympning är dock uttorkningskrympningen och plastisk krympning i sprutbetongen brukar därför förknippas med att fukt avges till omgivningen.

5 Bestämmelser

I detta kapitel görs en kort sammanställning över gällande riktlinjer och standarder som används vid tunnelbyggen i dagsläget och hur de beskriver utförandet av efterbehandling av sprutbetong. De avsnitt som beskrivningarna här nedan är tagna ifrån är i samtliga publikationer från avsnitt med utförande av betongarbeten eller sprutbetongarbeten.

5.1 BKR

Enligt BKR – Boverkets konstruktionsregler (Boverket 2003) avsnitt 7:52 "Betongarbeten"

"Betongmassa skall transporteras, gjutas, komprimeras och härddas så att den förblir homogen, utan skadlig sprickbildning, och så att den färdiga konstruktionen får avsedd bärförmåga, stadga och beständighet."

5.2 BV Tunnel

Enligt Banverket 2005 avsnitt 5.2.4.10 Sprutbetong:

"Sprutbetong skall efterbehandlas genom W-metoden snarast efter sprutning. Härdning ska i övrigt utföras enligt BBK, avsnitt 8.4.2"

"Vid efterbehandling genom intermittent fukthärdning får luftens relativa fuktighet vid betongytan inte underskrida 90 % under den härdningstid som krävs."

5.3 Tunnel 2004

Enligt Vägverket 2004 "Tunnel 2004" avsnitt 3.4.5.8 Sprutbetong:

"Bergytans temperatur skall vara minst +2°C vid sprutning. Sprutning får inte utföras då risk för frysning föreligger."

"Sprutbetong skall efterbehandlas genom fukthärdning snarast efter sprutning. Härdning skall i övrigt utföras enligt BBK, punk 8.4.2."

"Vid efterbehandling genom intermittent fukthärdning får fuktnivån vid betongytan inte underskrida 90 % relativ fuktighet under den erforderliga härdningstiden."

5.4 BBK 04

I både Banverket 2005 och Vägverket 2004 hänvisas till utförandet beskrivet i BBK – Boverkets handbok om betongkonstruktioner, punkt 8.4.2. Enligt BBK avsnitt 8.4.2 "Transport, gjutning och härdning" (Boverket 2004) rekommenderas det att:

Erforderliga härdningsåtgärder med hänsyn till betongens hållfasthet och beständighet kan bestämmas genom särskild utredning eller utföras enligt följande principer.

Följande härdningsmetoder kan användas separat eller tillsammans:

A-metoder (utan vattentillskott)

Avdunstning förhindras genom:

- att tät, icke sugande form sitter kvar*
- intäckning av den fria betongytan med plastfolie eller annat diffusionstätt material.*

W-metoder (med vattentillskott)

Avdunstning ersätts genom:

- våttäckning med mattor, filt e.d. som hålls genomdränkta under hela härdningsperioden samt vid behov skydd av intäckningen med hjälp av plastfolie eller annat diffusionstätt material*
- kontinuerlig vattenbegjutning med fritt vatten ständigt på betongytan*
- vattenhärdning, dvs. med betongen helt nedsänkt i vatten.*

CC-metoder (applicering av membranhärdningsvätska)

Membranhärdningsvätskan appliceras på betongen snarast efter gjutning eller direkt efter det att härdning med A- eller W-metod avslutats. Membranhärdningsvätskan bör, vid provning enligt den danska provningsmetoden TI-B 33 (92) Måling av betonförseglingsmidlers virkningsgrad, ha en effektivitet på minst 75 %.

5.5 Anläggnings AMA 98, Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten

Enligt [AB Svensk Byggtjänst 2003](#), enligt kapitlet EBF.3 ”Utförande – Sprutbetong i tunnel eller bergrum”

”Dosering av accelerator skall utföras på ett kontrollerat sätt så avsedda tillsatsmängder inte överskrids.”

”Sprutbetongarbeten får inte utföras vid lägre temperatur än 5°C i luften och på bergytan.”

”Sprutbetong skall efterbehandlas genom fukthärdning snarast efter sprutning tills att dess hållfasthet uppnått 50 % av angiven hållfasthetsklass”

6 Sammanställning av tidigare försök

I detta kapitel kommer en kort sammanfattning av två stycken rapporter att göras. Dessa två rapporter presenterar resultat från liknande krympningsförsök på sprutbetong som i detta examensarbete. Syftet med detta är att kunna jämföra resultaten från försöket i detta examensarbete med dessa två rapporter (se kap 9.5 Jämförelse med andra försök). Denna jämförelse görs för att placera detta examensarbetet i ett större sammanhang samt att se rimligheten i de resultat som försöket har gett.

6.1 Sören Rolund – ”Krympningens inverkan på sprutbetongens vidhäftning mot berg”

Ur Sören Rolunds examensarbete: ”Sprickor i sprutbetongen är en faktor som kan påverka vidhäftningen om krympningen är stor” (Rolund 1999, sid ii). Syftet med försöken i Sören Rolunds examensarbete var att undersöka hur krympningen påverkar vidhäftningen mellan berget och sprutbetongen, sprickbredder och fördelningen av sprickor. En försöksserie gjordes på sprutbetongens fria krympning. Provmethod och arbetsutförande som användes beskrivs kortfattat här tillsammans med resultatet.

Målet med försöken på den fria krympningen var att variera några bestämda parametrar och studera deras effekt på den fria krympningen.

I försöket jämfördes:

- Prover med och utan fibrer, 0 och 40 kg/m³ (olika mängd fibrer jämfördes inte)
- Två olika tjocklekar, 50 mm och 100 mm
- Jämn jämfört med sprutad uttorkningsyta, sågad och ej sågad yta
- Självuttorkning jämfört med endimensionell uttorkning
- Och ett standardprov som referens.

Alla prover tillverkades enligt den svenska standarden SS 13 72 15 (SIS 1978). Betongen sprutades i provlådor med 45° lutande sidor för att betongen skulle lägga sig bra i lådan vid sprutningen. Prismor sågades sedan ut ur lådorna efter ett dygns fukthårdning. Fukthårdningen utfördes genom att betongen plastades in direkt efter tillverkning (sprutning), samt att ytan duschades med en fin vattenstråle två gånger efter sprutningen. Därefter vattenlagrades standardprovet, som användes som referens, enligt metoden i SS 13 72 15 (SIS 1978). De andra proven förvarades i temperaturen 12°C, relativa luftfuktigheten 78% och en vindhastighet på ca. 0,3 m/s. Prismorna hade måtten 100x100x400 mm³ och 50x100x400 mm³ för den med mindre provtjocklek. För att åstadkomma en endimensionell uttorkning förseglades 4 sidor, alla utom ovan och undersida, med diffusionstät byggtejp (Ecopal). På provet som skulle användas för självuttorkning förseglades alla sidor.

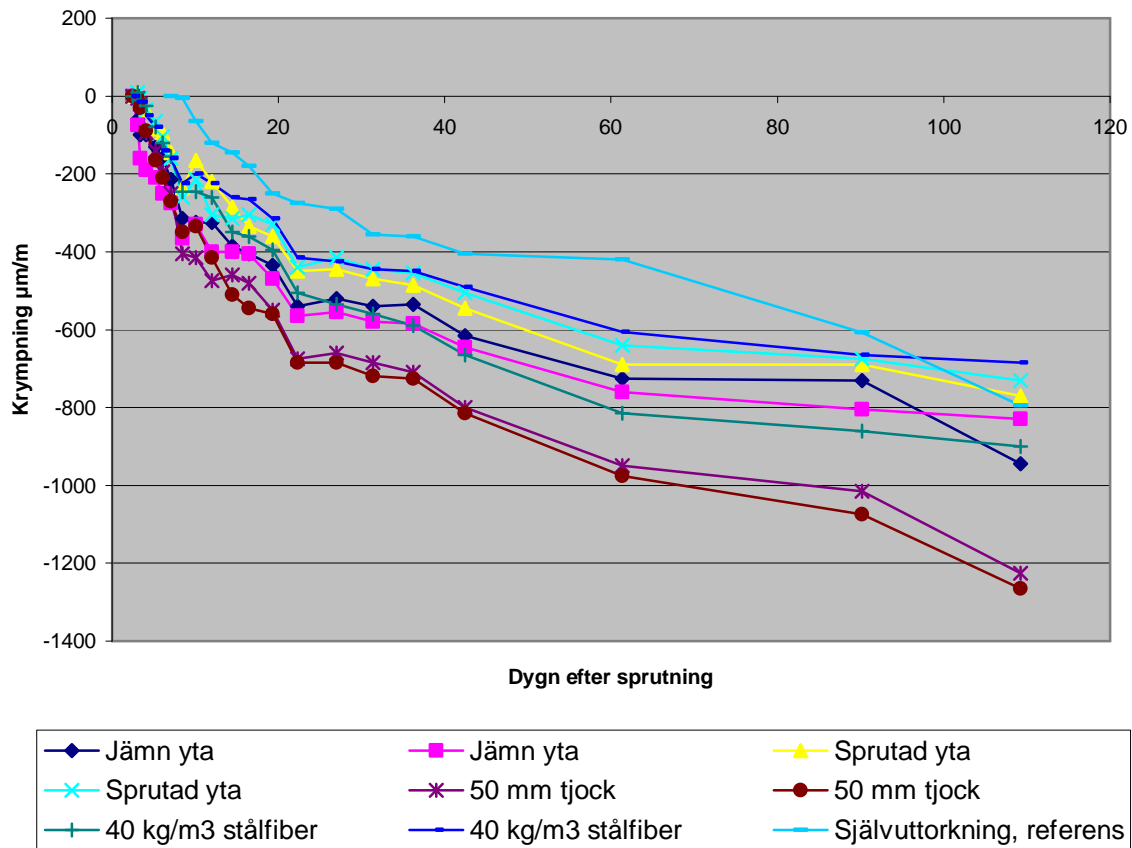
All sprutbetong som användes för försöket tillverkades av Kiruna Grus och Stenförädling (KGS) under jord i Kirunagruvan.

Tabell 6-1 Betongrecept för Rolund Sörens försök (Rolund 1999).

Betongrecept	
	kg/m³
Ballast 0-8 mm	1254
Ballast 0-4 mm	158
Ballast 1-8 mm (torr material)	153
Cement	450
Silika	30
<i>(Viktprocent av C-halten)</i>	%
Vattenreducerande puzzolit 322N	0,3
Pumpförbättrande Rhebuild	0,2
Accelerator Vattenglas	Ca: 7,7
b	
V _{ct} = 0,45	

Mätning av den fria krympningen utfördes med en STAEGGER-mätare där ett 100 mm avstånd mellan mätpunkterna mättes och längdförändringen mellan olika mättillfällen kunde bestämmas. Mätpunkterna bestod av fastlimmade mättdubb på betongens yta. Mättdubben limmades på ovansida och undersida på de prismor som hade en endimensionell uttorkning dvs. de sidor som inte var förseglade med tejp. På det prov som var avsett för självuttorkning limmades mättdubben på motsvarande sida, men val av dessa hade ingen betydelse då provet var lika brett som högt. Limning av mättdubb med ett töjningsfritt lim följer inte SS 13 72 15 (SIS 1978), men är enligt författaren, Sören Rolund, en tillförlitlig metod (Rolund 1999).

Första mätningen av krympningen skedde två dygn efter sprutning av betongen och därefter 2-3 gånger per dag. Sammanställning av mätresultaten visas diagrammet figur 6-1.



Figur 6-1 Sammanställning av mätresultat i diagram (Rolund 1999).

6.2 Sara Aziz – ”Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong”

I sammanfattningen av Sara Aziz examensarbete står det: ”Såsom krympningsförsöket var upplagda kom de att visa endast den autogena krympning som ägde rum under ett dygn innan provkropparna vattenlagrades” (Aziz 2005, sid 2). Syftet med försöken i Aziz examensarbetet var att utreda för- och nackdelarna med plastfiberarmerad sprutbetong och att ge underlag för provning och värdering av plastfiberarmerad sprutbetong. En försöksserie gjordes med sprutbetong på 24 paneler varav 6 stycken användes för att mäta den fria krympningen hos sprutbetongen. Provmethod och arbetsutförande som användes beskrivs kortfattat här tillsammans med resultatet för detta.

De plastfibrer som utvärderades var Tunnelfibrer och Shogunfibrer. De båda fibrerna var raka och hade inga ändkrokar. Målet med en del av försöken var att undersöka vilka effekter olika fibermängder hade på krympningen.

I försöket sprutades totalt tjugofyra paneler som hade måtten 80x90x20 cm³ och var tillverkade av plywood med sprutbetong. Betongen som sprutades på panelerna bestod av sex olika blandningar som var fördelade på fyra paneler vardera. En panel av varje blandning användes för mätning av den fria krympningen.

Tabell 6-2 Parametrar vid provning av krympning

Blandning	Mängd sprutbetong	Typ av	Fiber-mängd	Fiber	Panel	Panel
Nr.	/blandning	plastfiber	kg/m ³	längd	nr.	mått
				mm		(cm)
1	2 m ³	Tunnel Fiber	8	42	1	90x80x20
2	2 m ³	Tunnel Fiber	10	42	5	90x80x20
3	2 m ³	Tunnel Fiber	12	42	12	90x80x20
4	2 m ³	Shogun Fiber	8	48	13	90x80x20
5	2 m ³	Shogun Fiber	10	48	17	90x80x20
6	2 m ³	Shogun Fiber	12	48	21	90x80x20

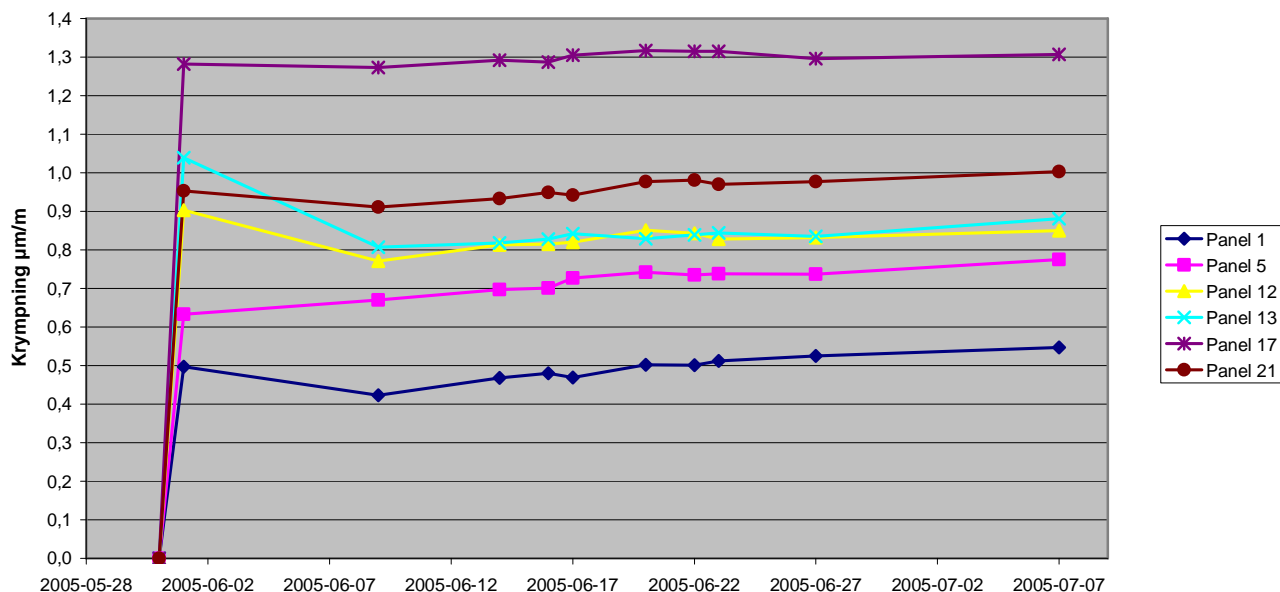
Betongen blandades vid Färdig Betong i Märsta och transporterades i roterbil till sprutplatsen (3 mil). Enligt rapporten gjordes noteringarna att de två första blandningarna med 8 kg/m³ samt 10 kg/m³ inblandade fibrer, var lättsprutade medan den tredje blandningen med 12 kg/m³ inblandade fibrer var fiberkoncentrationen väldigt hög och extra flytmedel fick tillsättas. Sprutningen av betongen skedde vinkelrätt mot panelernas yta med samma princip som vid sprutning av vanliga konstruktioner. Efter sprutning av panelerna i tunneln täcktes dessa med plast för att förhindra att snabb uttorkning skulle ske.

Tabell 6-3 Betongrecept för Aziz Saras försök (Aziz 2005).

Betongrecept	
	kg/m³
Betonggrus max stenstorlek 8 mm	1600 - 1700
Cement	475
(Viktprocent av C-halten)	%
Silika	4-5
Glenium 51	0,4
Accelerator Mapequick AF 2000	Tillsattes vid sprutning
Vct = 0,43	

På de sex provkroppar som var avsedda för mätning av den fria krympningen, monterades sex stycken mätdubb på ovansidan av varje panel så fort sprutbetongen hade härdat tillräckligt. Avståndet mellan dubbarna var 500 mm. Mätning av den fria krympningen utfördes med en "Mikroextensometer" som mäter förändring av avståndet mellan mätdubbarna. Tre stycken sträckor mättes på varje panel och medelvärdet av dessa har använts i diagrammet nedan. Den första avläsningen av avståndet mellan mätdubbarna utfördes omedelbart efter att betongen härdat tillräckligt och skedde enligt författaren, Sara Aziz, efter några timmar (Aziz 2005).

Efter sprutningen hade panelerna lagrats i tunneln under ett dygn och den första mätningen av krympningen utfördes dagen efter tillverkningen av panelerna. Efter den första mätningen dagen efter sprutningen transporterades panelerna till en annan plats där de lagrades i vattenbad under 8 dygn. Enligt Sara Aziz examensarbete: "När betongen ligger i vattenbad slutar den att krympa" (Aziz 2005). Krympningsmätningen pågick sedan till 37 dygn efter sprutning av panelerna.



Figur 6-2 Sammanställning av mätresultat i diagram (Aziz 2005).

7 Provuppställning

I detta kapitel beskrivs metoder för provning och värdering av sprutbetong samt det val av metod som gjordes för detta examensarbete.

7.1 Mål med försöket

Målet med försöken i detta examensarbete är att studera effekten av varierande intervall mellan vattenbegjutningar, på sprutbetongens tidiga krympning. Detta innebär att vattenbegjutningen skall efterlikna den fukthårdning som möjligt kan ske på sprutbetongen i en befintlig konstruktion.

7.2 Val av metod

Sprutbetong är ett svårdefinierat material och det finns standardiserade metoder för provning och värdering av detta material. Dessa metoder underlättar försäljning, köp och godkännande av arbeten i sprutbetong (CBI 1997).

När provning inte kan ske på redan sprutad konstruktion, som exempelvis mätning av den fria krympningen, sprutas istället betongen i lådor som har en färdig form eller som senare sågas till s.k. prismor som testerna istället utförs på. Sprutning av lådorna skall ske vinkelrätt mot

lådans bottenyta och under samma princip som vid sprutning av de aktuella konstruktionerna. Därefter sågas provkroppar för avsedda försök ut ur de sprutade lådorna. Vid provning av sprutbetong tagen ur uppsprutade lådor bör provningsresultaten bedömas med högre krav än vid provning på sprutad konstruktion, då det vid verkligt arbetsutförande normalt är större spridning i kvalitén och resultat (CBI 1997).

7.2.1 Sammanfattning av SS 13 72 20 (SS-EN 14488-1:2005)

De rekommendationer som finns i ”Stålfiberbetong för bergförstärkning – provning och värdering” (CBI 1997) för bedömning av uttorkningskrympning hos sprutbetong, är att följa de metoder som tillämpas för vanlig betong. Denna metod finns beskriven i SS 13 72 15 (SIS 1978) med undantag av provlådor som sprutas enligt SS 13 72 20 (SIS 2005).

Lådan skall vara formbeständig, vattentät och tillverkad av ett icke vattensugande material. Lådan skall sprutas inom 20° från vinkelrätt mot lådans bottenyta (om ingen annan orientering har specificerats). Vid sprutning skall samma utrustning, teknik, lager, tjocklek och sprutavstånd som vid det verkliga arbetet användas. Samma operatör skall också användas om möjligt. Betongen sprutas i ett eller flera skikt utan tidsuppehåll mellan skikten. I SS 13 72 20 skall lådans sidoytor luta 45° för att betongen skall packas bra i lådan. Denna punkt finns inte med i SS-EN 1448-1:2005 som är europastandarden och gäller som svensk standard. I SS-EN 1448-1:2005 anges det att för robotsprutade paneler bör dessa ha en dimension på 1 000 mm x 1 000 mm. Ett avstånd som är lika med formens djup räknas som förstörd och får inte tas med i provkropparna då dessa sågas ut.

Formarna skall täckas direkt efter sprutning för att fukthärdas och inte torka ut. Vid förflyttning skall stor försiktighet iakttas och förflyttning inom 18 timmar efter sprutning bör inte ske om inget annat anges (SIS 2005).

7.2.2 Sammanfattning av SS 13 72 15

I den svenska standarden SS 13 72 15 finns en metod beskriven för bedömning av hårdnande betongs krympning genom bestämning av krympningen hos 400 mm långa provkroppar. Denna metod tillämpas för vanlig betong där betongen vibreras vid gjutning. Betongen gjuts i formar med invändig längd = 400 ± 5 mm och invändig bredd och höjd 100 ± 5 mm.

Under ett dygn lagras formarna i $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatur och med fritt vatten på betongytan innan de avformas. Under följande 6 dygn skall provkropparna lagras i ett vattenbad med en vattentemperatur på $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Detta för att kraven på fri tillgång till vatten under de 7 första dygnens härdning skall uppfyllas. Därefter lagras provkropparna i ett konditioneringsutrymme med $20 \pm 1^\circ\text{C}$ temperatur och $50 \pm 2\%$ relativ luftfuktighet.

Enligt standarden kan mätning av krympningen på provkropparna ske med mätdonet mot mät dubbarna omedelbart efter det att de vid 7 dygns ålder tagits upp ur vattnet. Mätdonet skall vid mätning ha samma temperatur som provkropparna (SIS 1978).

7.2.3 Examensarbetets försöksmetod

I försöket kommer inte betongen vattenhärdas i 7 dygn enligt SS 13 72 15 (SIS 1978). Målet med försöket är också att göra ett större antal mätningar av krympningen under de 24 första timmarna efter sprutningen. Detta för få en tydlig kurva av den autogena krympningen.

Genom Banverket har vi, för att kunna genomföra sprutning av betong med samma förutsättningar som när s.k. dräner sprutas, fått tillgång till en tunnel som är under produktion på Botniabanan; Namntalltunneln med Skanska som entreprenör. Inga möjligheter fanns dock för att genomföra mätning i tunneln. Provkropparna kunde därför enbart sprutas i tunneln och var sedan tvungna att transporteras till en annan plats. För att kunna bibehålla ett stabilt klimat under hela mätperioden, fanns en möjlighet att transportera provkropparna till Luleå och de konditioneringsutrymmen som finns att tillgå på Luleås tekniska universitets laboratorium Complab. Provkropparna skulle där placeras i två separata konditioneringsutrymmen med olika relativ luftfuktighet men med samma temperatur, där betongen fukthärdas.

För att se skillnaden mellan varierande fukthärdning delas proverna in i fyra olika intervall av fukthärdning, som pågår under 7 dygn, i vardera rum enligt nedan:

- Vattning 2ggr per dag
- Vattning 1ggr per dag
- Vattning 1ggr varannan dag
- Ingen vattning
- Ett femte prov användes som referens. Detta prov placeras i vattenbad under de 7 dyggen enligt SS 13 72 15 (SIS 1978) och placeras därefter i de två konditioneringsutrymmena i samma miljö som de andra proverna.

Med anledning av den långa transporten från Örnsköldsvik till Luleå, har storleken på provkropparna valts på ett sådant sätt att 13 provkroppar kan transporteras med en vanlig personbil. Att tillverka provlådor enligt SS 13 72 20 (SIS 2005) och sedan såga ut provkroppar för mätning av krympning, är därför inte aktuellt på grund av den stora vikt som blir. En provkropp som inte sågas utan direkt tas ut ur den sprutade formen kommer därför att användas. Mätning kommer då att ske i den defekta zonen som inte får tas med då prover sågas ut enligt SS 13 72 20 (SIS 2005). Under transport till Luleå och LTU täcks proverna med byggfolie för att bibehålla fuktigheten i betongen under transporten då de under transporten kommer att utsättas för mycket varierande miljöer.

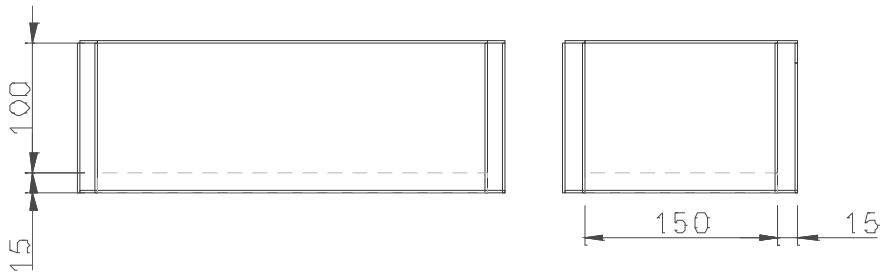
Då författarna till detta examensarbete inte följer de standardmetoder som finns för bedömning av sprutbetongens fria krympning, är metodbeskrivningen av mycket stor vikt i denna rapport. Detta i syfte att försöket skall kunna upprepas med samma förutsättningar som vid utförandet. Vald försöksmetod har ändå i så stor utsträckning som möjligt baserats på metodbeskrivningarna Betongprovning (SIS 1978) samt Provtagning av sprutbetong (SIS 2005), från Svensk Standard.

7.3 Utrustning

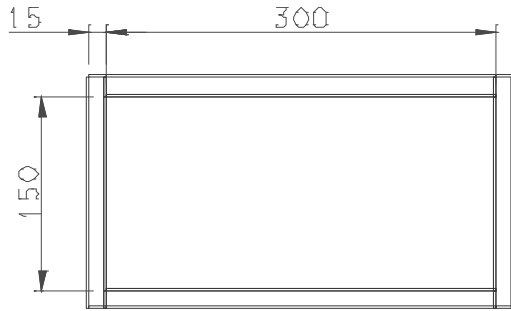
I detta avsnitt beskrivs i detalj utrustning och material som används under försöket för att undersöka effekten av varierande fukthärdning på den unga sprutbetongen.

7.3.1 Betong

Betongen sprutades i formar av vattenfast plywood. Formarna hade de invändiga måtten 30x15x10 cm³ (se fig. 7-1 och 7-2). Formarna var rektangulära och hade helt vertikala sidor. På grund av det höga trycket vid sprutning av betongen, placerades formarna i fyra separata ramar för att ge stabilitet och kunna fixera dessa under sprutningen.



Figur 7-1 Formen sett från ovan



Figur 7-2 Formen sett från ovan

Blandning av betong skedde i Skanskas betongfabrik på entreprenaden vid Namntalltunneln (Botniabanan). Betongen transporterades i roterbil till sprutplatsen i tunneln. Den betong som användes för försöken sprutades också samtidigt på paneler inne i tunneln, betongrecept enligt tabell 7-1 och bilaga 1. Det accelererande tillsatsmedlet som användes var Meyco SA 170, en alkalifri accelerator som tillsattes direkt i sprutmunstycket vid sprutning (för produktblad se bilaga 2). Den mängd som tillsatts vid munstycket var 4 % våtvikt men kunde i realiteten variera mellan 3-6 % våtvikt.

Tabell 7-1 Betongrecept (kg substans per kubikmeter)

Vct	kg/m ³
Ballast 0-4 mm	1540,5
Anläggningscement	500
Stålfiber (Dramix RC 65/35 BN)	58,0
Vatten	221,5
Tillsatsmedel Sikament 56	3,5

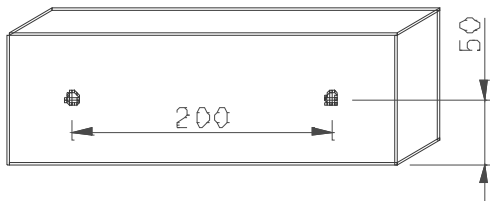
För att åstadkomma en ensidig uttorkningsriktning tejpades alla sidor utom den övre med självhäftande tätningsband efter avformning. De självhäftande tätningsbanden som användes vid försöket var av märket "Mataki Byggtejp" (se fig. 7-3).



Figur 7-3 Självhäftande tätningsband av märket "Mataki Byggtejp"

7.3.2 Mät-dubbar och mätklocka

Mät-dubbar av korrosionsbeständig metall limmades fast med ett töjningsfritt lim på betongens torra yta (Rolund 1999), två mät-dubbar för varje mätsträcka. Mät-dubben limmades på prismans långsida och mitt på denna sidan med 200 mm mellanrum.



Figur 7-4 Placering av mät-dubben på betongprovet

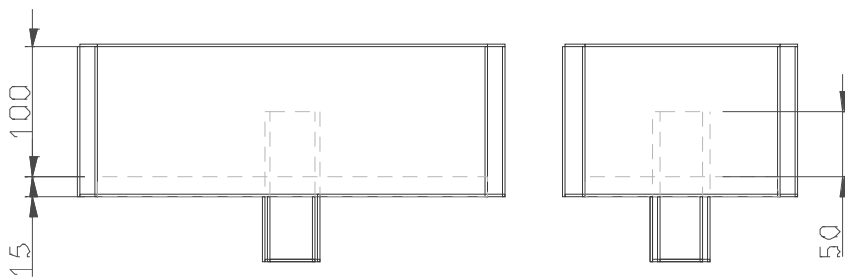
För mätning användes en extensometer med vilken avståndet mellan mät-dubben mäts och längdförändringen mellan olika mättillfällen bestäms. För detta försök användes en extensometer av märket Staeger, som mäter ett avstånd mellan mät-dubbarna på 200 mm. Längdförändringen kan då bestämmas med en noggrannhet på 1/1000 mm (Rolund 1999).



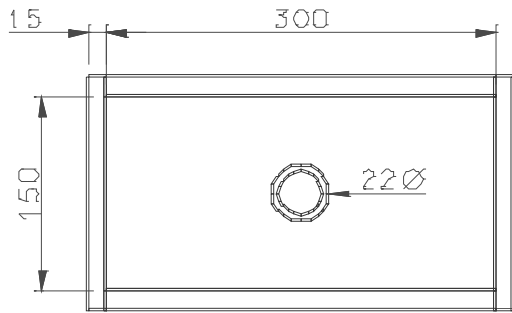
Figur 7-5 Extensometer (Saeger) för mätning av prismornas krympning

7.3.3 Relativ fuktighet

Den relativa fuktigheten i en punkt på en betongkonstruktion kan bestämmas genom mätning av relativa fuktigheten på uttagna provbitar eller i gjutna eller borrade hål. I detta försök gjordes mätningen av relativ fuktighet i gjutna hål på prismorna. Därför förbereddes tre formar med ett s.k. trykrör (RH-plaströr). Tre formar valdes med anledning av att vid tidpunkten för försöket fanns det endast tillgång till tre stycken givare för mätning av relativ fuktighet. Plaströret placerades på ekvivalent djup med en plugg för att betong inte skulle tränga in i denna under appliceringen, se figur 7-6 och 7-7.



Figur 7-6 Form med plaströr sett från sidan.



Figur 7-7 Form med plaströr sett från ovan.

Givare för mätning av relativ fuktighet installerades då prismorna placerades i klimatrummen där de också kunde kalibreras.



Figur 7-8 Givare och digital enhet för mätning av relativ fuktighet.

7.3.4 Konditioneringsutrymme

De sprutade proverna placerades i två konditioneringsutrymmen med olika relativ luftfuktighet men med samma temperatur. Klimatutrymmena som utnyttjades för försöket finns på Luleås tekniska universitets Complab. I det ena klimatutrymmet eftersträvades en så hög relativ luftfuktighet som möjligt, men mätningar visade att utrustningen arbetade i cykler och hade ett medelvärde på $78 \pm 10 \%$. Detta är acceptabelt då vi i det andra klimatutrymmet hade en relativ luftfuktighet på $62 \pm 2 \%$ och därför hade en tydlig differens mellan de båda. Temperaturen i de båda rummen var $20 \pm 1^\circ\text{C}$ för att kunna jämföras sinsemellan (se fig 7-9).



Figur 7-9 Temperaturgivare för de två klimatrutorna.

8 Utförande

I detta kapitel beskrivs tillvägagångssättet för försöket i kronologisk ordning. Tillverkning av provkropparna i Namntalltunneln, avformning, limning av mätdubb och tejping med diffusionstät byggtejp beskrivs. Därefter transporterades prismorna och placerades i två klimatrutur på Luleås tekniska universitet, där vattenbegjutning av prismorna och mätning av krympningen sedan kunde påbörjades.

8.1 Provkroppstillverkning

1. Tillverkning av provkropparna genom sprutning av formarna skedde den 12 juni 2007 klockan 09:00 på Botniabanan i Namntalltunneln med Skanska som entreprenör. En provram ställdes mot väggen (se fig 8-1) varpå den fylldes med betong från sprutrobotens horisontella stråle. När formarna sprutats skrapades överskott av betongen bort för att eftersträva så enhetliga prismor som möjligt. Detta repeterades tills det att alla fyra ramar (14 formar) var fyllda med sprutbetong. Klimatet i tunneln, vid sprutning, hade en temperatur på 10°C och 70 % relativ luftfuktighet. Sprutningen pågick mellan 09:00 och ca 10:00.



Figur 8-1 Provram med 4 formar, som lutas mot bergvägg.

2. Efter tillverkning transporterades provkropparna i formarna på pickups till en verkstad ovan jord. Denna transport direkt efter sprutningen var nödvändig på grund av platsbrist i tunneln och att pågående verksamhet annars skulle störas. Proverna ställdes på golvet i ett verkstadstält (se fig.8-2) där de hölls inplastade i 3 timmar, fram till klockan 13:00, för att härda innan avformning. Klimatet under byggplasten hade en temperatur på 20°C och 85 % relativ fuktighet och kan därför anses vara skyddade mot självuttorkning.



Figur 8-2 Provarmar på verkstadsgolvet.

3. När betongens styvhet var tillfredställande påbörjades avformning, genom att lossa alla skruvar och försiktigt ta bort plywoodskivorna från betongprovet. Mät-dubbar limmades sedan på den långsidan som var överst vid sprutning, eftersom denna hade bäst yta att limma på. När limmet härdat täcktes/tejpades alla sidor förutom ovansidan med tätningsband. Ett rektangulärt betongprov med en ensidig uttorkningsriktning hade då skapats för mätning av krympning. Proverna var under denna period placerade i en temperatur på 20°C medan den relativa fuktigheten varierade, från 80 % under byggplasten till 30 % under arbetet med avformning, limning av mät-dubb och tejpning av tätningsband. Varje prov vistades i den 30 % relativ luftfuktigheten uppskattningsvis 30 min. Detta dokumenterades för att kunna beaktas vid analysen.

4. Proverna numrerades slumpvis enligt fig 8-3 varpå alla prover mättes och fick ett nollvärde. Mellan nollmätningen klockan 15:30 och första mätningen klockan 16:00 täcktes proverna inte med plast. Därefter gjordes mätningar varje halvtimme fram till klockan 18:00, för att kunna få en tydlig bild av den kraftiga krympningen i den unga betongen. Mellan dessa mätningar låg proven under byggplast och den relativa luftfuktigheten var under plasten 80 % och i omgivande luft 30 %.



Figur 8-3 Slumpvis numrering av prover.

5. För att kunna placera proverna i klimatrumsen på Luleå tekniska universitet transporterades dessa med personbil mellan tunneln och Luleå. Proverna placerades i nummerordning i bagaget enligt figur 8-4 och täcktes sedan med byggplast. Bilens luftkonditionering var inställd på 20°C, och relativa fuktigheten under plasten var 80 %. Mätningar utfördes med 2 timmars mellanrum under resan som pågick mellan klockan 18:00 och 24:00.



Figur 8-4 Provernas placering i personbilen för transport till Luleå

6. Vid ankomst till Luleå fördes proverna ner till de två klimatrumsen som färdigställda. Första provet i varje serie (90-1 och 65-1) sänktes ner i ett vattenbad, resterande prover placerades i rummen på ett sådant avstånd att de inte skulle inverka på varandra under härdningen. När de slutligen hade placerats i konditioneringsutrymmena efter transport gjordes ytterligare en nollmätning klockan 24:00 (15 timmar efter tillverkning av provkropparna) i detta klimat. Detta gjordes för att temperaturskillnader orsakar en differens i mätresultaten pga. att metallen i klockan är temperaturkänslig och får en längdförändring då den placerades i konditioneringsutrymmena.

8.2 Mätning av krympning

8.2.1 Fukthärdning

Proverna vattenhärdades genom att vatten penslades på ytan med en vanlig målarpensel tills hela ytan var fuktig. Det schema som bestämdes för vattenbegjutningen visas i tabell 8-1 och 8-2 nedan.

Tabell 8-1 Intervall för vattenbegjutning av prismor i klimatutrymmet med RH 78%

Prov nr:	Dag 1	Dag 2		Dag 3		Dag 4		Dag 5		Dag 6		Dag 7		Dag 8	
	09:30	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21
1	Gjutning	Vattenbad		→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	STOPP	
2	"	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3	"	•		•		•		•		•		•		•	
4	"	•				•				•				•	
5	"														
6	"														

• = penslad med vatten

Tabell 8-2 Intervall för vattenbegjutning av prismor i klimatutrymmet med RH 62%

Prov:	Dag 1	Dag 2		Dag 3		Dag 4		Dag 5		Dag 6		Dag 7		Dag 8	
	09:30	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21	09	21
1	Gjutning	Vattenbad		→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	STOPP	
2	"	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3	"	•		•		•		•		•		•		•	
4	"	•				•				•				•	
5	"														
6	"														
7	"	•		•		•		•		•		•		•	

• = penslad med vatten

8.2.2 Mätning

Mätning utfördes kontinuerligt, varje halvtimme och varannan timme under transport, från det att prismorna hade avformats på byggarbetsplatsen tills att de hade placerats i konditioneringsutrymmena. Under denna tidsperiod var klimatet mycket varierande. Nollmätningen gjordes 6 timmar efter sprutning av formarna.

I konditioneringsutrymmet och under de sju första dyggen i dessa, då vattenbegjutning av prismorna skedde, bestämdes ett fast schema för mätning av krympningen. Mätning av krympningen utfördes tre gånger per dag. Den första mätningen utfördes på morgonen klockan 09:00 då proven också fukthärdades, den andra klockan 15:00 och den sista utfördes klockan 21:00 på kvällen då aktuella prover också fukthärdades igen.

När vattenbegjutningen hade avslutats efter de sju dyggen i konditioneringsutrymmena (2007-06-19) gjordes under 10 dygn en mätning per dag av krympningen (fram t.o.m. 2007-06-29). Syftet med denna mätning var att se hur kraftig krympningen blir direkt efter att vattenbegjutningen avslutas. För att se effekten av vattenbegjutningen på längre sikt gjordes ytterligare två mätningar, den ena 2007-07-21 och den sista 2007-08-31 (då försöket också avslutades). Mätningen avslutades efter 81 dygn då proverna också togs bort även om

hydratationen och därmed krympningen inte hade nått sin slutliga nivå, vilket kan ta månader eller år beroende på förhållanden. Målet med försöken i detta examensarbete var att studera effekten av varierande intervall mellan fukthärdningar på sprutbetongens tidiga krympning och därför avslutades försöket efter 81 dygn.

Mätning har utförts av oss båda examensarbetare och oftast varannan gång, detta kan därför ge en ”hackig” eller ojämn graf på grund av personliga variationer vid mätning. En standardmetod för hantering av mätinstrumentet och utförande vid mätning utformades ändå för att minska variationerna. Det bestämdes att instrumentets bakre fäste skulle placeras på den första dubben samtidigt som klockan lades i fritt läge. När sedan den främre änden hade placerats på den andra dubben låstes klockan. Klockan skulle låsas och friläggas tre gånger för att se att ett och samma värde gavs.

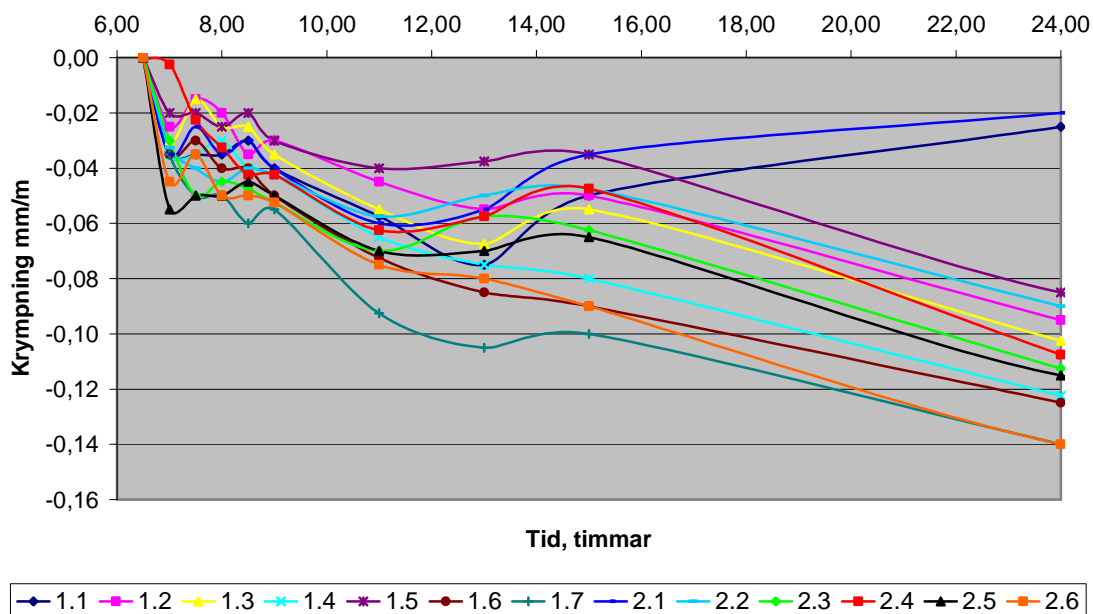
9 Resultat

I detta kapitel presenteras de resultat som försöket med varierande fukthärdning har lett till samt en jämförelse med resultat från de tidigare utförda försöken som beskrivits i kapitel 6. Resultaten från försöket består av två delar, det ena är krympning av betongen och den andra är relativa fuktigheten i betongen. Resultatet av betongens krympning har delats upp i den tidiga krympningen (de första 24 timmarna), krympningen vid vattenbegjutning samt den totala krympningen under hela försöket. Skillnader mellan krympningen i de olika relativa luftfuktigheterna studeras också.

9.1 Krympning

9.1.1 Sprutbetongens krympning under de första 24 timmarna efter sprutning.

I detta avsnitt kommer resultatet från krympningsmätningarna av sprutbetongprismorna under de 24 första timmarna efter gjutning (sprutning) att presenteras. Sprutbetongens tidiga krympning kommer därför att vara i fokus.



Figur 9-1 Den tidiga krympningen i den unga sprutbetongen

Diagrammet ovan visar betongens krympning under de 24 första timmarna efter det att gjutning (sprutning) av betongen hade skett. 6,5 timme efter betongsprutningen gjordes den första mätningen på betongprismorna i verkstadstältet i Namntalltunneln. Klockan 09:00 dagen efter gjordes den första mätning av krympningen i konditioneringsutrymmer och det hade då gått 24 timmar sedan sprutningen.

I början av försöket uppvisas en mycket kraftig variation mellan krympningarna, framförallt i mätserie 1 med provkropparna placerade i RH 62 %. Detta skulle kunna kopplas till hantering av provkropparna vid tillverkning, avformning och limning av mätdubben.

9.1.1.1 Den plastiska krympningen

Då den första mätningen skedde 6,5 timmer efter det att betongen sprutades i formarna, har ingen mätning skett i den färskna betongen. Den första mätningen på betongprismorna bedöms enbart ha skett i den unga betongen, se figur 4-1 i kapitel 4 (Krympning).

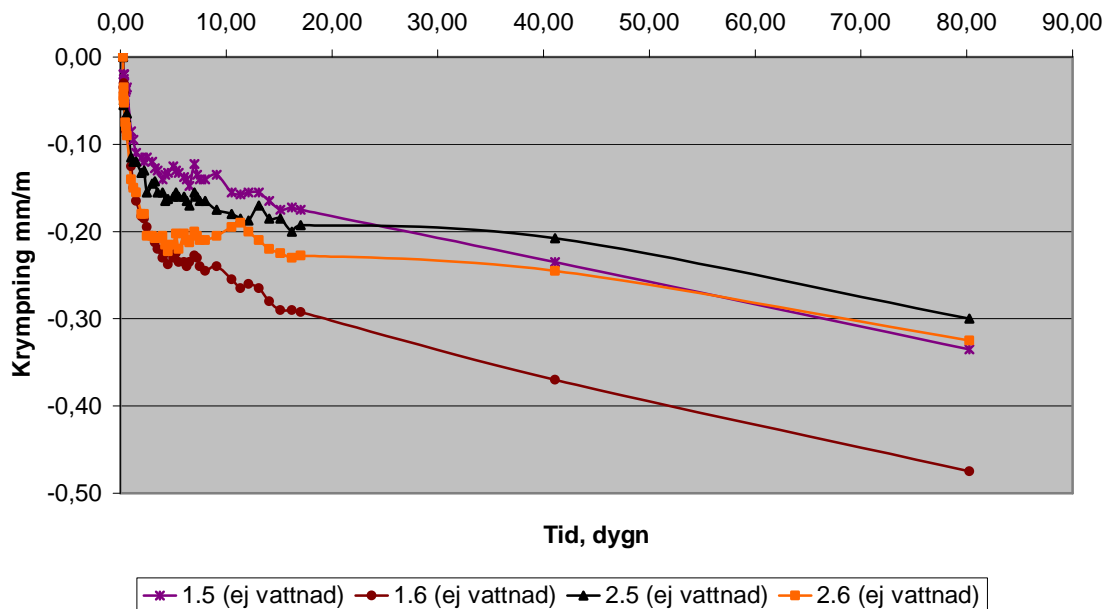
De tre individuella faktorerna som påverkar den plastiska krympningens storlek är sättning i materialet, avdunstning (uttorkning) och autogen krympning (kemisk krympning) (Olek 2003). Några faktorer som kan ha påverkat den plastiska krympningen i detta försök är att provramarna transporterades på ett bilflak direkt efter sprutning upp ur tunneln och då utsattes för kraftig skakning. Den största plastiska krympningen har antagligen skett under denna tidsperiod då tillstyvnadsacceleratorerna redan tidigt bildar en stark struktur i betongen.

Alla betongprismorna kunde inte avformas och mätdubbarna kunde inte limmas samtidigt utan utfördes under två timmar. Även tiden det tog att limma mätdubbarna varierade något och proverna utsattes då för torrare luft jämfört med när de var placerade under plastfolien. Den plastiska krympning som kan ha skett i betongprismorna har antagligen redan skett innan mätningarna påbörjades och syns då inte i mätresultaten och kan därmed inte styrkas.

9.1.1.2 Den tidiga krympningen i förhållande till den totala krympningen under försöket

Då klimatet under de första timmarna inte var extremt utan den relativa luftfuktigheten pendlade runt RH 75 %, kan detta mätresultat jämföras med den totala krympningen som har skett efter 81 dygn. Denna jämförelse är tänkt att belysa storleken av krympning som sker tidigt i sprutbetongen. Samma krympning som tidigare presenterade rapporter har visat sig vara mycket kraftig (Aziz 2005).

Den absoluta krympningen under det första dygnet har en väldigt stor spridning; från 0,08 mm/m till 0,14 mm/m. Absolutbeloppet av den totala krympningen under hela försöket hos betongprismor som inte har vatten- eller fukthärdats under de 80 dyggen, varierar mellan 0,30 till 0,50 mm/m. En jämförelse med värdena från det första dygnet visar att mellan 25 % och 50 % av krympningen sker redan det första dygnet.



Figur 9-2 Den totala krympningen under försöket hos betongprismor som inte har vattenhärdats.

Den del av krympningen som har skett under det första dygnet kan vara ännu större då första mätningen i försöket började först 6,5 timmer efter gjutning (sprutning) av betongen och den plastiska krympningen då antagligen redan hade skett. Den stora variationen mellan största och minsta krympningen vid en viss tidpunkt kan bero på en mängd olika faktorer som vi inte kan förklara här. Det troligaste är ändå att under sprutningen av betongen packades den olika i formarna och den något varierande packningsgraden kan då ha orsakat den varierande krympningen (se fig. 9-3).



Figur 9-3 Ett betongprisma fotograferat från två olika sidor.

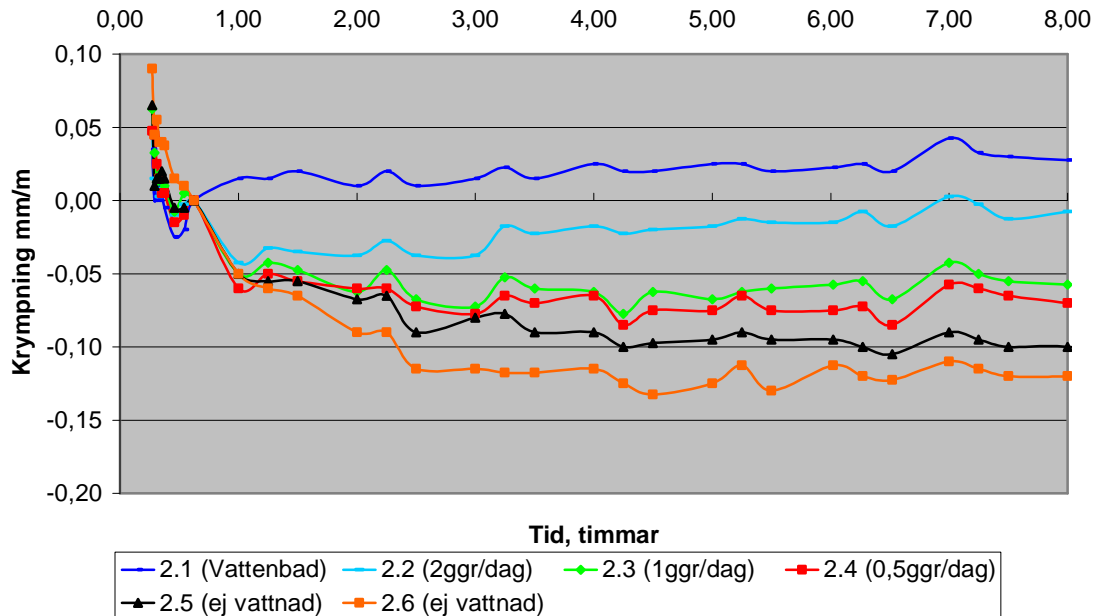
Den höga relativa luftfuktigheten som varade under de 24 första timmarna är avdunstning från betongytan då proverna hade täckts med byggfolie. Detta visar att den krympning som skett under det första dygnet är av arten uttorkningskrympning.

9.1.2 Krympningen vid vattenbegjutning

I detta avsnitt kommer resultatet från vattenbegjutning av sprutbetongprismorna i konditioneringsutrymmena att redovisas. Effekten av vattenbegjutning på sprutbetongen kommer därför att ligga i fokus.

Diagrammen nedan visar betongens krympning under de 8 första dygnen efter det att sprutning av betongen hade skett, med nollvärdet vid tidpunkten då proverna placerades i konditioneringsutrymmena. Nollvärdet för diagrammen valdes enligt ovan med syftet att tydliggöra effekten av vattenbegjutning på sprutbetongen, då den absoluta krympningen varierade stort under det första dygnet mellan sprutbetongprismorna och skulle kunna dölja den sökta effekten. Nollvärdet har satts till 9 timmar innan vattenbegjutningen av sprutbetongprismorna påbörjades och samtidigt som prov nummer 1.1 och 2.1 lades i vattenbad.

9.1.2.1 78 % relativ luftfuktighet.



Figur 9-4 Krympningen vid fukthärdning i RH 78 %.

Diagrammet ovan visar proverna i konditioneringsutrymmet med RH 78 %. Det framgår tydligt i diagrammet ovan att prov 2.1 som lades i vattenbad får en omedelbar svällning samtidigt som de övriga proverna fortsätter att krympa.

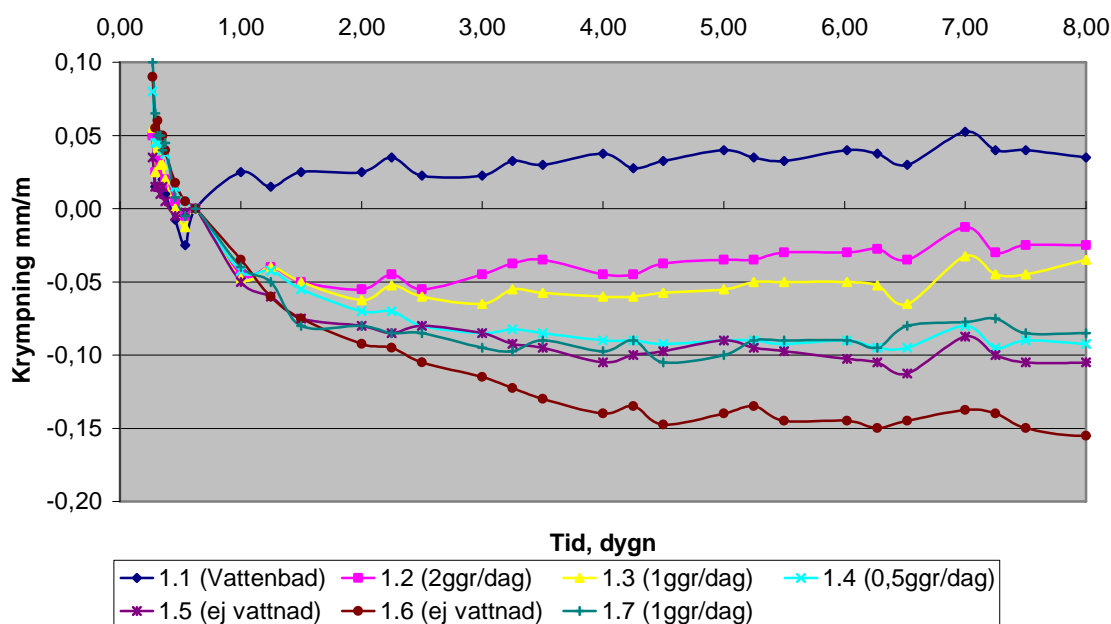
Absolutbeloppet av svällningen är inte lika stor som den för krympningen hos de andra proverna under samma tidsperiod. Absolutbeloppet av krympningen för proverna 2.5 och 2.6 (som inte vattenbegjuts) har blivit så kraftig som 0,12 mm/m fram till det 3:e dygnet efter betongsprutningen då den planar ut något.

Diagrammet ger oss en tydlig bild av vattenbegjutningens effekt vid RH 78 %. Linjerna som representerar de olika proverna ställer sig i ordningsföljd beroende på i vilken grad de har vattenbegjutits, från ingen vattenbegjutning alls till 2 gånger per dag och slutligen provet som ligger i vattenbad och får fritt tillgång till vatten. Detta försök visar bland annat att vattenbegjutning 1 gång per dygn i RH 78 %, ger hälften så liten krympning under perioden för vattenbegjutning jämfört med att inte vattenbegjuta alls (0,06 mm/m jämfört med 0,10 och 0,12 mm/m).

Försöket visar också att om provet som har behandlats enligt den svenska standarden (SIS 1978) för denna typ av försök, jämförs med ett liknande prov som i stället har vattenbegjutits 1 gång per dygn i RH 78 %, har den sista fått en krympning med ett absolutbelopp (0,06 mm/m) motsvarande 2 gånger storleken på den svällning som provet enligt den svenska standarden hade fått (0,03 mm/m).

Den plötsliga svällningen av alla prover vid dygn 7 beror på en felmätning av den mall som alltid kontrollerades innan mätning, vilket påverkade alla provernas resultat.

9.1.2.2 62 % relativ luftfuktighet.



Figur 9-5 Krympningen vid fukthårdning i RH 62 %.

Diagrammet ovan visar proverna i konditioneringsutrymmet med RH 62 %.

Prov 1.1 som lades i vattenbad får en omedelbar svällning samtidigt som de övriga proverna i konditioneringsutrymmet med RH 62 %, fortsätter att krympa. Nästan samtliga prover har ett liknande förlopp som i figur 9-4 med undantaget att krympningen hos proverna 1.4, 1.5 och 1.7 inte skiljer sig betydande från varandra, även om de vattenbegjutits olika.

Diagrammet i figur 9-5 ger en tydlig bild av vattenbegjutningens effekt vid RH 62 %, även om spridningen varierar och skillnaderna mellan vissa prover är små. Linjerna som representerar de olika proverna ställer sig i ordningsföljd beroende på till vilken grad de har vattenbegjutits, från ingen vattenbegjutning alls till 2 gånger per dag och slutligen provet som ligger i vattenbad och har fått fri tillgång till vatten.

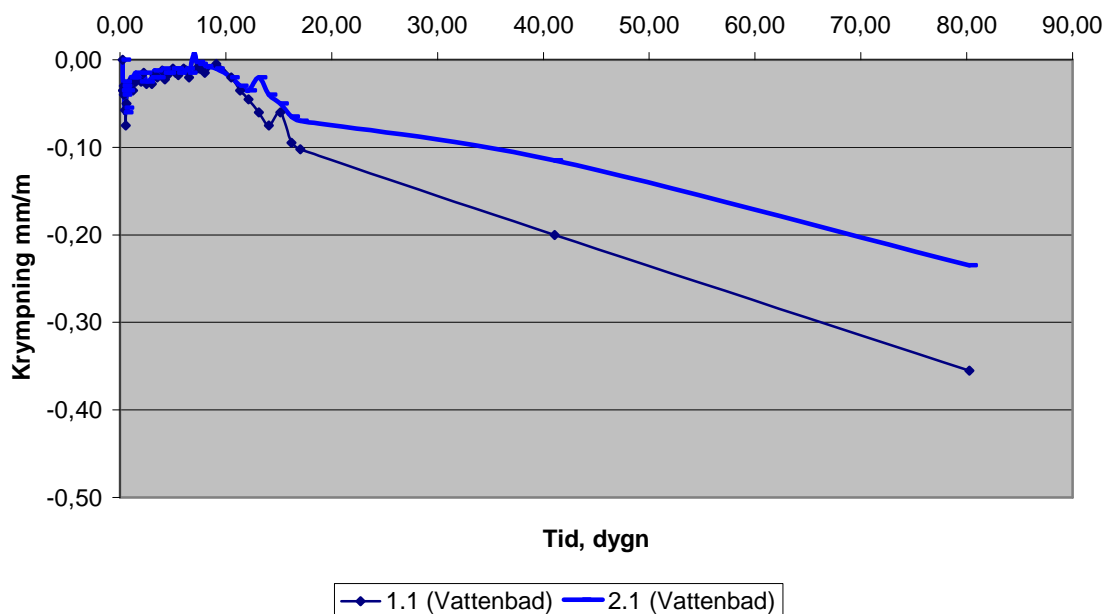
Försöket visar också att om provet som har behandlats enligt den svenska standarden (SIS 1978) för denna typ av försök, jämförs med ett liknande prov som istället har vattenbegjutits 1 gång per dygn i RH 62 %, har den sista fått en krympning med ett absolutbelopp (0,04 mm/m) vilket är motsvarande den svällning som provet enligt den svenska standarden hade fått (0,04 mm/m).

Jämförs provet som vattenbegjutits 1 gång per dag med proven som inte har vattenbegjutits har de sista krympt 3 till 4 gånger så mycket (0,04 mm/m jämfört med 0,11 och 0,16 mm/m) som de första.

Den plötsliga svällningen på alla prover vid dygn 7 beror även här på en felmätning av den mall som alltid kontrollerades innan mätning, vilket påverkade alla provernas resultat.

9.1.3 Relativ luftfuktighet

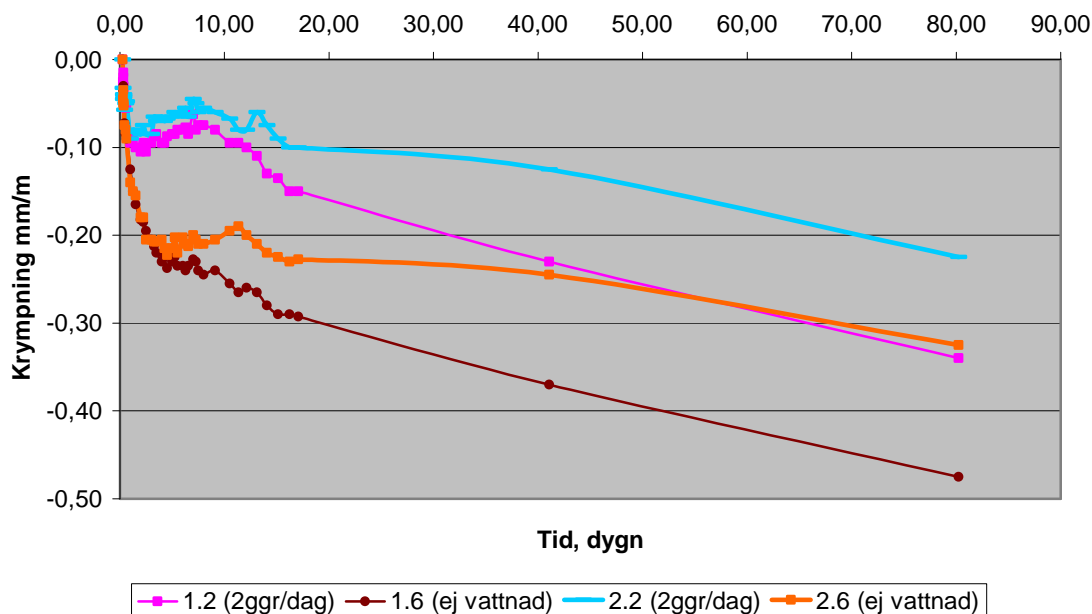
I detta avsnitt kommer resultatet från mätning av krympningen på sprutbetongen vid olika relativ luftfuktighet att redovisas. Effekten av olika relativ luftfuktighet på sprutbetongens yta kommer därför att ligga i fokus.



Figur 9-6 Jämförelse mellan krympning i olika relativ luftfuktighet hos sprutbetong som inte har vattenbegjutits

I diagrammet ovan syns graferna över mätresultaten från de två proverna som har legat i vattenbad i totalt 7 dygn, från dygn 1 till dygn 8 enligt den svenska standarden (SIS 1978). Därefter har de placerats i respektive konditioneringsutrymmen med RH 78 % samt RH 62 %. Graferna visar att de båda proverna sväller till följd av den fria tillgången på vatten. Båda proverna följer samma mönster fram till det 8:e dygnet då de tas upp ur vattnet.

Krympningen av betongprismorna efter de har placerats i konditioneringsutrymmena skiljer sig åt mellan de två proven. Provet som har placerats i RH 62 % krymper mycket kraftigare jämfört med det andra provet som placerades i RH 78 %; det första provet har krympt 0,36 mm/m jämfört med det andra som har krympt 0,24 mm/m. Provet i RH 62 % har alltså krympt 50 % mer jämfört med provet som hade placerats i RH 78 % under en period av 72 dygn efter det att de båda proverna hade tagits ur vattenbadet.



Figur 9-7 Jämförelse mellan krympning en i olika relativ luftfuktighet hos sprutbetong.

I diagrammet 9-6 syns tydligt effekten den relativa luftfuktigheten har på krympningen. Proverna 1.2 och 1.6 som har varit placerade i RH 62 % har båda en större absolut krympning än proverna 2.2 och 2.6 som har varit placerade i RH 78 %. Vid lägre relativ luftfuktighet sker det en högre uttorkningskrympning, en större avdunstning till luften på grund av större skillnad mellan betongens relativa fuktighet och luftens.

Tabell 9-1 Sammanställning av krympningens absolutvärden vid vissa tidpunkter

Prov nummer	Vattenbegjutning	Krympning vid dygn 17	Krympning vid dygn 41	Krympning vid dygn 80
1.2	(2ggr/dag)	0,15 mm/m	0,23 mm/m	0,34 mm/m
1.6	(ej vattnad)	0,29 mm/m	0,37 mm/m	0,48 mm/m
2.2	(2ggr/dag)	0,10 mm/m	0,13 mm/m	0,23 mm/m
2.6	(ej vattnad)	0,23 mm/m	0,25 mm/m	0,33 mm/m

Tabell 9-2 Differens mellan proverna 1.2 och 1.6

Prov serie	Differens vid dygn 17	Differens vid dygn 41	Differens vid dygn 80
1.	0,14 mm/m	0,14 mm/m	0,14 mm/m

Tabell 9-3 Differens mellan proverna 2.2 och 2.6

Prov serie	Differens vid dygn 17	Differens vid dygn 41	Differens vid dygn 80
2.	0,13 mm/m	0,12 mm/m	0,10 mm/m

Differensen i tabell 9-2 och 9-3 visar att vattenbegjutningen har effekt. För att kunna avgöra om vattenbegjutningen har någon större effekt i lägre relativ luftfuktighet men vid samma temperatur, jämförs förhållandet av differensen mellan de två proverna i samma luftfuktighet

och den absoluta krympningen för provet som inte har vattenbegjutits för samma serie med varandra (se tabell 9-4 och 9-5).

Tabell 9-4 Förhållandet mellan proven i provserie 1 i RH 62 %

Prov serie	Förhållandet vid dygn 17	Förhållandet vid dygn 41	Förhållandet vid dygn 80
1.	48 %	38 %	29 %

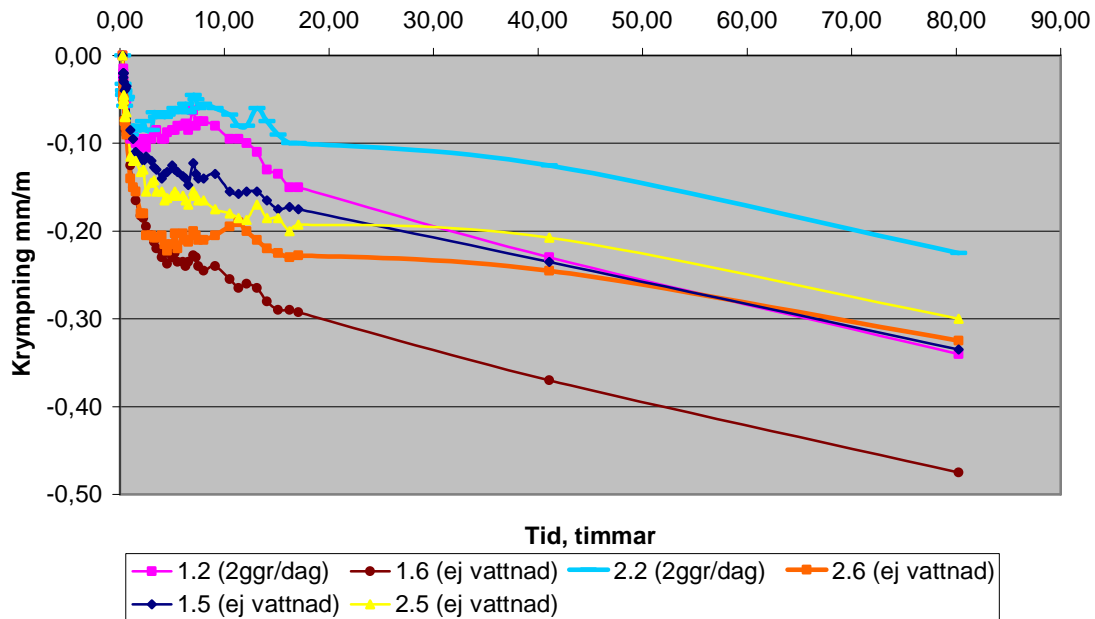
Tabell 9-5 Förhållandet mellan proven i provserie 2 i RH 78 %

Prov serie	Förhållandet vid dygn 17	Förhållandet vid dygn 41	Förhållandet vid dygn 80
2.	57 %	48 %	30 %

Om förhållandet hade varit lika hade det indikerat att vattenbegjutningen inte har någon effekt på krympningen i olika relativa luftfuktigheter (med lägre luftfuktighet hade differensen i krympning blivit större). Nu är förhållandet mellan differensen och den absoluta krympningen större vid högre relativ luftfuktighet vilket betyder att vattenbegjutningen har större effekt vid lägre relativ luftfuktighet.

Den absoluta krympningen hos sprutbetongen är störst i den lägre relativa luftfuktigheten oavsett om sprutbetongen är vattenbegjuten eller inte. Detta betyder att vattenbegjutning under sju dygn inte kan ersätta en högre relativ luftfuktighet med avseende på sprutbetongens krympning. Vattenbegjutningen kan dock minska effekten av lägre luftfuktighet men kommer enligt detta försök inte att minska krympningen till samma nivå som vid högre relativ luftfuktighet.

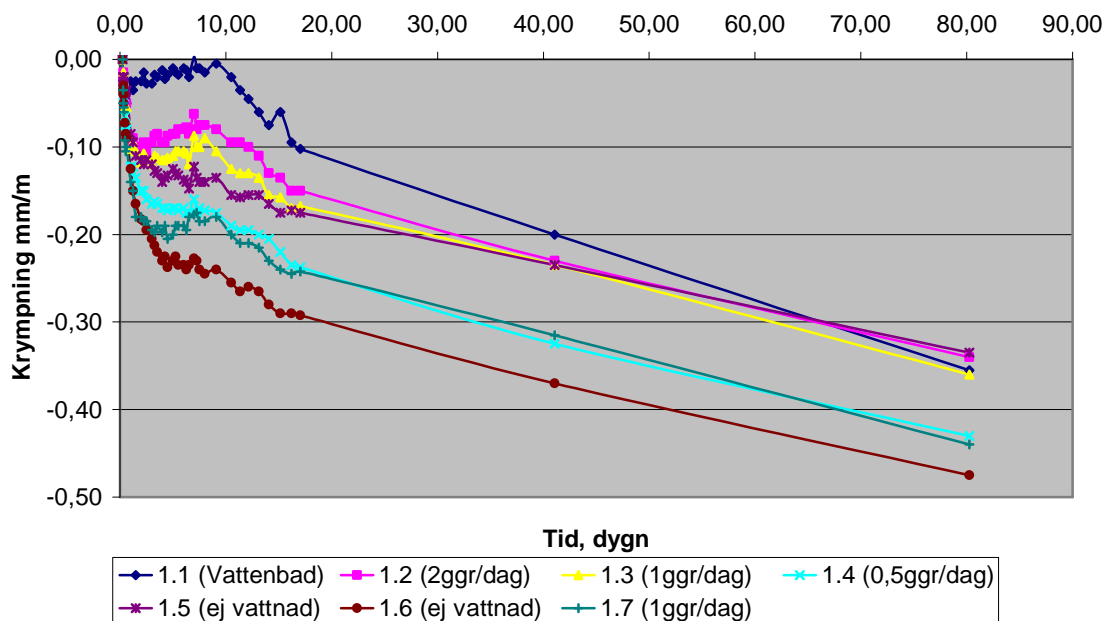
Det måste också nämnas att försöket har gett mätresultat som inte visar lika tydlig effekt när det gäller vattenbegjutningens effekt vid olika luftfuktigheter som ovan, se figur 9-8. Speciellt gäller detta sprutbetongprovet 1.5 som har fått mycket lägre krympning än sprutbetongprov 1.6, nästan lika liten som krympningen av provet som har vattenbegjutits 2 ggr/dygn. Denna uteliggare i resultatet syns även i figur 9-1 samt figur 9-2 ovan.



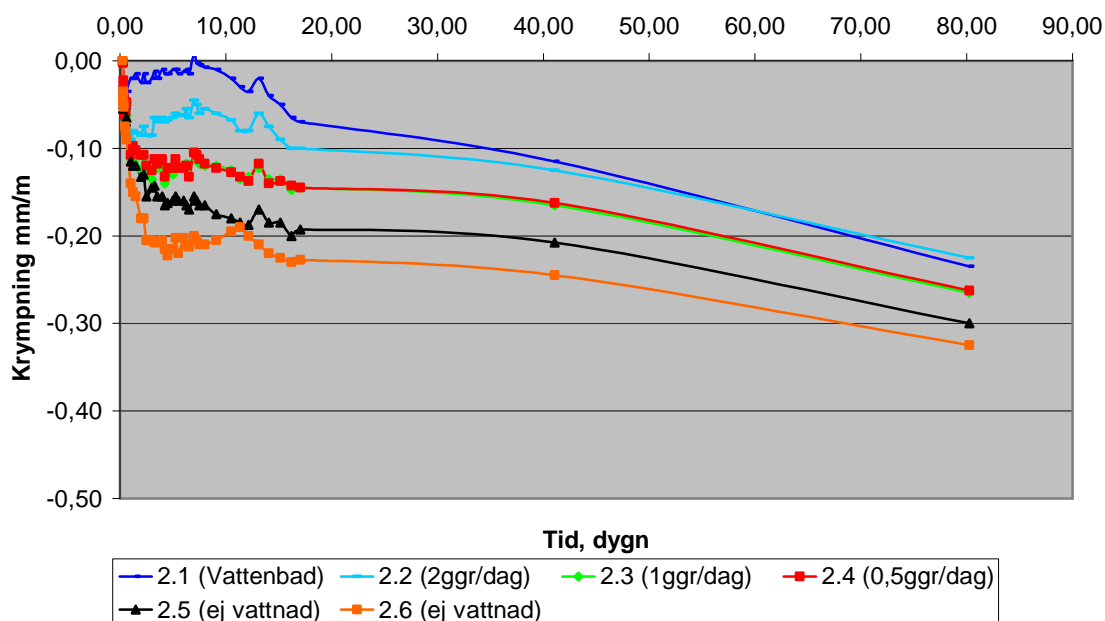
Figur 9-8 Jämförelse mellan krympningarna i olika relativ luftfuktighet hos samtliga betongprismor som inte har vattenbegjutits.

9.1.4 Sammanställning av alla mätdata från försöket

I detta avsnitt kommer resultatet från mätning under hela försöket av krympningen på sprutbetongen att redovisas grafiskt. Resultatet omfattar därför både den tidiga krympningen, vattenbegjutningen samt uttorkningskrympningen.



Figur 9-9 Totala krympningen hos sprutbetongen under försöket i RH 62 %



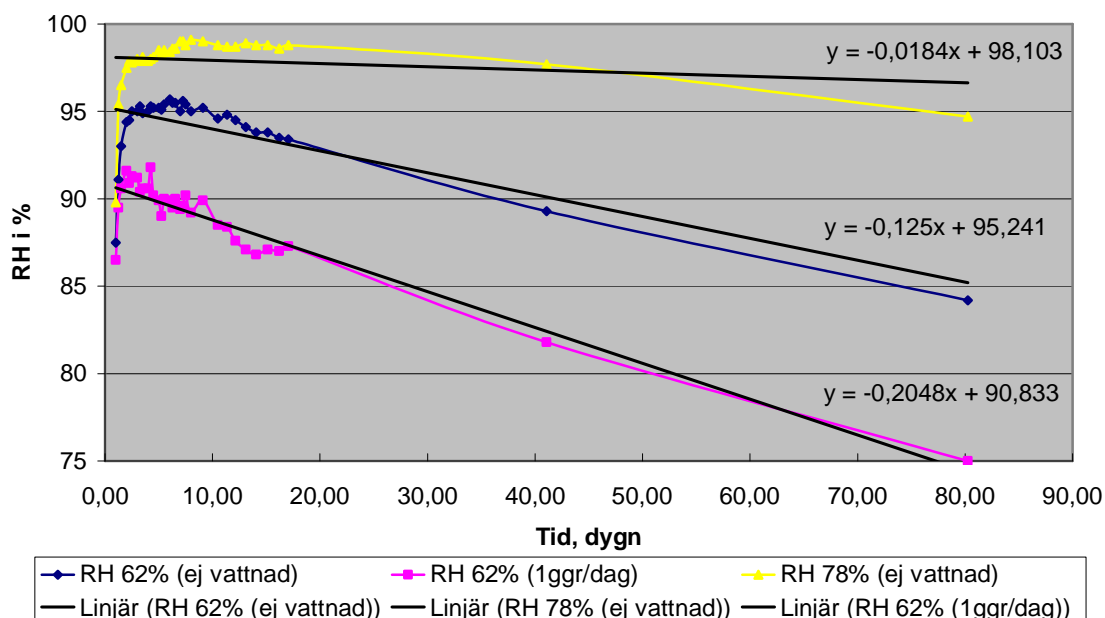
Figur 9-10 Totala krympningen hos sprutbetongen under försöket i RH 78 %

Sammanfattningsvis syns det att den tidiga krympningen i början av försöket är mycket stor och har därför störst påverkan på sprutbetongens slutgiltiga krympning. De flesta betongprismorna har ett förväntat resultat och utseende med minsta krympning vid vattenbegjutning och största krympningen vid ingen vattenbegjutning. Det finns ändå resultat som avviker från de övriga speciellt sprutbetongproven 1.5 samt 1.7.

I stora drag ställer sig graferna över krympningen för de olika provkropparna i ordningsföljd efter hur mycket de har vattenbegjutits. Vattenbegjutningen påverkar med andra ord krympningens storlek men det är den relativa luftfuktigheten som har den största betydelsen då vattenbegjutning under sju dygn inte kan ersätta den vattenförlust som avdunstar till luften via uttorkning. Krympning sker då omgivande luft inte är vattenmättad ($RH \leq 95\%$) och sprutbetongen utsätts för uttorkningskrympning.

9.2 Relativa fuktigheten i betongen under försöket

I detta avsnitt kommer resultatet från mätning av den relativa fuktigheten i betongen under försöket att presenteras. Syftet är att studera om minskningen av den relativa fuktigheten i betongen skiljer sig åt från de olika konditioneringsutrymmena med de olika relativa luftfuktigheterna. Syftet är också att studera om det är någon skillnad i minskningen av den relativa fuktigheten i betongen vid vattenbegjutning eller inte.



Figur 9-4 Den relativa fuktigheten i sprutbetongen under försöket

På grund av att ingen kalibrering gjordes av instrumenten varierar de en del i sitt absoluta värde. Detta värde får bortses ifrån då resultatet studeras. Det intressanta är att se vilken lutning de har då proven har behandlats olika. Ett prov har placerats i RH 62 % och inte vattenbegjutits, det andra provet har också placerats i RH 62 % och vattenbegjutits en gång per dag och slutligen har det tredje provet placerats i RH 78 % och inte vattenbegjutits.

En jämförelse mellan de två proven som inte har vattenbegjutits uppvisar det förväntade resultatet; den relativa fuktigheten i betongen sjunker snabbare för proven som har varit placerade i RH 62 % än för provet som har varit placerat i RH 78%.

Resultatet över de två proven som har varit placerade i RH 62 % är inte som förväntat. Betongen som har vattenbegjutits 1 gång per dygn har kraftigare sjunkning av den relativa fuktigheten i betongen, jämfört med betongen som inte har vattenbegjutits alls i samma relativ

luftfuktighet. Författarnas bedömning av detta är inte att det är ett mätfel utan en kraftig variation i betongens sammansättning eller porsystem. Detta påstående kan styrkas av de tidigare graferna i detta kapitel exempelvis figur 9-5 som visar att samma prov (prov nummer 1.7) har en mycket kraftigare krympning än de övriga proven. Det har också påpekats tidigare i resultatet att prov nummer 1.7 avviker från övriga resultat. Resultatet över detta prov (nummer 1.7) rekommenderas därför att förbises med ovan givna förklaring.

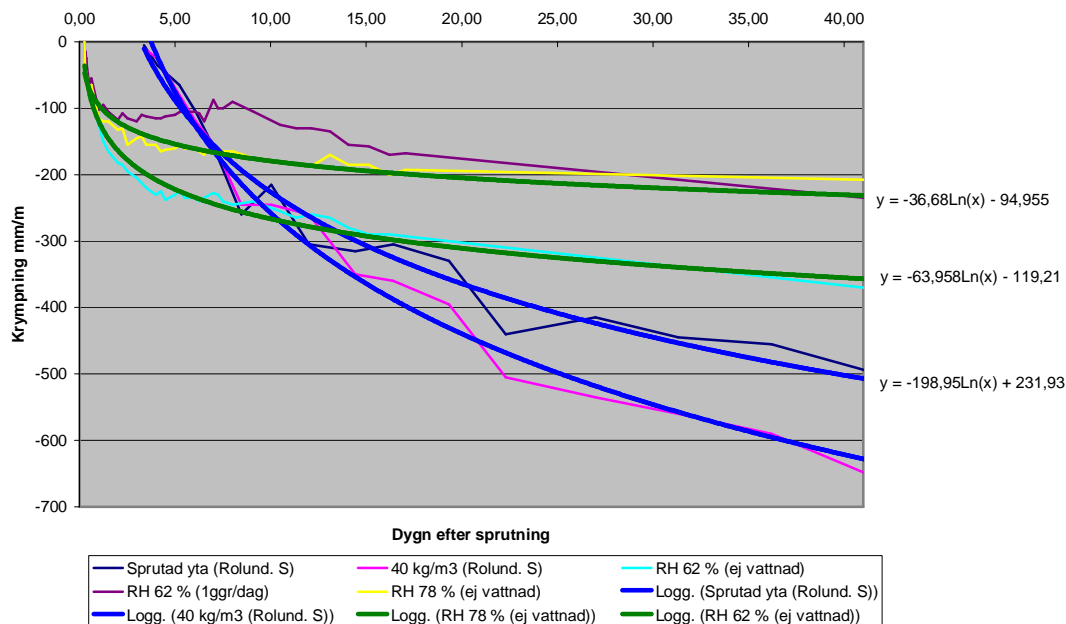
Mätning av den relativa fuktigheten i betongen skedde på ekvivalent djup. Den relativa fuktigheten på en ytligare nivå kan därför vara mycket lägre.

9.3 Jämförelse med andra försök

I detta avsnitt görs en jämförelse mellan resultaten från försöken i detta examensarbete med resultaten från Sören Rolund (Rolund 1999) och Sara Aziz (Aziz 2005) arbeten. Syftet med detta är att undersöka rimligheten i detta försök genom att jämföra det med andra. Det skall tas i beaktning att de jämförda försöken inte har utförts på samma sätt och därför behöver inte resultaten vara lika. En sammanfattning över de andra försöken samt vilken försöksmetod de har använt framgår av kapitel 6. Ingen ansträngning har gjorts att mer ingående försöka förklara skillnaderna mellan de olika försöken utöver att konstatera skillnaderna i graferna. Vid jämförelse har två eller fler mätserier valts från vardera försök.

9.3.1 Jämförelse med försök 1

Försöket är utfört av Sören Rolund i examensarbetet ”Krympningens inverkan på sprutbetongens vidhäftning mot berg” (Rolund 1999).

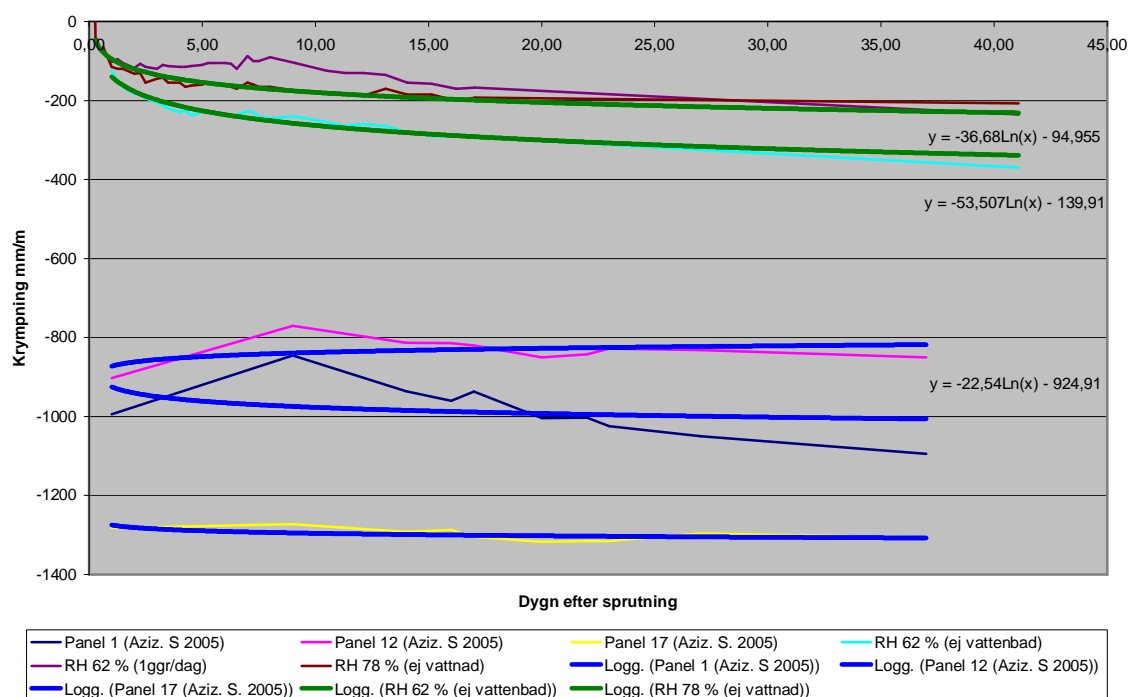


Figur 9-12 Jämförelse med försök 1

I jämförelsen mellan de två försöken ovan (se fig 9-12) framgår att försöket gjort i detta examensarbete (gröna linjer) har en kraftig krympning i början av mätintervallet och därefter avtar denna relativt hastigt med tiden. I det jämförda försöket (blåa linjer) genomfördes den första mätningen 2 dygn efter gjutningen (sprutningen) och det kan vara orsaken till att denna inte uppvisar någon kraftig krympning i början av försöket. Det andra försöket (blåa linjer) har en större absolut krympning och dessa avtar inte lika tydligt utan har ett mer långvarigt förlopp vilket resulterar i en stor krympning.

9.3.2 Jämförelse med försöket 2

Försöket är utfört av Sara Aziz i examensarbetet ”Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong” (Aziz 2005).



Figur 9-5 Jämförelse med försök 2

I jämförelsen mellan de två försöken ovan (se fig 9-13) framgår att försöket gjort i detta examensarbete (gröna linjer) har en mycket mindre absolut krympning. Det andra försöket (blåa linjer) har en extrem krympning mellan nollavläsningen och första mätningen. Detta framgår inte i figuren ovan utan kan ses i kapitel 6 figur 6-2. Vad som annars framgår i jämförelsen ovan är att vid båda försöken har krympningen efter det första dygnet liknande förlopp och lutning och kan därför antas vara rimliga resultat.

I Sara Aziz examensarbete, ”Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong”, ger hennes försök en kraftig autogen krympning under det första dygnet efter sprutning av betongen (Aziz 2005). I SveBeFo’s arbetsrapport, ”Hydratation och krympning hos sprutbetong”, kommenteras den kraftiga krympningen i Sara Aziz försök: ”Det stora krympbeloppet i början härrör från första dygnet när styrkan är beroende av tillstyvnadsacceleratorn” (Fjällberg et al. 2006). Med detta som bakgrund hade vi också som mål att göra ett större antal mätningar av krympningen under de 24 första timmarna efter sprutningen. Detta för att undersöka om vi kunde få en tydligare kurva av den autogena

krympningen. Det syns ingen kraftig autogen krympning i resultatet från detta examensarbete. Om försöken skulle ha varit likvärdiga skulle detta betyda att den extrema krympningen har skett innan de 6,5 timmar som dröjde fram tills att den första längd avläsningen gjordes i försöket till detta examensarbete. Detta skulle troligast kunna förklaras med att betongen i försöket för detta examensarbete direkt efter gjutning (sprutning) transporterades till en annan plats och att betongen då fick en plastisk krympning som inte kan bevisas.

10 Diskussion

Vi har i detta examensarbete kunnat konstatera att fukthärdningen har en betydande roll för krympningen, med störst inverkan under de första dyggen. Försöken i examensarbetet visar också att vattenbegjutning av betongen under sju dygn inte kan ersätta en högre relativ luftfuktighet. Den bästa yttre miljön för betongen är därför en relativ fuktighet på 100 %, då ingen vattenbegjutning skulle behövas. Problemet med tunnelbyggnationer är att klimatet kan vara svårt att styra över.

Vissa nödvändigheter bidrar även till ett sämre klimat för sprutbetongen, till exempel är ventilation oundgängligt ur arbetsmiljösynpunkt. Frågan blir då hur detta kan användas för en kvalitetshöjning av sprutbetongen samt minimera krympsprickorna i denna.

En möjlig lösning till detta skulle kunna vara att ha fuktillförsel vid fläktarna eller inuti tunneln för att styra klimatet. Det finns även andra positiva effekter av fuktigare luft in i tunneln som att fukten binder fina partiklar som faller ner på marken.

Som oftast måste de negativa konsekvenserna tas i beaktning, en av dessa kan vara att en fuktig arbetsmiljö leder till att arbetarna i tunneln kan börja frysa och känna obehag.

På vintern när kall luft går in genom fläktarna och sedan fram till fronten på tunneln värms den oftast upp av det inre klimatet. När temperaturen stiger kan luften samtidigt ta åt sig mer fukt, vilket gör att den relativa fuktigheten blir lägre. Hur stora skillnad detta bidrar med har vi inga uppgifter på, men tror att det kan vara bidragande faktor till en större krympning av sprutbetongen.

I dagens tunneldrivning är det mest använda sättet för fukthärdning av sprutbetongen att spruta vatten på betongen. Det är inte alltför ofta detta sker ty framdriften prioriteras då det är denna post som inbringar vinst åt entreprenören som bygger tunneln, flera arbetsuppgifter i en salvcykel uppfattas bara som en belastning. En annan orsak till att ingen fukthärdning sker kan vara att tunnelns relativa luftfuktighet uppskattas till kravet på RH 90% medan det i själva verket inte finns någon mätdata. Dessutom ses det inte så allvarligt på fukthärdning, både från entreprenören men även byggherren som bör vissa större intresse av fukthärdning för att även entreprenören skall ta det på allvar.

Vi anser att en styrning av klimatet i tunneln ger sprutbetongen en bättre kvalitet samt kan minska uppkomsten av krympsprickor. Vidare studier om hur man på olika sätt kan manipulera klimatet i tunneln ser vi som ett möjligt examensarbete.

11 Slutsats och förslag till fortsatt arbete

Fukthårdning av sprutbetong är en viktig del för att få så liten krympning som möjligt, men minst lika viktigt är en hög relativt luftfuktighet. Syftet med examensarbetet var studera effekten av varierande fukthårdning på sprutbetongen. Sprutbetongens krympning studeras med syftet att mäta skillnaden mellan olika fukthårdningar på sprutade betongprismor i labbmiljö, från ingen vattenbegjutning alls till kontinuerligt upprepande vattenbegjutningar i två olika relativa luftfuktigheter.

Resultaten från försöken i detta examensarbete visar att vattenbegjutning av sprutbetongen ger effekt för att minska krympningen av denna. Resultaten visar också tydligt att vattenbegjutning under sju dygn inte kan ersätta en högre relativ luftfuktighet. Den relativa fuktighet i luften och betongen strävar helat tiden efter att vara i jämvikt. En fältstudie av det verkliga tunnelklimatet under pågående drift behövs.

Det betongprisma som placerats i RH 62 % efter vattenbad i sju dygn, har krympt mycket kraftigare jämfört med det andra provet som placerades i RH 78 %; det första provet har krympt 0,36 mm/m jämfört med det andra som har krympt 0,24 mm/m. Betongprisman i RH 62 % har alltså krympt 50 % mer jämfört med provet som hade placerats i RH 78 % under en period av 72 dygn efter det att de båda proverna hade tagits ur vattenbadet.

Examensarbetet kunde inte påvisa en tidig kraftig autogen krympning av sprutbetongen som tidigare rapporter har visat. Ytterligare försök och försök i fält skulle därför behövas

Absolutbeloppet av den totala krympningen under hela försöket hos betongprismor som inte har vatten- eller fukthärdats under de 81 dygnen, varierar mellan 0,30 till 0,50 mm/m. En jämförelse med värdena från det första dygnet visar att mellan 25 % och 50 % av krympningen sker redan det första dygnet.

12 Forskningsprocessen

Ett stort moment i ett examensarbete är att skapa en problemformulering och utforma en försöksplan för försöken om detta är aktuellt. Då idén till detta examensarbete har varit ett eget initiativ från författarna har de själva utfört detta, därför kommer det i detta kapitel att ges en kort beskrivning och sammanfattning av forskningsprocessen under examensarbetet.

I början av examensarbetet fördes diskussioner tillsammans med våra handledare Arvid Taube och Peter Lundman på Banverket, för att ta fram en lämplig problemformulering. En lämplig problemformulering utgående från vår egen idé, vad som var dagsaktuell samt är lämplig i storlek för ett examensarbete.

Under en forskningsprocess kan problemformuleringen ändras då ny fakta kommer fram eller det visar sig att vissa delar är irrelevanta. En omformulering av problemet kan också ske då resurserna är begränsade och problemet är tvunget att delas upp i mindre delar.

Problemformuleringen för detta examensarbete har också ändrats under arbetets gång. Vissa delar var inte möjliga att genomföra på grund av årstiden eller har fått strykas på grund av begränsade möjligheter till fältförsök. Detta har istället lett till att nya idéer utvecklades av det vi sedan tidigare hade planerat. Förenklat har examensarbete ändrat riktning två gånger.

Nedan följer en kort sammanfattning av de tankar vi har haft, om vad vi ville få ut i de olika stadierna samt varför vi var tvungna att ändra problemformuleringen på vissa punkter.

12.1 Första stadiet

Den första tanken med detta examensarbete var att studera hur den omgivande miljön påverkar sprutbetongens egenskaper, med fokus på att luftens relativa fuktighet förändras mellan sommar- och vinterhalvår. Grundtanken var att utveckla det som står i Tunnel 2004; ”Bergytans temperatur skall vara minst +2°C vid sprutning”. Samt; ”Sprutning får inte utföras då risk för frysning föreligger”. (VV Publ 2004:124)

Målet med examensarbetet var att:

- Göra en sammanställning av de krav som finns på fukthärdning i de olika regelverken t.ex. BBK 04, Anläggnings AMA 98, BKR , BV-tunnel och Tunnel 2004
- Undersöka om kvalitén på sprutbetong skiljer sig mellan sommar och vinterhalvåret grundat på lägre temperatur och relativ luftfuktighet under vinterhalvåret
- Undersöka om den varierande kvalitén på sprutbetongen kan ha betydande effekt på tunnelns livslängd (dvs. nedbrytning av sprutbetongen).
- Göra en teoretisk modell på fukttransporten mellan sprutbetong och luft och jämföra med de praktiska försöken.

De praktiska undersökningarna på sprutbetongen och luftfuktigheten var tänkt att utföras vid två tillfällen på ett pågående tunnelprojekt, ett försök under vinterhalvåret (februari) och det

andra under sommarhalvåret (maj-juni). Alternativt kunde undersökningarna göras på en relativt ny tunnel med bra dokumentation över betongsprutningen under vinterhalvåret.

Ingen specifik försöksplan hade gjorts och inte heller vilka parametrar som skulle studeras hade bestämts vid detta första skede. Hållfasthet och krympning är de två parametrar som påverkar sprutbetongens kvalitet och livslängd, som vi mest funderade på att göra mätningar på.

Då vintern var kortvarig 2007 och examensarbetet startades i februari då en inledande litteraturstudien gjordes, fanns inga möjligheter kvar för att göra fältförsök i ett kallt klimat. Det var också svårigheter med att få tillträde till en tunnel för att utföra försöken i med så kort varsel, då igen försöksplan var färdigarbetad.

12.2 Andra stadiet

Möjligheten till att utföra några försök fanns nu bara under sommarhalvåret. Av detta skäl omformulerades problemuppställningen och några punkter fick strykas från tidigare idéer i forskningsprocessen. Fokus lades istället på hur vattenbegjutningen påverkar krympningen. Grundtanken är fortfarande att studera kvalitén på sprutbetongen beroende på utförandet.

”Vid efterbehandling genom intermitterant fukthärdning snarast efter sprutning. Vid efterbehandling genom intermitterant fukthärdning får fuktnivån vid betongytan inte underskrida 90 % relativ fuktighet under den erforderliga härdningstiden”. (Banverket 2005)

Målen för examensarbetet var att:

- Göra en sammanställning av krav på fukthärdning i de olika regelverken t.ex. BBK 04, Anläggnings AMA 98, BKR , BV-tunnel och Tunnel 2004.
- Undersöka om kvalitén på sprutbetongen (hållfasthet och krympning) kan höjas märkbart genom att vattenbegjuta under härdningstiden, eller om det finns andra sätt att bevara fukten i betongen?
- Undersöka i hur stor grad krympningen i sprutbetongen påverkas av olika relativa fuktigheter?

De praktiska försöken skulle utföras i en tunnel under en 7-dagars period i maj eller juni månad. Från Banverket hade vi fått förslag på att den mest lämpliga tunneln var Bjässholmstunneln på Ådalsbanan.

Mätmetoderna vi hade tänkt använda var att mäta krympningen i provprismor med olika vattenbegjutning under sju dygn. Även borrhärnor som utsatts för olika fukthärdning skulle borraras ut ur tunnelväggen, och sedan provtryckas i labbet på LTU för att se om hållfastheten skiljer sig mellan proverna. Alla prover skulle under de sju dyggen befinna sig i tunneln och utsättas för samma tunnelklimat.

På grund av att Bjässholmstunneln för tillfället bara bestod av en arbetstunnel som skulle leda ner till spårtunneln, fanns tyvärr inget utrymme för att utföra försöken. Möjligheten att skaffa en ny tunnel för försöken var få då sommaren lede till att många arbeten gjorde ett uppehåll

för semester. Den begränsade tiden som gavs för försöken i tunnelarna hade stor betydelse för det slutliga valet av försöksmetod.

12.3 Tredje stadiet

Valet av försöksmetod påverkades stort av tiden det fanns möjlighet att vara ute i fält. Därför valdes slutligen en metod som Sören Rolund hade använt i sitt examensarbete, ”Krympningens inverkan på sprutbetongens vidhäftning mot berg” (Rolund 1999), vilket det också fanns utrustning för på Luleås tekniska universitets laboratorium Complab. Det bestämdes att försöken skulle förenklas genom att betongprismor sprutades på en tunnel entreprenad, sedan transporteras till konditioneringsrum i Complab där luftfuktigheten kunde regleras.

Målet för examensarbetet ändrades inte utan förblev:

- Göra en sammanställning av krav på fukthärdning i de olika regelverken t.ex. BBK 04, Anläggnings AMA 98, BKR , BV-tunnel och Tunnel 2004.
- Undersöka om kvalitén på sprutbetongen (krympningen) kan höjas märkbart genom att vattenbegjuta under härdningstiden, eller om det finns andra sätt att bevara fukten i betongen?
- Undersöka i hur stor grad krympningen i sprutbetongen påverkas av olika relativa fuktigheter?

Den största skillnaden från den tidigare försöksplanen var att provkropparna flyttades till en miljö där temperaturen och den relativa luftfuktigheten kunde kontrolleras bättre. Eftersom vi nu inte hade någon sprutad tunnelvägg att ta borrhärningar ifrån, släpptes tanken med att testa hållfastheten och endast mäta krympningen vid olika vattenbegjutningar på sprutbetongen. Metod, utrustning och aktuellt utförande redovisas i kapitel 6 och 7.

13 Referenser

AB Svensk byggtjänst (1992), *Betonghandbok - Material*, utgåva 2, ISBN 91-7332-709-3

AB Svensk byggtjänst (2003), *Anläggnings AMA 98, Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten*, tredje tryckningen, Stockholm, ISBN 91-733a-885-5

AB Svensk byggtjänst (2004), *Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar Bro 2004*, Publikation 2004:56, Borlänge

Agostinacchio, M., Cuomo, G., (2004). "Plastic shrinkage reduction in concrete pavements due to the addition of both steel and polymer-modified fibers", *Concrete (London)*, v 38, n6, 44-46.

Almgren, T., Holmgren, L., Martinsson, J. (2007). *Betong- och armeringsteknik*, Sveriges Byggindustrier, Göteborg

Andersson, P., Lundberg, N. (2007), *Analysjämförelse mellan dataprogram och uppmätt RF i betong*, Examensarbete NR 2007:188. Luleås tekniska universitet – Samhällsbyggnad, Luleå, ISSN 1402-1617.

Ansell, A., Holmgren, J., Lagerblad, B., Westerholm, M. (2006). *Sprutbetongens egenskaper Reologi hos färsk sprutbetong samt fibrer och krympning*, Rapport K25, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning Rapport , Stockholm

Austin, S. A., Robins, P. J., (1995), *Sprayed concrete: properties, design and application*, Caithness: Whittles, ISBN 1-870325-01-X

Aziz, S. (2005). *Experimentell undersökning av plastfiberarmerad sprutbetong*.TRITA-BKN Examensarbete 227, KTH –Betongbyggnad, Stockholm

Banverket. (2006). *Banverkets årsredovisning 2006*, Banverkets hemsida, http://www.banverket.se/pages/1493/BV_AR_06_WEBBx.pdf (2007-10-10)

Banverket, (2005) *BV Tunnel*, Standard BVS 585.04, Borlänge

Boverket (2003), *Regelsamling för konstruktion – Boverkets konstruktionsregler, BKR, byggnadsverkslagen och byggnadsverksförordningen*, Vällingby, ISBN 91-7147-740-3

Boverket (2004), *Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 04*, ISBN 91-7147-816-7

Bransch, J., Rawling, A., Hannant, D.J., Mulgeron, M., (2002). "The effects of fibres on the plastic shrinkage cracking og high strength concrete", *Materials ans Structures and Buildings*, v 156, n 1, 15-25.

Burström, P-G. (2001) *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Studentlitteratur, Lund (ISBN: 91-44-01176-8)

CBI, Cement och betong institutet (1997). *Stålfiberbetong för bergförstärkning – provning och värdering*, CBI rapport 3:97, Stockholm, Elanders Gotab

Fjällberg, L., Holmgren, J., Lagerblad, B., Vogt, C. (2006). *Hydratation och krympning hos sprutbetong*, Rapport K24, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning Rapport , Stockholm

Lagerblad, B., Trägårdh, J., (1995). *Ballast för betong: egenskaper, karaktärisering, beständighet och provningsmetoder*, CBI rapport 95:4, Stockholm.

Lagerblad, B., Fjällberg, L., Westerholm, Mikael., (2007). *Sprutbetongs krympning-modifiering av betongsammansättning*, Rapport 86, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning Rapport , Stockholm

Malmgren, L., Nordlund, E., Rolund, S., (2005) "Adhesion strength and shrinkage of shotcrete", *Tunnelling and Underground Space Technology*, v 20, n 1, 33-48.

Morgan, D.R., Chan, C., (2001). "Understanding and controlling shrinkage and cracking in shotcrete", *Shotcrete Magazine*, v3, n2, 26-30.

Olek, J., Weiss, J., (2003). "Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function", *Materials and Structures*, v 36, July 2003, 386-395.

Rolund, S. (1999). *Krympningens inverkan på sprutbetongens vidhäftning mot berg*, Examensarbetet 231, Avd. för Konstruktionsteknik, Luleås Tekniska Universitet, Luleå

SIS – standardiseringskommissionen i Sverige (1978). *Svenska standard SS 13 72 15 – Betongprovning – Hårdnad betong – Krympning*.

SIS – standardiseringskommissionen i Sverige (2005). *Svenska standard SS-EN 14488-1:2005 – Provning av sprutbetong – Del 1: Provtagning av färsk och hårdnad betong*.

Sveriges geologiska undersökning, (2005). *Grus, sand och krossberg: produktion och tillgångar 2005*, SGU Uppsala.

Vägverket (2004), *Tunnel 2004*, Vägverket publikation 2004:124, Första tryckningen, Borlänge, ISSN 1401-9612.

Bilaga 1 Betongrecept

Proportionering Sprutbetong Botnia vct 0,45 58 kg stålf. xls

Delmaterial	Typ	Torra vikter (kg/m ³)	Densitet (ton/m ³)	Torrhalt	Dosering (% av C)	Satsstorlek:	25	L
Cement	Anläggningscement	500,0	3,150			Anläggningscement	12,50	kg
Ballast 1	16-32 Överhörräs	0,0	2,670			16-32 Överhörräs	0,00	kg
Ballast 2	8-16 Överhörräs	0,0	2,670			8-16 Överhörräs	0,00	kg
Ballast 3	4-8 Överhörräs	0,0	2,660			4-8 Överhörräs	0,00	kg
Ballast 4	0-8 Överhörräs	0,0	2,660			0-8 Överhörräs	0,00	kg
Ballast 5	0-8 Skillinge-Sprut	1540,5	2,660			0-8 Skillinge-Sprut	38,51	kg
Stålfiber	Dramix RC 65/35 BN	58,0	7,800			Dramix RC 65/35 BN	1,45	kg
Vatten	KV	221,5	1,000			KV	5,54	kg
Tillsatsmedel 1	Sikament 56	3,50	1,100	37,0%	0,70	Sikament 56	87,50	g
Tillsatsmedel 2	SikaAer S	0,00	1,000	0,5%	0,00	SikaAer S	0,00	g
Tillsatsmedel 3	-	0,00	1,160	0,0%	0,00	-	0,00	g
		1000,0						

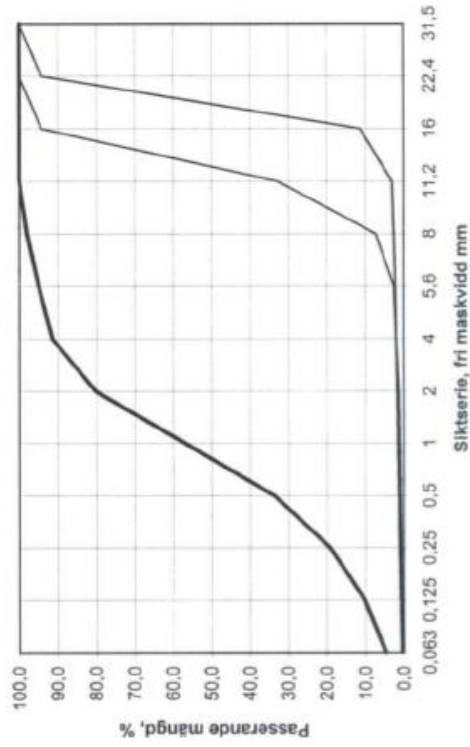
Betongvolym L

Vattencementtal	0,45
Lufthalt	3,0 %
Pastavolym	413,4 L/m ³
Volym ballast	579,2 L/m ³
Vikt ballast	1540,5 kg/m ³
Mängd 0-8 av totala ballastmängden	1509,7 kg/m ³
Andel 0-8 av totala ballastmängden	98,0 %
Mängd passerande 0.25 mm	19,2 %
Finmaterialmängd, ballast	295,8 kg/m ³
Mängd 8-16 av totala ballastmängden	30,8 kg/m ³
Andel 8-16 av totala ballastmängden	2,0 %
Total finmaterialmängd, C+Ballast <0,25mm	795,8 kg/m ³
Vatten/(Cement+Ballast <0,25mm)	0,283
Absorberat vatten	6,16 kg
Effektiv vattenhalt	215,4 kg
Effektivt vattencementtal	0,438
Differens vct	0,012
Densitet	2324 kg/m ³

Proportionering av betong

Material	Andel	Leverans län	Datum	Vattenabsorption %	Kornform	Humus	Slamhalt	Densitet	Fuktkvot %
16-32	0,0%	Överhormäs	2003-02-21	0,0	K	-	-	2670	
8-16	0,0%	Överhormäs	2003-06-10	0,0	K	-	-	2670	
4-8	0,0%	Överhormäs	2001-11-06	0,0	K	-	-	2660	
0-8	0,0%	Överhormäs	2001-11-06	0,0	K	-	-	2660	
0-8	100,0%	Skillinge-Sprut	2007-06-05	0,4	N	-	-	2660	
	0,0%			0,0					
Summa	100%							Medeldensitet 2660 kg/m³	

Sikt med fri mask- vidd mm	16-32		8-16		4-8		0-8		0-8		0	
	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %	Passerar Summa %
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	94,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	11,4	94,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	3,1	32,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	2,6	7,3	100,0	100,0	100,0	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0
5,6	2,2	2,6	100,0	100,0	100,0	95,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0
4	2,0	2,0	100,0	100,0	100,0	91,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	91,4
2	1,8	1,4	100,0	100,0	100,0	80,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,2
1	1,6	1,2	100,0	100,0	100,0	56,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	56,9
0,5	1,4	1,0	100,0	100,0	100,0	33,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	33,7
0,25	1,2	0,8	100,0	100,0	100,0	19,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	19,2
0,125	0,9	0,7	100,0	100,0	100,0	10,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,2
0,063	0,7	0,5	100,0	100,0	100,0	4,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,7
Finhetsmodul	7,28	6,42	0,00	0,00	0,00	2,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,66



Bilaga 2 Produktblad Meyco SA 170



The Chemical Company

Produktblad Meyco SA 170

Alkaliefri flytande accelerator för sprutbetong med extremt hög tidig hållfasthet

Produktbeskrivning

Meyco SA 170 är en alkaliefri accelerator för användning i våtsprutningsmetoden.

Meyco SA 170 är en vätska som skall tillsättas i sprutmunstycket, doseringen kan varieras till önskad bindnings- och härdningstid.

Användning

Meyco SA 170 är lämplig för alla sprutarbeten där extremt tjocka påslag samt snabb hållfasthetsutveckling är nödvändig.

Vanliga användningsområden är:

- Tunnlar
- Gallerier
- Gruvarbeten
- Reparationsarbeten

Egenskaper och fördelar

- Snabbare bindningshastighet och högre korttidshållfasthet.
- Ökade lagertjocklekar (40-50cm).
- Möjliggör snabba arbetsförlopp.
- Låg materialåtgång.
- Mindre spill och mindre damm.
- Mindre aggressiv och därför bättre arbetsmiljö.

Dosering

Beroende på temperatur på betongen, luften och underlaget varierar doseringen. Reaktiviteten på cementen styr också doseringen. Normaldoseringen för Meyco SA 170 är mellan 3-10 % av cementvikten. Överdoserar kan orsaka reduktion av sluthållfastheten. Meyco SA 170 skall doseras i munstycket tillsammans med luften direkt till den homogena betongen. Det är viktigt att Meyco SA 170 tillsätts i ett speciellt munstycke för att fungera ordentligt. Meyco SA 170 skall doseras

med rätt typ av doseringspump för att säkra konstant dosering. Pumpar som fungerar utmärkt är monopumpar, slangpumpar (Bredel) och Meyco Dosa. Rengörning av pumpar och slangar skall göras med stora mängder vatten.

Tekniska data

Form	Lösning
Färg	Klar
Densitet	1,46 +- 0,06 kg/lit
pH värde	3 +- 0,5
Viskositet (vid 20°C)	150 +- 50 mPas
Löslighet i vatten	fullständig
Kloridinhåll	< 0,1 %

Förpackning och lagring

MEYCO SA 170 kan levereras i fat om 210 liter 1000 liter container eller i bulk. Förvaringstemperaturen för MEYCO SA 170 är min + 5°C och max +40°C. Bäst är om temperaturen ligger mellan +10°C och 20°C. MEYCO SA 170 skall förvaras i plastbehållare eller behållare av rostfritt syrafast stål.

MEYCO SA 170 kan inte förvaras i vanliga stålbehållare på grund av att korrosionen kan påverka produktens funktion. Alla behållare måste ha täta lock för att inte produkten skall reagera med luften. Om ovanstående parametrar följs så kan Meyco SA 170 lagras i upp till 3 månader.

Om produkten frusit kontakta den lokala Degussa representanten. Efter långvarig lagring rekommenderas det att Meyco SA 170 rörs om ordentligt före användning. Omrörning skall ske med mekanisk omrörning eller rundpumpning. Tryckluft får inte användas.

Visuell kontroll och test av produkten bör alltid utföras före användning.

Bilaga 3 Mätvärden från försöket i RH 62%

		De tre sista decimalerna i det uppmätta avståndet mellan mätdubben (µm)							(µm)
Prov:		1	2	3	4	5	6	7	Referens
		(Vattenbad)	(2ggr/dag)	(1ggr/dag)	(0,5ggr/dag)	(ej vattnad)	(ej vattnad)	(1ggr/dag)	
Datum:	Tid:								
12-jun	09:00	Sprutning							
12-jun	15:30	460	471	463	474	464	451	442	469
12-jun	16:00	453	466	457	467	460	444	435	469
12-jun	16:30	453	468	460	467	460	445	432	469
12-jun	17:00	453	467	458	468	459	443	432	469
12-jun	17:30	454	464	458	466	460	443	430	469
12-jun	18:00	452	465	456	465,5	458	441	431	469
12-jun	20:00	448,5	462	452	461	456	436,5	423,5	469
12-jun	22:00	448	463	452,5	462	459,5	437	424	472
12-jun	00:00	447	458	449	455	454	430	419	466
13-jun	09:00	453	450	440,5	447,5	445	424	412	467
13-jun	15:00	451	451	442	447,5	443	419	410	467
13-jun	21:00	453	449	440	445	440	416	404	467
14-jun	09:00	453	448	437,5	442	439	412,5	404	467
14-jun	15:00	455	450	439,5	442	438	412	403	467
14-jun	21:00	452,5	448	438	440	439	410	403	467
15-jun	09:00	452,5	450	437	439	438	408	401	467
15-jun	15:00	455	452	439,5	440	437	407	401	467,5
15-jun	21:00	454	452	438,5	439	436	405	402	467
16-jun	09:00	455,5	450	438	438	434	403	400,5	467
16-jun	15:00	453,5	450	438	438	435	404	402	467
16-jun	21:00	454,5	451,5	438,5	437,5	435,5	401,5	399	467
17-jun	09:00	456	452	439	438	437	403	400	467
17-jun	15:00	455	452	440	438	436	404	402	467
17-jun	21:00	454,5	453	440	437,5	435,5	402	402	467
18-jun	09:30	455	452	439	437	433,5	401	401	466
18-jun	15:30	455,5	453,5	439,5	437	434	401	401	467
18-jun	21:30	454	452	437	437	432,5	402	404	467

		De tre sista decimalerna i det uppmätta avståndet mellan mät-dubben (μm)							(μm)
Prov:		1	2	3	4	5	6	7	Referens
		(Vattenbad)	(2ggr/dag)	(1ggr/dag)	(0,5ggr/dag)	(ej vattnad)	(ej vattnad)	(1ggr/dag)	
19-jun	09:00	457	455	442	438,5	436	402	403	465,5
19-jun	15:00	455	452	440	436	434	402	404	466
19-jun	21:00	456	454	441	438	434	401	403	467
20-jun	09:00	456	455	444	438,5	435	401	404	468
21-jun	11:30	457	453	440	437	435	401	404	467
22-jun	21:00	455	451	437	435	432	399	401	468
23-jun	17:00	452	451	436	434	431,5	397	399	468
24-jun	12:00	450	450	436	434	432	398	399	468
25-jun	11:30	445	446	433	431	430	395	396	466
26-jun	10:30	443	443	430	431	429	393	394	467
27-jun	12:15	446	442	429,5	428	427	391	392	467
28-jun	14:15	439	439	427	425	427,5	391	391	467
29-jun	10:15	437,5	439	427,5	424,5	427	390,5	391,5	467
23-jul	11:00	415	420	411	404	412	372	374	464
31- aug	15:00	388	402	390	387	396	355	353	468

Bilaga 4 Mätvärden från försöket i RH 78%

		De tre sista decimalerna i det uppmätta avståndet mellan mättdubben (μm)						(μm)
Prov:		1	2	3	4	5	6	Referens
		(Vattenbad)	(2ggr/dag)	(1ggr/dag)	(0,5ggr/dag)	(ej vattnad)	(ej vattnad)	
Datum:	Tid:							
12-jun	09:00							
12-jun	15:30	461	482	466	467,5	465	411	469
12-jun	16:00	454	475,5	460	467	454	402	469
12-jun	16:30	456	474	456	463	455	404	469
12-jun	17:00	454	473	457	461	455	401	469
12-jun	17:30	455	474	456,5	459	456	401	469
12-jun	18:00	453	473,5	455,5	459	455	400,5	469
12-jun	20:00	449	470,5	452	455	451	396	469
12-jun	22:00	453	475	457,5	459	454	398	472
12-jun	00:00	451	469,5	450,5	455	449	390	466
13-jun	09:00	455	462	441,5	444	440	381	467
13-jun	15:00	455	464	443	446	439	379	467
13-jun	21:00	456	463,5	442	445	439	378	467
14-jun	09:00	454	463	439	444	436,5	373	467
14-jun	15:00	456	465	442	444	437	373	467
14-jun	21:00	454	463	438	441,5	432	368	467
15-jun	09:00	455	463	437	440,5	434	368	467
15-jun	15:00	457	467,5	441,5	443,5	435	368	467,5
15-jun	21:00	455	466	439,5	442	432	367,5	467
16-jun	09:00	457	467	439	443	432	368	467
16-jun	15:00	456	466	436	439	430	366	467
16-jun	21:00	456	466,5	439	441	430,5	364,5	467
17-jun	09:00	457	467	438	441	431	366	467
17-jun	15:00	457	468	439	443	432	368,5	467
17-jun	21:00	456	467,5	439,5	441	431	365	467
18-jun	09:30	455,5	466,5	439	440	430	367,5	466
18-jun	15:30	457	469	440,5	441,5	430	367	467
18-jun	21:30	456	467	438	439	429	366,5	467

		De tre sista decimalerna i det uppmätta avståndet mellan mättdubben (μm)						(μm)
Prov:		1	2	3	4	5	6	Referens
		(Vattenbad)	(2ggr/dag)	(1ggr/dag)	(0,5ggr/dag)	(ej vattnad)	(ej vattnad)	
19-jun	09:00	459	469,5	441,5	443	430,5	367,5	465,5
19-jun	15:00	457,5	469	440,5	443	430	367	466
19-jun	21:00	458	468	440,5	443	430	367	467
20-jun	09:00	458,5	470	441	443	431	368	468
21-jun	11:30	457	468	440	441	428	368	467
22-jun	21:00	456	467,5	440	441	428	371	468
23-jun	17:00	454	465	438	440	427	372	468
24-jun	12:00	453	465	438,5	439	426,5	370	468
25-jun	11:30	454	467	438,5	441	428	366	466
26-jun	10:30	451	465	437	437,5	426	365	467
27-jun	12:15	449	462	437	438	426	364	467
28-jun	14:15	446	460	434,5	437	423	363	467
29-jun	10:15	445	460	435	436,5	424,5	363,5	467
23-jul	11:00	433	452	428	430	418,5	357	464
31-aug	15:00	413	436	412	414	404	345	468

Bilaga 5 Mätvärden över relativ fuktigheten i sprutbetongen från försöket i RH 62%

		Relativ fuktighet (%) i Betong	
		Prov: 6 (ej vattnad)	7 (1ggr/dag)
13-jun	09:00	87,5	86,5
13-jun	15:00	91,1	89,5
13-jun	21:00	93	90,6
14-jun	09:00	94,4	91,6
14-jun	15:00	94,5	90,9
14-jun	21:00	95	91,3
15-jun	09:00	95	91,2
15-jun	15:00	95,3	90,4
15-jun	21:00	94,9	90,6
16-jun	09:00	95	90,6
16-jun	15:00	95,3	91,8
16-jun	21:00	95,2	90,2
17-jun	09:00	95,2	89,9
17-jun	15:00	95,1	89
17-jun	21:00	95,4	90
18-jun	09:30	95,7	89,9
18-jun	15:30	95,5	89,5
18-jun	21:30	95,5	90
19-jun	09:00	95	89,4
19-jun	15:00	95,6	89,6
19-jun	21:00	95,4	90,2
20-jun	09:00	95	89,2
21-jun	11:30	95,2	89,9
22-jun	21:00	94,6	88,5
23-jun	17:00	94,8	88,4
24-jun	12:00	94,5	87,6
25-jun	11:30	94,1	87,1
26-jun	10:30	93,8	86,8
27-jun	12:15	93,8	87,1
28-jun	14:15	93,5	87
29-jun	10:15	93,4	87,3

Bilaga 6 Mätvärden över relativ fuktigheten i sprutbetongen från försöket i RH 78%

		Relativ fuktighet (%) i Betong
	Prov:	6
		(ej vattnad)
13-jun	09:00	89,4
13-jun	15:00	95
13-jun	21:00	96,1
14-jun	09:00	97,1
14-jun	15:00	97,5
14-jun	21:00	97,4
15-jun	09:00	97,6
15-jun	15:00	97,5
15-jun	21:00	97,7
16-jun	09:00	97,5
16-jun	15:00	97,6
16-jun	21:00	97,7
17-jun	09:00	98,1
17-jun	15:00	97,9
17-jun	21:00	98,1
18-jun	09:30	98
18-jun	15:30	98,2
18-jun	21:30	98,2
19-jun	09:00	98,6
19-jun	15:00	98,6
19-jun	21:00	98,4
20-jun	09:00	98,7
21-jun	11:30	98,6
22-jun	21:00	98,4
23-jun	17:00	98,3
24-jun	12:00	98,3
25-jun	11:30	98,5
26-jun	10:30	98,4
27-jun	12:15	98,4
28-jun	14:15	98,2
29-jun	10:15	98,4